



Decentralized Control of Bidirectional Converters in a Grid-connected DC Microgrid to Increase System Stability Using a Genetic-Neural Algorithm

Seyed Mojtaba Abbasi¹, Mehdi Nafar^{2*}, Mohsen Simab³

¹PhD Student, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

^{2,3} Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.26.2021

Revised: 07.16.2021

Accepted: 07.26.2021

Keyword:

DC micro-grid
Converter
Frequency
Voltage restoration
Stability
Genetic-neural

***Corresponding Author:**

Mehdi Nafar

Email: mnafar@miau.ac.ir

ABSTRACT

Using bidirectional parallel converters improves system reliability as they can bypass faults. Therefore, the bidirectional parallel converters structure is adopted for the DC microgrid connected to the grid. There is a circulating current between the bidirectional parallel converters that limits the overall capacity of the system and can damage switching devices. To solve this problem, in this paper, the mechanism of generating circulating current on the AC side when several bidirectional parallel converters work together was taken into consideration with the effect of constant power loads by the droop strategy $P_{dc}-V_{dc}^2-f$ to share DC power and network frequency adaptation. The PI coefficients of the bidirectional parallel converters controller were optimized by online genetic algorithm and neural networks and updated with system conditions. Both the stable and dynamic relationships between P_{dc} and v_{dc}^2 are linear and did not create constant power loads of unstable poles for the system. The results indicated that compared with conventional $i_{dc}-V_{dc}$ droop control, the proposed $P_{dc}-V_{dc}^2-f$ strategy can increase dc power control and system stability, consequently increasing the dc voltage regulation dynamics.





کنترل غیرمتمرکز مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبکه DC متصل به شبکه به‌منظور افزایش پایداری سیستم به کمک الگوریتم ژنتیک-عصبی

سید مجتبی عباسی^۱، مهدی نفر^{۲*}، محسن سیماب^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.
۲ و ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

چکیده

از آنجا که مبدل‌های قدرت دوطرفه قابلیت عبور از خطا را دارند، به‌کارگیری آنها باعث بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. بنابراین، ساختار مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی، برای ریزشبکه DC متصل به شبکه اتخاذ شده است. میان مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی، جریان گردشی وجود دارد که ظرفیت کلی سیستم را محدود می‌کند و می‌تواند به دستگاه‌های سوئیچینگ آسیب برساند. برای حل این مسئله، در این مقاله مکانیزم تولید جریان گردشی در سمت AC هنگامی که چندین مبدل قدرت دوطرفه به‌صورت موازی با هم کار می‌کنند، با در نظر گرفتن تأثیر بارهای توان ثابت توسط استراتژی دروپ $Pdc-vdc^2-f$ مورد توجه قرار گرفت تا اشتراک‌گذاری توان DC و انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه انجام شود. ضرایب PI کنترلر مبدل‌های قدرت توسط الگوریتم ژنتیک آنالین و شبکه عصبی بهینه شد و با شرایط سیستم به‌روزرسانی گردید. هر دو رابطه پایدار و دینامیکی بین Pdc و vdc^2 خطی هستند و بارهای توان ثابت قطب‌های ناپایدار را برای سیستم ایجاد نمی‌کنند. نتایج مقایسه شده با کنترل دروپ $idc-vdc$ متداول نشان می‌دهد استراتژی پیشنهادی $Pdc-vdc^2-f$ می‌تواند کنترل توان dc و پایداری سیستم را افزایش دهد که باعث افزایش دینامیک تنظیم ولتاژ dc می‌شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

کلید واژگان:

ریزشبکه DC
مبدل
فرکانس
بازرسی ولتاژ
پایداری
ژنتیک-عصبی

*نویسنده مسئول: مهدی نفر

پست الکترونیکی:

mnafar@miau.ac.ir



مقدمه

افزایش پایداری سیستم در شبکه‌های الکتریکی به‌عنوان هدف بسیار مهمی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱]. پایداری سیستم قدرت از طریق بهینه‌سازی نقاط هدف با رویکرد استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد [۲]. در این مقاله از ساختار مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی چندگانه برای یک ریزشبکه DC متصل به شبکه AC استفاده شده است. پشتیبانی ولتاژ و انتقال انرژی از ریزشبکه DC متصل به شبکه AC و بالعکس توسط مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی انجام می‌شود. در [۳] نقاط ضعف دروپ $idc-vdc$ متداول به‌طور دقیق تجزیه و تحلیل می‌گردد و استراتژی کنترل توزیع‌شده برای غلبه بر این نقایص ارائه می‌شود. در [۴] یک روش کنترل توزیع برای تحقق بخشیدن به بازیابی ولتاژ و به اشتراک گذاشتن جریان دقیق DC با انتقال سه سیگنال پیشنهاد شده است: الف) سیگنال ولتاژ محلی ب) سیگنال ولتاژ تخمینی ج) سیگنال جریان محلی. در [۵] یک استراتژی کنترل ثانویه متمرکز پیشنهاد شده است تا جابه‌جایی ولتاژ DC با افزودن یک مقدار تغییر ولتاژ به کنترل‌کننده دروپ متداول انجام شود اما دقت اشتراک‌گذاری جریان را نمی‌توان تضمین کرد. در [۶] یک روش کنترل بهبودیافته توزیع ثانویه براساس سیستم ارتباطی پهنای باند پایین برای بازیابی ولتاژ DC و اطمینان از صحت توزیع جریان DC ارائه شده است. امروزه بارهای DC و منابع انرژی تجدیدپذیر به‌طور گسترده‌ای در شبکه استفاده می‌شود؛ لذا ریزشبکه‌های DC نیز اخیراً با توجه به مزایای خود از جمله بهره‌وری بالا و هزینه کم مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. علاوه بر این، روش‌های کنترل اصلاح شده یا روش‌های کنترل ثانویه به سیستم ارتباطی پهنای باند پایین، بستگی دارد؛ بنابراین هزینه‌های دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرمتمرکز افزایش می‌یابد [۸؛ ۹]. در حالت مقایسه ریزشبکه مستقل AC با ریزشبکه مستقل DC، ریزشبکه AC/DC ترکیبی می‌تواند تولیدکننده‌های AC و DC، بارهای AC و بارهای DC را بدون تبدیل‌های AC به DC یا DC به AC تحت پوشش قرار دهد. ریزشبکه AC/DC ترکیبی به‌طور معمول از ریزشبکه^۱ AC، ریزشبکه DC و مبدل‌های قدرت دوطرفه تشکیل شده است که در آن ریزشبکه AC، شامل تولیدکننده‌ها و بارهای AC است، ریزشبکه DC هم شامل تولیدکننده‌ها و بارهای DC است [۱۰]. در [۱۱] یک روش کنترل یکپارچه برای اتصال به شبکه و ریزشبکه dc جزیره‌ای پیشنهاد شده است. روش کنترل پیشنهادی می‌تواند جریان DC دقیق را به اشتراک بگذارد و ولتاژ باس را بازیابی کند. در [۱۲] یک روش کنترل هماهنگ غیرمتمرکز برای مبدل قدرت دوطرفه سه فاز موازی در ریزشبکه AC/DC ترکیبی پیشنهاد شده است. برای کنترل مبدل قدرت دوطرفه سه فاز موازی، عمدتاً از سه کنترل‌کننده PI برای تغییرات ولتاژ و تنظیم افت شیب منحنی استفاده می‌شود. تمام این استراتژی‌های کنترل برای ریزشبکه dc عمدتاً بر حالت جزیره‌ای تمرکز دارد که حالت متصل به شبکه را در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این، روش‌های کنترل اصلاح‌شده یا روش‌های کنترل ثانویه به سیستم ارتباطی پهنای باند پایین بستگی دارد؛ بنابراین هزینه‌های دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرمتمرکز افزایش می‌یابد [۱۳].

ایده جدیدی که در این کار از آن استفاده شده این است که می‌توان به این نوع کنترل دروپ یعنی $Pdc-vdc^2$ ، انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه را اضافه کرد [۱۴] که باید کنترل دروپ $Pdc-vdc^2$ با طراحی شود که نام این حالت پیشنهادی جدید را $Pdc-vdc^2-f$ می‌نامیم. در این حالت، ضرایب PI مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی با استراتژی دروپ $Pdc-vdc^2-f$ پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک به‌صورت آنلاین بهینه و با شرایط سیستم به‌روزرسانی می‌شود اما با توجه این که الگوریتم باید محاسبات آنلاین را انجام دهد به‌روزرسانی ضرایب PI دارای تأخیر است که برای جلوگیری از این کار می‌توان الگوریتم ژنتیک را به‌صورت آنلاین در شبیه‌سازی مدل کرد و پس از تکرار مشخص مثلاً ۱۰۰ تکرار در هر تکرار ضرایب PI بهینه شده را در فایل excel ذخیره کرد و سپس در فاز بعد برای آموزش

¹ Subgrid

شبکه عصبی استفاده کرد. در این صورت در محاسبه الگوریتم ژنتیک، سرعت افزایش می‌یابد. چون شبکه عصبی براساس نرون‌ها در مغز مدل شده، پاسخ لحظه‌ای و بهینه‌ای برای PI به‌صورت آنلاین ارائه می‌دهد. در بخش ۲ مدل‌سازی سیستم پیشنهادی بررسی می‌شود، شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری به ترتیب در بخش ۳ و ۴ آورده شده است.

مدل‌سازی سیستم

ریز شبکه DC تحت مطالعه شامل منابع تولید پراکنده‌ای مانند فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی و غیره است. روش‌های کنترل منابع تولید پراکنده در مقالات دیگر مطالعه شده است و نقطه تمرکز این پژوهش نمی‌باشد. ذخیره‌سازها در حالت شارژ یا دشارژ با توان ثابت کار می‌کنند و دیگر تولیدکننده‌ها در حالت ردیابی نقطه توان ماکزیمم (MPPT) عمل می‌کنند [۱۵]. روش کنترل پیشنهادی برای مبدل‌های قدرت دوطرفه نقطه تمرکز این مقاله است. هنگامی که وضعیت سوئیچینگ مبدل‌های قدرت دوطرفه متفاوت است، افت ولتاژ در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه وجود دارد و جریان گردشی در طول مسیر تولید می‌شود. یک راهبرد کنترل دروپ dc بهبودیافته مبتنی بر $Pdc-vdc^2-f$ پیشنهاد شده است که می‌تواند عملکرد و پایداری سیستم را با وجود بارهای توان ثابت ارتقا دهد. کنترل غیرمتمرکز برای هماهنگی مبدل‌های دوطرفه در یک ریز شبکه DC متصل به شبکه با رویکرد انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه و افزایش پایداری سیستم با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک-عصبی انجام شده است. مبدل‌های قدرت می‌توانند ولتاژ ریز شبکه dc را به‌صورت هماهنگ فراهم کنند که کنترل فرکانس شبکه براساس اصلاح شده [۱۶] با کنترل مبدل‌های قدرت دوطرفه ترکیب شده است. برای به‌دست آوردن بهترین عملکرد کنترل‌کننده PI و تعیین ضرایب مربوطه، در عمل روش‌های مختلفی وجود دارد که در این مقاله ما از بهینه‌سازی ژنتیک-عصبی برای بهینه‌سازی ضرایب PI کنترلر استفاده کرده‌ایم. الگوریتم ژنتیک-عصبی روشی برای بهینه‌سازی است که با الهام از اصل بقای شایسته‌ترین در موجودات زنده عمل می‌کند. الگوریتم‌های ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی است که ایده آن برگرفته از طبیعت می‌باشد [۱۷]. در [۱۸] کنترل‌کننده‌های GA-PID با MATLAB شبیه‌سازی شدند و روش بهینه‌سازی GA برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده PID مربوطه استفاده شد. عملکرد GA-PID در یک مبدل باک DC-DC با شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل براساس معیارهای JAE، ISE، IATE و MSE بررسی شد. با موازی کردن اینورترهای متعدد، ولتاژ و فرکانس هر اینورتر به‌منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو تنظیم می‌شود [۱۹]. در این مقاله، برای کدنویسی از شبکه هوشمند عصبی و جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک موجود در نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANN) سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی نوین برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش به‌دست‌آمده در راستای بیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. منطق ریاضی روش الگوریتم ژنتیک سعی بر این دارد که با مینیمم کردن یک تابع ارزشیابی یا تابع هدف^۳، خروجی سیستم کنترلی را بهینه کند. این تابع ارزشمند را می‌توانیم براساس بهبود ضرایب PI به‌صورت زیر تعریف کنیم:

$$CostF = \alpha.OS + (1 - \alpha).ST \quad (۱)$$

که در آن OS میزان حداکثر جهش و ST یا زمان استقرار می‌باشد. اگر فرض کنیم $\alpha = 0.5$ رابطه فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Maximum power point tracking

^۲ Artificial Neural Networks

^۳ Cost Function

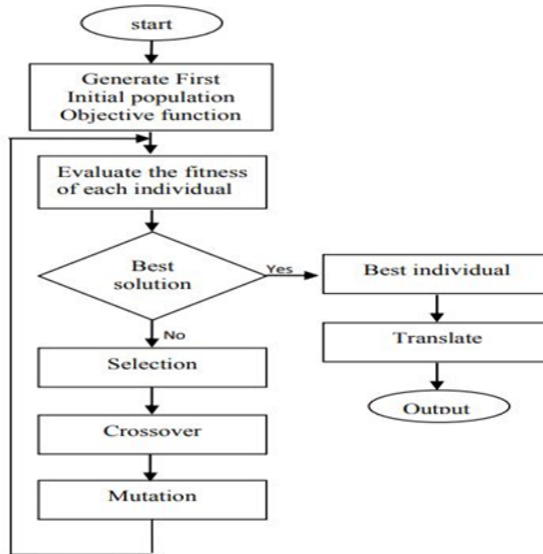
(۲)

$$CostF = 0.5 \times OS + 0.5 \times ST$$

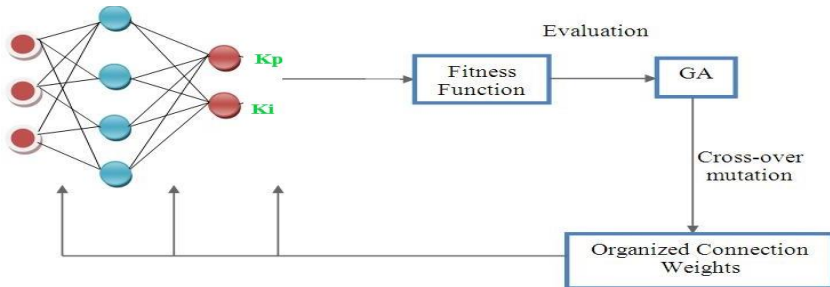
ضرایب PI مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی با استراتژی دروپ $Pdc-vdc^2-f$ پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک به صورت آنلاین بهینه و با شرایط سیستم به‌روزرسانی می‌شود. روش کنترل کامل، روش ترکیبی شامل روش کنترل حلقه داخلی و روش کنترل حلقه خارجی است که در شکل ۸ نشان داده شده است. در راستای مقاوم‌سازی این استراتژی، ضرایب کنترل‌کننده‌های PI از یک شبکه عصبی استخراج می‌شود که دقت و مقاومت قابل قبول و بهینه این شبکه عصبی در وابستگی بسیار شدید نسبت به ضرایب وزنی شبکه عصبی مذکور می‌باشد. لذا به‌منظور تعیین ضرایب وزنی بهینه در شبکه عصبی مصنوعی موردنظر در استراتژی کنترلی پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با هدف دستیابی به بالاترین دقت یا کمترین خطا برای هر یک از کنترل‌کننده‌های PI استفاده می‌شود. پس از به‌دست‌آمدن ضرایب وزنی بهینه از طریق الگوریتم ژنتیک، این ضرایب به شبکه عصبی داده می‌شود و ضرایب PI از شبکه عصبی استخراج می‌شود. به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی ضرایب K در کنترل‌کننده PID الگوریتم GA اجرا می‌شود.

در رویه مقداردهی اولیه الگوریتم GA، از یک فرایند تصادفی برای تولید کروموزوم استفاده شده است، سپس جهش توسط عملیات‌های محاسباتی برای به‌دست‌آوردن جهش‌یافته‌های جمعیت بردار متغیر تصمیم‌گیری انجام می‌شود. سپس جهش‌یافته‌ها در فرایند Crossover برای تولید بردارهای آزمایش براساس مقادیر تعریف شده توسط کاربر از احتمالات Crossover مورد استفاده قرار می‌گیرد. گزینه‌های نسل بعدی با مقایسه عملکرد محاسبه شده با استفاده از بردارهای آزمایش و بردارهای هدف در نسل کنونی انتخاب می‌شود. این فرایندها تا زمانی تکرار می‌شوند که بهینه‌سازی همگرا شود یا به حداکثر تعداد تکرار برسیم به‌منظور اجرای کنترل‌کننده هوشمند پیشنهادی، مطابق با فلوچارت شکل ۱ عمل می‌شود.

فلوچارت الگوریتم ژنتیک به‌منظور تعیین ضرایب وزنی بهینه شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در استراتژی پیشنهادی به صورت شکل ۱ خواهد بود. در الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده، شبکه عصبی وظیفه تعیین ضرایب بهینه کنترل‌کننده‌های PI موجود در استراتژی کنترلی پیشنهادی را بر عهده دارد و الگوریتم ژنتیک وظیفه تعیین ساختار بهینه برای شبکه عصبی را دارد.



شکل ۱. فلوجارت الگوریتم هوشمند ژنتیک

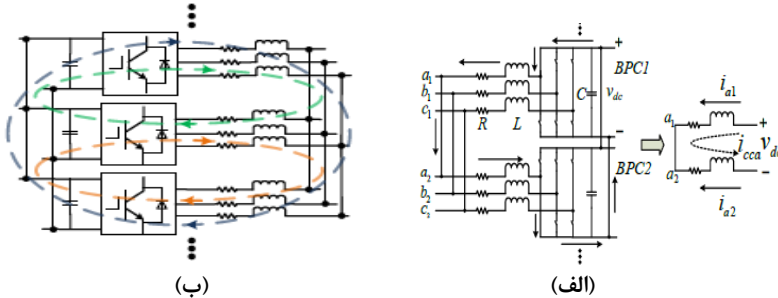


شکل ۲. فلوجارت الگوریتم ترکیبی هوشمند ژنتیک- عصبی به منظور تعیین و تنظیم اتوماتیک ضرایب کنترل کننده PI در استراتژی کنترلی پیشنهادی

به عبارت بهتر باید الگوریتم ژنتیک، ضرایب وزنی بهینه برای شبکه عصبی را تعیین کند. شبکه عصبی مذکور در لایه ورودی دارای دو نرون است که عبارتند از: خطای ردیابی و مشتق خطای ردیابی کنترل کننده‌های PI، و در لایه خروجی، دو نرون دارد که عبارتند از: ضرایب K_p و K_i . همچنین معماری شبکه عصبی پیشنهادی دارای یک لایه مخفی می‌باشد که تعداد نرون‌های لایه مخفی نیز آخرین متغیر تصمیم در ساختار بهینه‌سازی مورد بحث می‌باشد. روش کنترل پیشنهادی برای مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی که نقطه تمرکز اصلی این مقاله است، شامل دو بخش است: حلقه داخلی و حلقه بیرونی. حلقه داخلی به‌طور عمده برای سرکوب جریان گردشی و کنترل ولتاژ DC مبدل‌های قدرت است؛ در حالی که حلقه بیرونی، اغلب برای تحقق بخشیدن به مدیریت توان DC و برای اطمینان از کیفیت توان DC است.

روش کنترل حلقه داخلی

شکل (۳ الف) توپولوژی معمول مبدل‌های قدرت دوطرفه را نشان می‌دهد. ولتاژ ac خروجی (va, vb, vc)، جریان خروجی ac (ia, ib, ic) توسط یک فیلتر القایی فیلتر شده‌اند که اندوکتانس L است و مقاومت پارازیتی R است، سپس مبدل‌های قدرت دوطرفه به این منابع متصل می‌شوند. ولتاژهای AC منابع (vuc, vub, vua) است. خروجی ولتاژ Vdc توسط یک فیلتر خازنی که ظرفیت آن C است فیلتر می‌شود. مسیرهای جریان گردشی در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه در شکل (۳ ب) نشان داده شده است. هنگامی که وضعیت سوئیچینگ مبدل‌های قدرت دوطرفه متفاوت است؛ افت ولتاژ در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه به وجود می‌آید که باعث ایجاد جریان گردشی در طول مسیر می‌شود که در شکل (۳ ب) توسط فلش نشان داده شده است.



شکل ۳. تجزیه و تحلیل جریان گردشی. (الف) مسیرهای جریان گردشی. (ب) مدار معادل یک جفت مبدل قدرت دوطرفه [۱۴].

بر اساس تجزیه و تحلیل فوق، یک محور اضافی صفر معرفی می‌شود که عمدتاً شامل اجزای نامتقارن است. جایی که θ زاویه چرخشی است و برای سرکوب جریان گردشی، مقاومت مجازی Rcc بر روی محور 0 که به طور عمده شامل اجزای نامتقارن است طراحی شده است. با نادیده گرفتن تلفات مسیروسوئیچینگ، مدل سه محور dq-0 می‌تواند به صورت زیر ایجاد شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_d}{dt} = -R.i_d + \omega L.i_q + (V_u - v_d) \\ L \frac{di_q}{dt} = -R.i_q - \omega L.i_d - v_q \\ L \frac{di_o}{dt} = -R.i_o - v_o \\ \frac{1}{2} C \frac{dv_{dc}^2}{dt} = \frac{3}{2} V_u.i_d - P_{dc} \end{array} \right. \quad (3)$$

جایی که Vu دامنه ولتاژ منابع، ω فرکانس زاویه‌ای منابع و Pdc توان خروجی مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی در سمت dc است. از (۳) می‌توان دید که رابطه v_{dc}^2 و id بدون در نظر گرفتن Pdc خطی است. تمامی معادلات حاکم بر این ساختار در [۱۴] نشان داده شده است. همچنین در کنترل توان اکتیو، جریان id و کنترل توان راکتیو، جریان iq می‌تواند به طور کامل جدا می‌شود که می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود بخشد. تمام استراتژی کنترل برای حلقه داخلی در شکل (۴) نشان داده شده است.

به‌دقت به‌وسیله حلقه ولتاژ و برای تفکیک i_d و i_q از طریق جبران‌سازی متناظر بسازد. کنترل‌کننده جریان به‌منظور ایجاد جریان توان راکتیو به‌منظور ردیابی جریان i_{qref} است. به‌منظور سرکوب جریان گردشی، یک کنترل‌کننده مقاومت مجازی RCC در محور 0 برای کاهش اجزای نامتقارن در نظر گرفته می‌شود که بسیار ساده و آسان است.

روش کنترل حلقه خارجی

حلقه بیرونی عمدتاً برای تحقق بخشیدن به مدیریت برق dc و برای اطمینان از کیفیت ولتاژ dc و سپس برای تولید ولتاژ مرجع برای حلقه داخلی است. هنگامی که دروپ $i_{dc}-v_{dc}$ متداول به سیستم حاوی بارهای توان ثابت اعمال می‌شود، چندین نقص وجود دارد. بنابراین، یک راهبرد کنترل دروپ dc بهبودیافته مبتنی بر $P_{dc}-v_{dc}^2-f$ پیشنهاد شده است که می‌تواند عملکرد و پایداری سیستم را وقتی بارهای توان ثابت وجود دارد ارتقا دهد. قانون کنترل می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$v_{dc,k}^{ref^2} = v_{dc}^{*2} - r_k (P_{dc,k} - P_{dc,k}^*) \quad (۴)$$

به‌طوری که k نشان‌دهنده k امین مبدل قدرت دوطرفه است. r_k ، $P_{dc,k}^*$ ، $P_{dc,k}$ و $v_{dc,k}^{ref}$ به‌ترتیب ضرایب دروپ، توان خروجی dc و مقدار مرجع ولتاژ خروجی DC برای حلقه داخلی (نشان داده در شکل ۲) از k امین BPC است. V_{dc}^* ولتاژ باس DC است. یعنی $v_{dc,k} = v_{dc,k}^{ref}$ سپس می‌توان نتیجه گرفت که:

$$P_{dc,k} = v_{dc,k} i_{dc,k} = \frac{(V_{dc}^{*2} + r_k P_{dc,k}^*) - r_k P_{dc,k} - v_{dc,k} v_b}{R_{line,k}} \quad (۵)$$

$$P_{dc,k} = \frac{(V_{dc}^{*2} + r_k P_{dc,k}^*) - v_{dc,k} v_b}{R_{line,k} + r_k} \quad (۶)$$

جایی که v_b ولتاژ باس DC و $R_{line,k}$ مقاومت خط بین k امین مبدل قدرت دوطرفه و باس DC است. اگر $rk \gg R_{line,k}$ و $M = (v_{dc}^{*2} + r_k P_{dc,k}^*)$ قرار دهیم، رابطه (۴) را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{r_k}{v_b} P_{dc,k} - \frac{M}{v_b} = -v_{dc,k} \quad (۷)$$

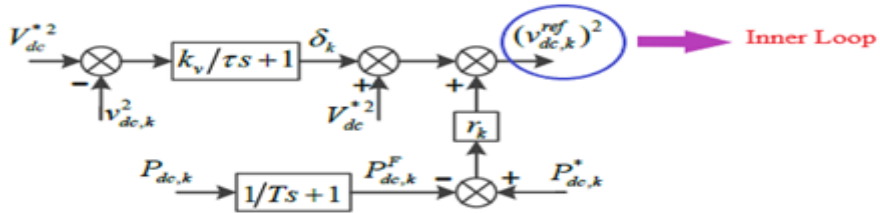
ترکیب معادله (۴) به‌صورت زیر می‌تواند به‌دست آید:

$$\left(\frac{r_k}{v_b}\right)^2 P_{dc,k}^2 - \left(2\frac{M r_k}{v_b^2} - r_k\right) P_{dc,k} + \left(\frac{M}{v_b}\right)^2 - M = 0 \quad (۸)$$

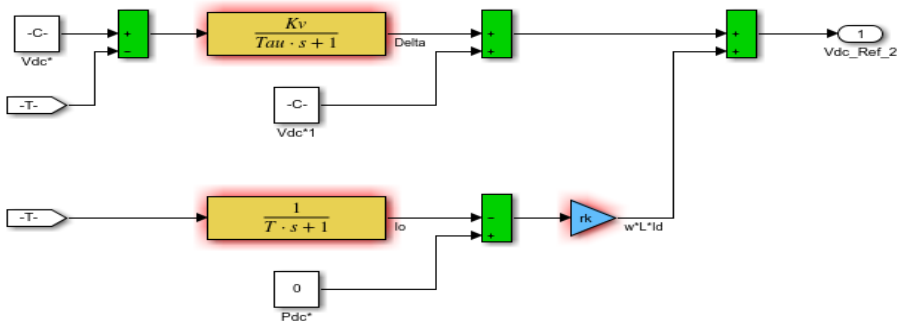
از (۸)، $P_{dc,k}$ می‌تواند به‌صورت زیر حل شود:

$$P_{dc,k} = \frac{M - v_b^2}{r_k} \quad (9)$$

از (۹) می‌توان نتیجه گرفت که اگر $r_k \gg R_{line,k}$ باشد توان خروجی $P_{dc,k}$ به‌طور معکوس متناسب با ضریب دروپ r_k می‌باشد. اما اگر r_k بیش از حد بزرگ باشد، سیستم ناپایدار خواهد بود. از سوی دیگر، از (۴) می‌توان دید که ولتاژ DC جهت افزایش توان خروجی DC کاهش می‌یابد. بنابراین، کیفیت ولتاژ باس dc نمی‌تواند تضمین شود. با توجه به این مشکل، استراتژی بازایی ولتاژ غیرمترکز پیشنهاد شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، مربع ولتاژ DC خروجی از K امین مبدل قدرت دوطرفه $V_{dc,k}^2$ ، برای مقایسه با مقدار تغذیه V_{dc}^{*2} می‌شود، سپس خطا توسط یک عنصر اینرسی جبران می‌شود که می‌تواند باعث کاهش امپدانس سیستم شود و سیستم را پایدارتر کند.



شکل ۶. روش کنترل حلقه بیرونی برای K امین مبدل قدرت دوطرفه



شکل ۷. شبیه‌سازی استراتژی پیشنهادی در حلقه بیرونی

استراتژی بازایی به کنترل‌کنندگان محلی مبدل‌های قدرت دوطرفه اعمال می‌شود؛ بنابراین به دلیل محلی بودن، نرخ بازایی می‌تواند بهبود یابد. روش کنترل حلقه بیرونی در شکل (۶) نشان داده شده است. یک فیلتر پایین‌گذر، توان dc را قبل از اینکه به کنترل‌کننده دروپ dc ارسال شود، فیلتر می‌کند. تمام سیگنال‌ها بازخورد پارامترهای الکتریکی محلی است و برای کنترل مبدل قدرت دوطرفه نیازی به سیگنال‌های دیگر مبدل‌های قدرت نیست. این موضوع علاوه بر سرعت در انجام بازایی ولتاژ، هزینه‌های مربوط به اعمال سیگنال‌های مخابراتی از سایر مبدل‌ها را نیز کاهش می‌دهد؛ از این رو کنترل کلی حلقه بیرونی، غیرمترکز و غیرحساس به تغییر توپولوژی سیستم ریزشبه‌که

است که می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را بهبود دهد. می‌توان با کنترل فرکانس شبکه که اصلاح شده [۱۴] است استراتژی فرکانس نیز به آن اضافه کرد. هنگامی که دینامیک ریزش‌بکه به تعادل نزدیک می‌شود، فرکانس خروجی هر تولیدکننده برابر با مقدار اندازه‌گیری آن است:

$$\Delta f_i = f_i - 50 = \frac{1}{1 + \alpha} [f_{\max} - 50 - \beta(f_{\max} - f_{\min}) \lambda_i(P_i)]. \quad (10)$$

$$d_i = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{S_i}, \quad (11)$$

$$f_i = f_{pri}(P_i) + f_{sec}(\alpha, f_{i, meas}) + f_{ter}(\beta, P_i, \lambda_i(P_i))$$

به‌طوری که

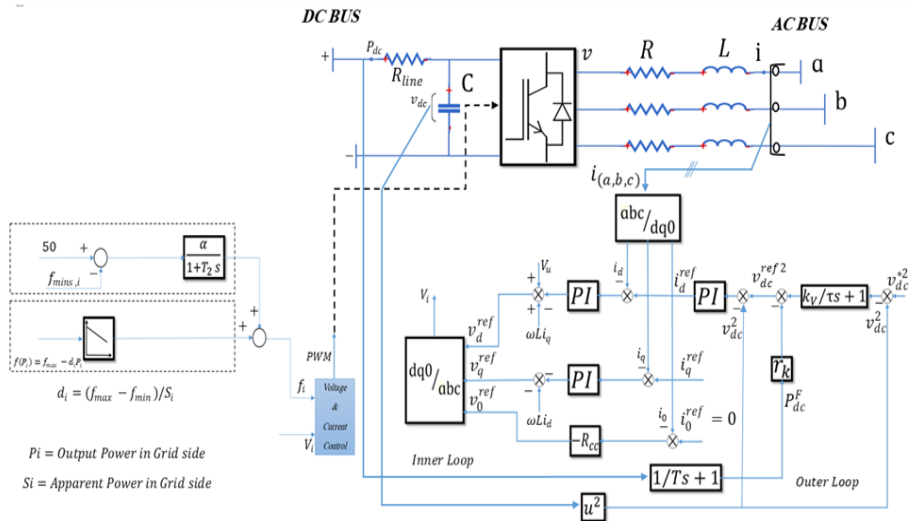
$$f_{pri} = f_{\max} - d_i P_i$$

$$f_{sec} = \frac{\alpha(50 - f_{meas, i})}{1 + T_2 S}$$

$$f_{ter} = (f_{\max} - d_i S_i \beta \lambda_i(P_i) - f_{pri}) / (1 + T_3 S)$$

f_{\max} و f_{\min} محدودیت‌های فرکانس ریزش‌بکه، S_i ظرفیت توان ظاهری، α و β به ترتیب ضریب کنترل ثالثیه توزیع شده و کنترل ثانویه توزیع شده برای همه تولیدکننده‌ها، f_i و $f_{i, meas}$ برتیب فرکانس خروجی و مقدار اندازه‌گیری شده و T_2 و T_3 ثابت‌های زمانی فیلترهای پایین‌گذر هستند، همچنین تابع $\lambda_i(P_i)$ برای هزینه کلی است. روش کنترل کامل، روش ترکیبی شامل روش کنترل حلقه داخلی و روش کنترل حلقه بیرونی، در شکل (۸) نشان داده شده است که می‌تواند اجرای دقیق روش پیشنهادی را نشان دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود سیستم کنترلی پیشنهادی به‌منظور کنترل مبدل DC/AC دوطرفه موجود در ریزش‌بکه مورد مطالعه دارای دو حلقه بیرونی و داخلی می‌باشد.

استراتژی کنترلی پیشنهادی در حلقه داخلی به‌منظور مهار و حذف شارش جریان‌های گردشی و کنترل ولتاژ لینک DC در نظر گرفته شده است و استراتژی کنترلی پیشنهادی در حلقه بیرونی به‌منظور کنترل و مدیریت توان DC تحویلی ریزش‌بکه و بهبود شاخص‌های کیفیت توان DC تعبیه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ساختار کنترلی پیشنهادی، کنترل‌کننده کلاسیک PI وجود دارد که مهم‌ترین مسئله در به‌کارگیری استراتژی پیشنهادی تعیین ضرایب مناسب و کارآمد برای کنترل‌کننده‌های مذکور می‌باشد؛ زیرا یکی از مهم‌ترین معضلات در به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های کلاسیک حساس بودن ضرایب کنترل‌کننده‌ها به شرایط و پارامترهای سیستم می‌باشد.

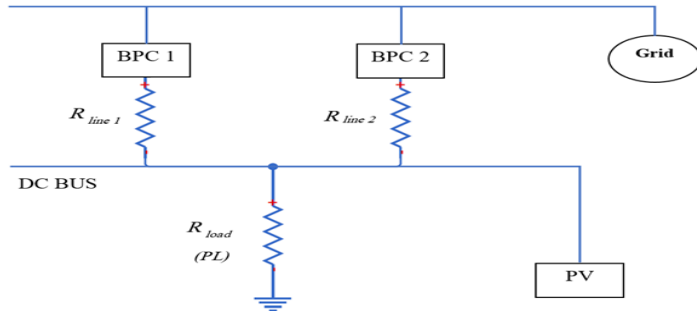


شکل ۸. روش کنترل پیشنهادی Pdc-vdc²-f برای K امین مبدل قدرت [۱۴]

از این رو تضمین دستیابی به اهداف کنترلی تعیین شده برای حلقه داخلی و بیرونی در استراتژی کنترلی پیشنهاد شده تنها در گرو تعیین ضرایب بهینه برای کنترل‌کننده‌های کلاسیک موجود در ساختار فوق‌الذکر می‌باشد. برای این منظور و در راستای دستیابی به اهداف ذکر شده این ضرایب بهینه به‌واسطه بهره‌مندی از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-عصبی تعیین خواهد شد. برای این منظور در ابتدا یک مدل ریاضی برای ساختار نشان داده شده در شکل (۸) استخراج شده و سپس ضرایب بهینه و کارآمد کنترل‌کننده‌های کلاسیک موجود در مدل ریاضی استخراج شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی ژنتیک-عصبی تعیین می‌گردد. در نهایت پس از تعیین ضرایب بهینه، کل ریزشبهه با معماری پیشنهاد شده در شکل (۸) اجرا و با اعمال ضرایب بهینه به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی انجام شده، نتایج نهایی استخراج و ارائه می‌گردد.

شبیه‌سازی سیستم

سیستم مورد مطالعه شامل بار dc و یک DG از نوع (PV) در ریزشبهه dc است. ریزشبهه dc به‌وسیله دو BPC به شبکه متصل شده است.



شکل ۹. سیستم مورد مطالعه ریزشبه DC متصل به شبکه

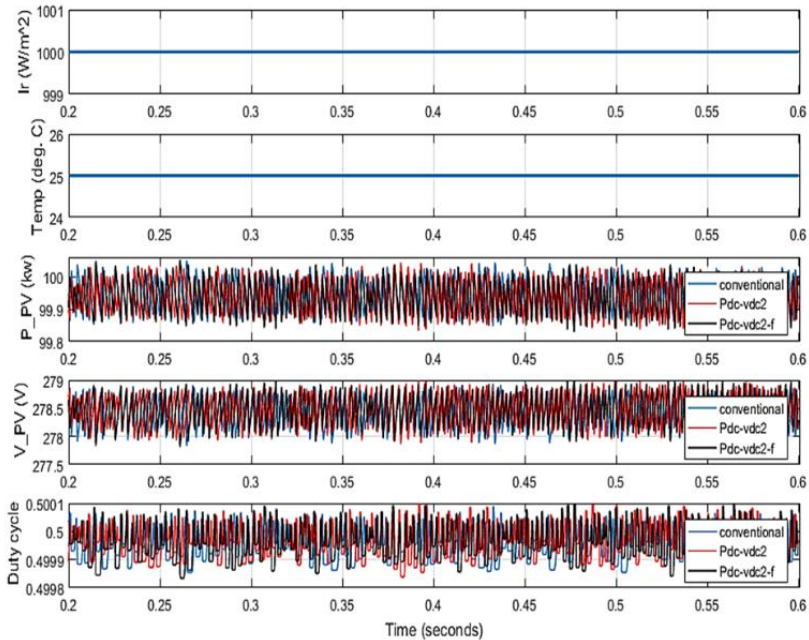
منبع ac دارای ولتاژ 380 ولت موثر و فرکانس 50 هرتز است، ولتاژ باس DC نیز برابر 500 ولت است. مقاومت خط بین BPCها و باس DC برابر $R_{line1} = 2 \text{ m}\Omega$ ، $R_{line2} = 4 \text{ m}\Omega$ است. مقاومت نامی $R_{load} = 3.6 \text{ PL} \Omega$ است و یک تغییر گام بار با مقاومت موازی 6 اهم وجود دارد.

جدول ۱. پارامترهای سیستم مورد مطالعه ریزشبه DC

T	R	R _{line}	C _e	L _e	R _e	پارامتر
زمان تناوب	مقاومت بار DC	مقاومت خط بین باس AC و DC	ظرفیت خازن سمت DC	مقاومت پارازیتی	مقاومت القایی	توصیف
10^{-2}	$\frac{0.7}{3}$	$\frac{12 \times 10^{-3}}{11}$	$\frac{5 \times 10^{-3}}{3}$	$\frac{1.5 \times 10^{-3}}{3}$	$\frac{10^{-3}}{3}$	مقدار
τ	K_V	K_{III}	K_{PII}	K_{PIV}	K_{PIV}	پارامتر
ثابت زمانی	پارامتر کنترل کننده در حلقه بیرونی	پارامترهای کنترل کننده در حلقه داخلی (توان راکتیو)	پارامترهای کنترل کننده در حلقه داخلی (توان راکتیو)	پارامترهای کنترل کننده در حلقه داخلی (توان اکتیو)	پارامترهای کنترل کننده در حلقه داخلی (توان اکتیو)	توصیف
2×10^{-2}	1.5	150	1	2×10^{-2}	2×10^{-4}	مقدار

PV در ریزشبه در حالت MPPT عمل می کند و توان خروجی آن در تابش 1000 وات بر مترمربع 100 کیلووات است. فیلترهای القایی در سمت ac و فیلترهای خازنی در سمت DC در دو BPC مشابه هستند، در حالی که مقاومت القایی و مقاومت پارازیتی به ترتیب 1.5 میلی هانری و 1 میلی هانری است و خازنهای سمت DC برابر 5 میلی فاراد است. زمان شبیه سازی برابر با 0.6 ثانیه و میزان تابش خورشیدی 1000 وات بر مترمربع و میزان حرارت 25 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است، در این حالت بار اهمی برابر با 3.6 اهم در سمت DC در نظر گرفته شده است. پارامترهای دیگر به شرح جدول (۱) است.

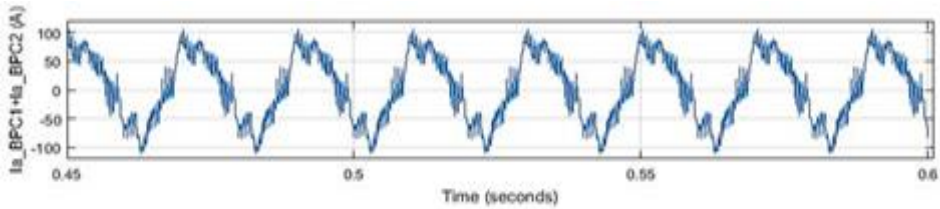
نتایج برای سه سیستم کنترلی متداول، $Pdc-vdc^2$ و $Pdc-vdc2-f$ با بهینه سازی ضرایب PI ارائه شده است.



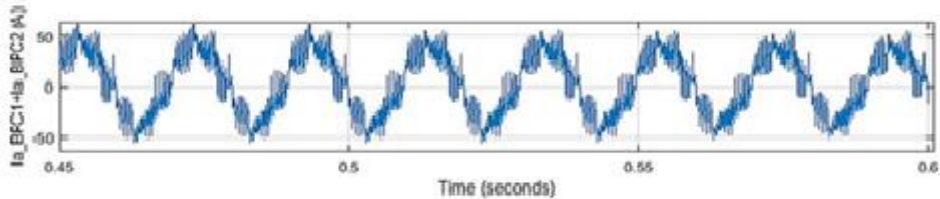
شکل ۱۰. از بالا به پایین میزان تابش، درجه حرارت، توان سیستم فتوولتائیک، ولتاژ سیستم فتوولتائیک و چرخه وظیفه

در شکل (۱۰) میزان تابش، درجه حرارت، توان سیستم فتوولتائیک، ولتاژ سیستم فتوولتائیک و سیکل وظیفه نشان داده شده است. نمودارهای فوق به‌عنوان ورودی‌های سیستم مورد مطالعه هستند که طبق سناریو از 0.2 تا 0.6 ثانیه ارزیابی شده است.

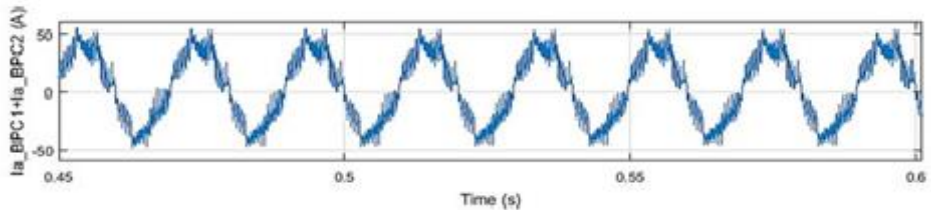
با توجه به اینکه در تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و در حالت MPPT، سیستم در حال کار است، توان خروجی سیستم فتوولتائیک حداکثر مقدار خروجی را براساس شکل ۱۰ ارائه می‌دهد و همچنین ولتاژ مؤثر خروجی هر فاز نیز در حالت MPPT می‌باشد. در شکل (۱۱) جریان AC در فاز a برای مجموع دو BPC را نشان می‌دهد.



الف



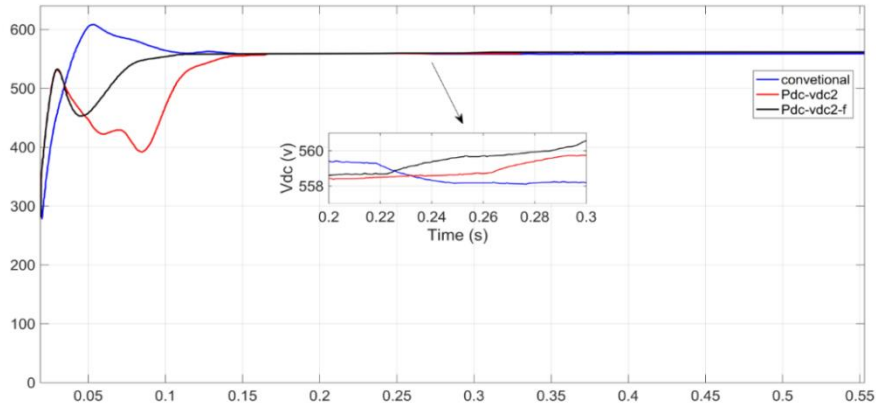
ب



ج

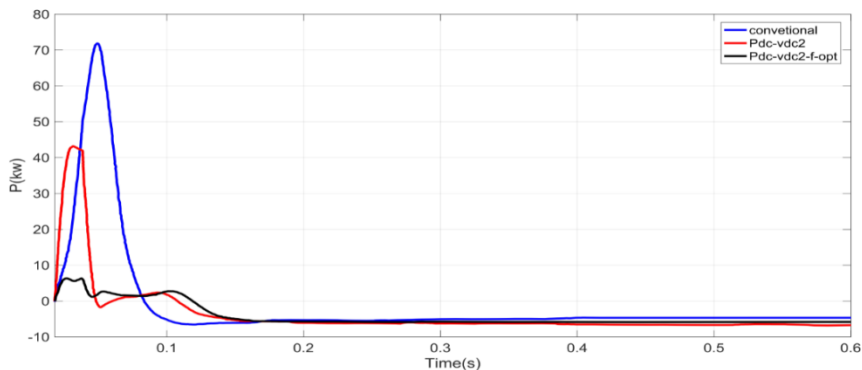
شکل ۱۱. جریان‌های AC در فاز a از BPCها (الف) با استفاده از کنترل حالت متداول (ب) استفاده از کنترل Pdc-vdc2 (ج) استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

شکل (۱۱-الف) مجموع تغییرات جریان الکتریکی دو BPC با استفاده از کنترل حالت متداول، (۱۱-ب) با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 و (۱۱-ج) با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI نشان داده شده است. جریان AC دو BPC نوسان دارند و اجزای نامتقارن زیادی وجود دارد. این بدان معنی است که اگر تنها از کنترل axes d-q استفاده شود؛ جریان گردشی در میان BPC ها وجود دارد (حالت متداول). از نتایج می‌توان دید که جریان AC از دو BPC با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 و با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI هر دو صاف و نرمال است. بنابراین، جریان گردشی را می‌توان با کنترل پیشنهادی بیشتر کاهش داد و اثرات سرکوب جریان گردشی به‌صورت واضح مشخص است. کاهش جریان گردشی با لحاظ کردن مدل دقیقی از پارامترهای مهم سمت شبکه و ریزشبهه و لحاظ کردن Igrid0 حاصل شده است. در تحقیقات پیشین، محور صفر از دروپ‌های پیشنهادی لحاظ نمی‌شده ولی در این کار این مدل‌سازی دقیق انجام شده است. شکل (۱۲) مقایسه ولتاژ DC را در حالت‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. ولتاژ DC با استفاده از کنترل حالت متداول، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

مطابق شکل (۱۲) زمان نشست منحنی در دروپ متداول 0.138 ثانیه و در دروپ Pdc-vdc2 0.15 ثانیه و در دروپ پیشنهادی این مقاله 0.11 ثانیه می‌باشد که بهبود 26 درصدی و 37 درصدی را نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد. با کنترل کننده متداول، ولتاژ DC از پیک بیشتری برخوردار است و overshoot آن تا 610 ولت می‌باشد که ممکن است باعث آسیب زدن به مبدل‌ها و سویچ‌ها شود. این افزایش ولتاژ حدود 10 درصد بیشتر از دروپ پیشنهادی می‌باشد. Undershoot مربوط به روش پیشنهادی نسبت به دروپ Pdc-vdc2 حدود 13 درصد دامنه کمتری دارد. پس از زمان نشست منحنی نیز، ولتاژ در دو روش دیگر دارای نوساناتی در محدوده 557 تا 560 ولت می‌باشند ولی استفاده از روش پیشنهادی این مقاله باعث پایدار ماندن ولتاژ روی 560 ولت می‌شود و به شکل مناسب‌تر و بهتری ولتاژ لینک DC را دنبال کند. همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است توان سمت شبکه AC با استفاده از کنترل حالت متداول، از دامنه نوسان بیشتری برخوردار است در حالی که با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 دامنه نوسان، کمتر می‌شود و با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f و هم‌زمان بهینه‌سازی ضرایب PI، نوسانات بهبودی بیشتری دارند.



شکل ۱۳. توان سمت شبکه AC با استفاده از کنترل حالت متداول، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

توان مصرفی حالت سویچینگ با استفاده از روش پیشنهادی Pdc-vdc2-f نسبت به حالت متداول حدود 12 برابر توان کمتری مصرف می‌کنند. همچنین روش پیشنهادی نسبت به روش Pdc-vdc2 حدود 7 برابر توان کمتری را مصرف می‌کند. همچنین بهینه‌سازی ضرایب PI با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی باعث بهبود دقت و سرعت تعیین ضرایب شده است، این برتری مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل دیگر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای سه روش

	دروپ idc-vdc	دروپ Pdc-vdc ²	دروپ Pdc-vdc ² -f
Tr (sec)	0.025	0.015	0.015
Ts (sec)	0.138	0.15	0.11
Mp (%)	9.85%	0	0
توان مصرفی هنگام سویچینگ	72 kw	43 kw	6 kw

طبق اطلاعات مندرج در جدول (۲) زمان صعود یا (Rise Time) در دروپ پیشنهادی 0.015 ثانیه می‌باشد که نسبت به حالت متداول 66 درصد بهبود یافته است. همچنین زمان نشست با استفاده از حالت پیشنهادی 0.11 ثانیه است که نسبت به حالت متداول، بهبودی 25 درصد را نشان می‌دهد. در پارامتر فراجش^۱ نیز بهبودی 9.85 درصد به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل غیرمتمرکز برای هماهنگی مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبه DC متصل به شبکه با رویکرد انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه و افزایش پایداری سیستم با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک-عصبی ارائه شد. ابتدا استراتژی کنترل سه محوری d-q-0 به جای راهبرد کنترل دو محور متعارف d-q طراحی و استفاده شد تا سرکوب جریان گردشی در سمت AC تولید شده توسط BPC‌های موازی چندگانه انجام شود؛ به طوری که در شکل‌های تا مشاهده می‌شود اعوجاج و نوسانات ناشی از جریان گردشی در مبدل‌ها تا حدود بسیار زیادی از بین رفته و هدف سرکوب جریان گردشی میان مبدل‌ها محقق شده است. در عین حال از مربع ولتاژ (vdc²) به جای ولتاژ dc خودکنترل استفاده شد که توانست کنترل ولتاژ را بهبود بخشد و عملکرد تنظیم ولتاژ dc را افزایش دهد؛ به طوری که زمان نشست منحنی ولتاژ، نسبت به دروپ متداول را تا 37 درصد و نسبت به دروپ Pdc-vdc2 را 26 درصد بهبود ببخشد. دوم، با در نظر گرفتن توان بار ثابت، استراتژی مدیریت توان غیرمتمرکز با استفاده از دروپ بهینه شده Pdc-vdc²-f با الگوریتم ژنتیک-عصبی برای به اشتراک‌گذاری بهتر توان DC طراحی شد که باعث شد توان مصرفی هنگام سویچینگ در مقایسه با دروپ متداول حدود 14 برابر و در مقایسه با دروپ Pdc-vdc2 حدود 9 برابر توان کمتری را مصرف کند. در مقایسه با دروپ idc-vdc متداول، استراتژی پیشنهادی توانست به کنترل توان dc کمک کند و پایداری سیستم را ارتقا دهد و سبب بهبود ولتاژ لینک dc شود.

¹ Overshoot

References

- [1] Alipour, M. (2017). Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 95-121 .
- [2] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 33-55 .
- [3] Nasirian, V., Davoudi, A., Lewis, F. L., & Guerrero, J. M. (2014). Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4), 944-956. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2350458>
- [4] Nasirian, V., Moayedi, S., Davoudi, A., & Lewis, F. L. (2015). Distributed Cooperative Control of DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4), 2288-2303. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2324579>
- [5] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., Vicuna, L. G. d., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- [6] Wang, P., Lu, X., Yang, X., Wang, W., & Xu, D. (2016). An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids With Enhanced Dynamic Current Sharing Performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(9), 6658-6673. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2499310>
- [7] Wu, W., Wang, H., Liu, Y., Huang, M., & Blaabjerg, F. (2017). A Dual-Buck-Boost AC/DC Converter for DC Nanogrid With Three Terminal Outputs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 295-299. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2598804>
- [8] Bao, X., Zhuo, F., Tian, Y., & Tan, P. (2013). Simplified Feedback Linearization Control of Three-Phase Photovoltaic Inverter With an LCL Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6), 2739-2752. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2225076>
- [9] Tzann-Shin, L. (2003). Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(1), 11-22. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.807145>
- [10] Tani, A., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2015). Energy Management in the Decentralized Generation Systems Based on Renewable Energy—Ultracapacitors and Battery to Compensate the Wind/Load Power Fluctuations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1817-1827. <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2354737>
- [11] Xia, Y.-h., Peng, Y., Huiyong, H., Wang, Y., & Wei, W. (2016). Advanced unified decentralised control method with voltage restoration for DC microgrids. *Iet Renewable Power Generation*, 10(6), 861-871. <https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2015.0433>
- [12] Yang, P., Xia, Y., Yu, M., Wei, W., & Peng, Y. (2018). A Decentralized Coordination Control Method for Parallel Bidirectional Power Converters in a Hybrid AC-DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6217-6228. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2786200>
- [13] Sun, K., Wang, X., Li, Y. W., Nejabatkhah, F., Mei, Y., & Lu, X. (2017). Parallel Operation of Bidirectional Interfacing Converters in a Hybrid AC/DC Microgrid

- Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(3), 1872-1884. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2555140>
- [14] Xia, Y., Wei, W., Peng, Y., Yang, P., & Yu, M. (2018). Decentralized Coordination Control for Parallel Bidirectional Power Converters in a Grid-Connected DC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6850-6861. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2725987>
- [15] Nayanar, V., Kumaresan, N., & Gounden, N. A. (2016). A Single-Sensor-Based MPPT Controller for Wind-Driven Induction Generators Supplying DC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1161-1172. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2420568>
- [16] Xin, H., Zhang, L., Wang, Z., Gan, D., & Wong, K. P. (2015). Control of Island AC Microgrids Using a Fully Distributed Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 943-945. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2378694>
- [17] Rahman, M. A., Uddin, M. N., & Abido, M. (2006). An Artificial Neural Network for Online Tuning of Genetic Algorithm Based PI Controller for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor-Drive. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 31(3), 154-165. <https://doi.org/10.1109/CJECE.2006.259211>
- [18] Chlahawi, A. A. (2020). Genetic algorithm error criteria as applied to PID controller DC-DC buck converter parameters: an investigation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/671/1/012032>
- [19] Husna, A., Roslan, M., & Mat, M. (2019). Droop control technique for equal power sharing in islanded microgrid. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(1), 530. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i1.pp530-537>