

Compensation of Voltage and Current Imbalance in Bipolar DC Microgrids Using a Three-leg DC Electric Spring

Ali Fazlabadi, Hossein Hojabri*

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
E-mails: Alif@eng.uk.ac.ir; hhojabri@uk.ac.ir

Abstract

Bipolar DC microgrids with asymmetric loading face the problems of voltage and current imbalance in two poles, which can increase the voltage deviation in microgrid buses and power losses due to the presence of current in the neutral wire. One of the suggested methods to solve the problem of voltage and current imbalance in bipolar microgrids is to use two separate DC electric springs as two controlled smart loads in positive and negative poles. This structure requires a large number of active switches, two separate battery or storage units in the DC link of these two DC electric springs, and a complex control structure. In this paper, a unified three-leg DC electric spring is proposed to compensate voltage and current imbalance in bipolar DC microgrids. Compared with two separate DC electric springs, the proposed structure has less number of active switches and due to its common DC link, only one storage set is used in its structure. The effectiveness of the proposed structure in compensating voltage and current imbalance is confirmed through simulation in the MATLAB/SIMULINK environment.

Keywords

Bipolar DC microgrid, unified three-leg DC electric spring, smart load, voltage imbalance compensation, current imbalance compensation.

Introduction

One of the challenging problems in bipolar DC microgrids is the load imbalance between positive and negative poles. The load and current imbalance in these microgrids creates current in the neutral wire and increases the system losses. Besides, load imbalance leads to the microgrid positive and negative poles voltage imbalance. The proposed methods to solve this problem are divided into two categories: generation side and demand side methods. In the generation side methods, by controlling the injected power to the positive and negative poles using single pole DGs or voltage balancers, the voltages of two positive and negative poles are controlled and balanced. In these methods, it is not possible to remove the neutral current and improve the system efficiency. In the demand side methods, by rearranging the loads between positive and negative poles using load switchers or changing the power of controlled or smart loads such as DC electric springs, the currents and voltages of two positive and negative poles are controlled and balanced. In previous works, two separate DC electric springs were proposed to compensate voltage and current imbalance in bipolar DC microgrids. This structure requires a large number of active switches, two independent storage units in the DC link of these two DC electric springs, and a complicated control structure.

Proposed Work and Methodology

In this paper, a unified three-leg DC electric spring is proposed to regulate and balance the bus voltage and compensate the neutral wire current in bipolar DC microgrids. In the proposed structure, a three-leg voltage source converter is used as a unified three-leg DC electric spring, where the middle leg of the converter is directly connected to the neutral wire of the bipolar DC microgrid and the other two legs are in series with two non-critical loads and are connected to the positive and negative poles of the microgrid. Compared with two separate DC electric springs, the proposed structure has less number of active switches, and due to its common DC link, a single storage unit is required in its DC link. The performance of the proposed structure is proved through simulation and it is shown that by using the proposed unified three-leg DC electric spring, the voltage and current imbalance in a bipolar DC microgrid can be well compensated, while due to its lower number of power electronic switches and storage units, compared with two separate DC springs, the cost of the compensation is significantly reduced.

Conclusion

In this paper, a unified three-leg DC electric spring is proposed for bipolar DC microgrids. The proposed structure can compensate an unbalanced bipolar DC microgrid by controlling the power consumption of two series non-critical loads connected to the positive and negative poles. It can also balance the voltages of two poles of microgrid and critical loads and eliminate the neutral wire current and loss. This structure reduces the cost of compensation in a bipolar DC microgrid due to the reduced number of active switches and storage units compared with two separate DC electric springs.

جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه‌های DC دوقطبی با استفاده از فنر الکتریکی DC سه‌ساق

علی فضل‌آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

حسین هژبری هوتکی

دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

ریزشبه‌های DC دوقطبی با بارگذاری نامتقارن با مشکلات عدم تعادل ولتاژ و جریان در دو قطب مواجه هستند که می‌تواند انحراف ولتاژ در باس‌های ریزشبه و تلفات توان را، به دلیل وجود جریان در سیم نول، افزایش دهند. یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای رفع مشکل عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه‌های دوقطبی، استفاده از دو فنر الکتریکی DC مجزا به عنوان دو بار هوشمند و کنترل‌شده در دو قطب مثبت و منفی است. این ساختار نیازمند استفاده از تعداد کلید الکترونیک قدرت زیاد، دو عدد باتری یا ذخیره‌ساز مجزا در لینک DC دو فنر و ساختار کنترلی پیچیده است. در این مقاله، یک فنر الکتریکی DC سه‌ساق یکپارچه برای جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه‌های DC دوقطبی پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی در مقایسه با دو فنر الکتریکی مجزا از تعداد کلید کمتری برخوردار بوده و به دلیل داشتن یک لینک DC مشترک تنها از یک مجموعه ذخیره‌ساز در ساختار آن استفاده شده است. کارایی ساختار پیشنهادی در جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان از طریق شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK تایید شده است.

کلمات کلیدی

ریزشبه DC دوقطبی، فنر الکتریکی DC سه‌ساق، بار هوشمند، جبران عدم تعادل ولتاژ، جبران عدم تعادل جریان.

نام نویسنده مسئول: حسین هژبری هوتکی

ایمیل نویسنده مسئول: hhojabri@uk.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

۱- مقدمه

امروزه با گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای الکترونیکی که انرژی الکتریکی را ذاتاً به صورت DC تولید و یا مصرف می‌کنند، علاقه به استفاده از ریزشبه‌های DC افزایش یافته است [۱]. استفاده از ریزشبه‌های DC برای تولید و مصرف انرژی به شکل DC، کاهش استفاده از مبدل‌های DC/AC و در نتیجه سهولت پیاده‌سازی و کنترل، کاهش تلفات و افزایش راندمان و قابلیت اطمینان سیستم را به همراه دارد [۲]. علاوه بر این ریزشبه‌های DC به دلیل عدم وجود توان راکتیو، فاز و فرکانس از کنترل ساده‌تری در مقایسه با ریزشبه‌های AC برخوردارند [۳-۵].

ریزشبه‌های DC به دو دسته تک‌قطبی و دوقطبی تقسیم می‌شوند [۶]. ریزشبه تک‌قطبی از دو باس مثبت و منفی تشکیل شده است و انرژی تنها در یک سطح ولتاژ V_{dc} توزیع می‌شود [۷]. در حالی که پیکربندی دوقطبی از سه باس مثبت، منفی و صفر تشکیل شده و انرژی از طریق سه سطح ولتاژ V_{dc} ، $-V_{dc}$ و $2V_{dc}$ در شبکه توزیع می‌شود. اگرچه ریزشبه‌های تک‌قطبی از ساختار ساده‌تری نسبت به ریزشبه‌های دوقطبی برخوردارند اما بروز خطا در این ریزشبه می‌تواند منجر به خاموشی کل سیستم شود [۸]. در حالی که در ریزشبه‌های دوقطبی، در صورت بروز خطا در یکی از قطب‌ها همچنان امکان تغذیه مشتریان از طریق قطب دیگر وجود دارد [۹].

یکی از مشکلات مهم در ریزشبه‌های دوقطبی عدم تعادل بار بین دو قطب مثبت و منفی است. عدم تعادل جریان در این ریزشبه‌ها، علاوه بر ایجاد جریان در سیم نول، موجب افزایش تلفات سیستم و نامتعادل شدن ولتاژ دو قطب مثبت و منفی می‌شود. روش‌های پیشنهاد شده برای رفع عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه‌های دوقطبی به دو دسته روش‌های سمت تولید و سمت مصرف تقسیم می‌شوند [۱۰-۱۱].

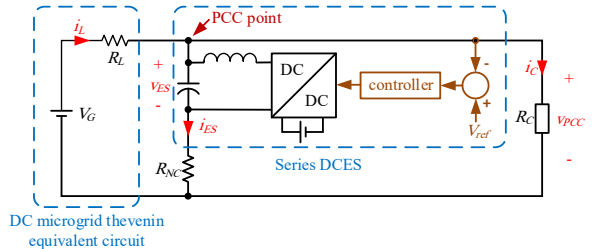
در روش‌های سمت تولید با استفاده از یک مبدل الکترونیک قدرت به نام متعادل‌کننده ولتاژ و کنترل ولتاژ و توان تزریقی به دو قطب مثبت و منفی، ولتاژ دو قطب مثبت و منفی را کنترل و متعادل می‌نمایند. در این دسته از روش‌ها در صورتی که عدم تعادل بار و جریان عامل عدم تعادل ولتاژ باشد، امکان حذف جریان سیم نول و افزایش راندمان سیستم وجود ندارد [۱۲]. علاوه بر این تغییر میزان توان تزریقی منبع برای کنترل ولتاژ، موجب فاصله گرفتن منابع تجدیدپذیر از نقطه حداکثر توان می‌شود [۱۳].

در روش‌های سمت مصرف، با جابجایی بارهای متصل بین دو قطب مثبت و منفی توسط یک سویچ‌کننده بار و یا تغییر توان بارهای کنترل‌شده یا هوشمند مثل فنرهای الکتریکی DC به کنترل جریان دو قطب و متعادل‌سازی جریان و در نتیجه ولتاژ دو قطب مثبت و منفی می‌پردازند [۱۴].

یک فنر الکتریکی DC^۱ (DCES) یک بار هوشمند و کنترل‌شده متشکل

^۱ DC electric spring

شده است، یک فنر DC سری از یک ذخیره ساز انرژی تشکیل شده که به واسطه یک مبدل الکترونیک قدرت، یک منبع ولتاژ قابل کنترل را تشکیل می دهد که به صورت سری با یک بار غیربحرانی قرار دارد. مجموعه ذخیره ساز، مبدل و بار غیربحرانی یک بار هوشمند و قابل کنترل را تشکیل می دهد که از آن برای مقاصد مختلفی همچون بهبود کیفیت ولتاژ [۱۷] و توان [۲۰]، پایداری و قابلیت اطمینان ریزشبه [۱۹] استفاده می شود.



شکل ۱- شمای ساده فنر الکتریکی DC سری

با توجه به شکل ۱ رابطه ولتاژ و توان فنر را می توان به صورت زیر بیان کرد [۱۷]:

$$v_{ES} = v_{PCC} - R_{NC} i_{ES} \quad (1)$$

$$p_{ES} = v_{PCC} i_{ES} - R_{NC} i_{ES}^2 \quad (2)$$

در روابط بالا v_{ES} ، i_{ES} ، p_{ES} به ترتیب ولتاژ، جریان و توان فنر الکتریکی DC، v_{PCC} ولتاژ نقطه اتصال بار بحرانی و ریزشبه DC و R_{NC} نیز نشان دهنده مقدار مقاومت بار غیربحرانی است. با توجه به روابط بالا همانطور که در جدول ۱ و شکل ۲ نیز نشان داده شده، یک فنر الکتریکی DC سری دارای سه حالت عملکردی می باشد، که عبارتند از:

- **حالت افزایشده - دشارژ (BD):** در این حالت ولتاژ فنر به نحوی کنترل می شود که مثبت و از ولتاژ شبکه و نقطه اتصال بزرگتر باشد. در این صورت فنر و در نتیجه ذخیره ساز به شبکه جریان و انرژی تزریق نموده و ذخیره ساز دشارژ می شود. از این حالت برای افزایش ولتاژ شبکه و نقطه اتصال استفاده می شود.
- **حالت افزایشده - شارژ (BC):** در این حالت ولتاژ فنر به نحوی کنترل می شود که مثبت و از ولتاژ شبکه و نقطه اتصال کمتر باشد. در این صورت جریان فنر مثبت و ذخیره ساز شارژ می شود. از این حالت برای کاهش دادن جریان بار غیربحرانی و فنر از جریان نامی به منظور افزایش ولتاژ شبکه یا نقطه اتصال استفاده می شود.
- **حالت کاهشده - دشارژ (SD):** در این حالت فنر به نحوی کنترل می شود که جریان بار غیربحرانی و فنر از جریان نامی بیشتر شده تا موجب افت ولتاژ در ولتاژ نقطه اتصال یا شبکه شود. برای این منظور مبدل به نحوی کنترل می شود که ولتاژ فنر منفی شود. در این صورت با توجه مخالف بودن پلاریته ولتاژ و جریان فنر، ذخیره ساز دشارژ شده و هم شبکه و هم ذخیره ساز به صورت مشترک توان بار غیربحرانی را تأمین می نمایند.

جدول ۱- حالت های عملکرد فنر الکتریکی DC سری

حالت عملکرد	ولتاژ فنر	جریان فنر
افزاینده - دشارژ (BD)	$V_{PCC-ref} < v_{ES}$	$-I_{OC} < i_{ES} < 0$
افزاینده - شارژ (BC)	$0 < v_{ES} < V_{PCC-ref}$	$0 < i_{ES} < I_{ES-nom}$
کاهنده - دشارژ (SD)	$v_{ES} < 0$	$I_{ES-nom} < i_{ES} < I_{OC}$

از یک ذخیره ساز، مبدل الکترونیک قدرت و یک بار غیربحرانی است که در دو نوع سری و موازی ساخته می شود. به بیان ساده در جبران سازهای DC از یک مبدل یا جبران ساز مستقل برای جبران بار یا شبکه استفاده می شود در حالی که در فنرهای الکتریکی DC برای کاهش توان و در نتیجه هزینه مبدل، با استفاده از یک بار غیربحرانی به صورت سری و یا موازی با فنر و با تغییر و کنترل توان مصرفی بار غیربحرانی فرآیند جبران سازی انجام می شود، بدین ترتیب ظرفیت فنر در مقایسه با سایر جبران سازهای DC به میزان قابل توجهی کاهش می یابد [۱۴].

در [۱۵-۱۶] استفاده از دو فنر الکتریکی مجزا با کنترل هماهنگ برای جبران عدم تعادل جریان در یک ریزشبه دوقطبی پیشنهاد شده است. از مهم ترین معایب این روش علاوه بر تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت زیاد، نیاز به دو مجموعه ذخیره ساز مجزا برای لینک DC هر فنر الکتریکی است.

در این مقاله یک فنر الکتریکی DC سری سه ساق یکپارچه برای استفاده در ریزشبه های DC دوقطبی پیشنهاد شده که از یک مبدل الکترونیک قدرت سه ساق تشکیل شده است که به صورت سری با دو بار غیربحرانی متصل بین قطب های مثبت، منفی و صفر قرار دارد. ساختار پیشنهادی در مقایسه با دو فنر مجزا از تعداد کلید الکترونیک قدرت کمتری برخوردار بوده و تنها از یک مجموعه ذخیره ساز در لینک DC مشترک آن استفاده شده است در نتیجه هزینه جبران سازی کاهش چشمگیری خواهد داشت. فنر الکتریکی سه ساق یکپارچه پیشنهادی تمام قابلیت های دو فنر الکتریکی DC مجزا را داشته و علاوه بر تأمین توان بارهای غیربحرانی، امکان جبران عدم تعادل بار ریزشبه DC دوقطبی را نیز دارد.

برای این منظور این مقاله در بخش های زیر تنظیم شده است: در بخش دوم ساختار و مدهای کاری فنر الکتریکی DC سری بررسی شده است. در این بخش همچنین نحوه استفاده از دو فنر الکتریکی مجزا برای جبران عدم تعادل بار در ریزشبه دوقطبی شرح داده شده است. در بخش سوم ساختار فنر DC یکپارچه سه ساقی پیشنهادی با تعداد کلید الکترونیک قدرت کمتر و لینک DC مشترک به همراه روش کنترل و مدولاسیون آن ارائه شده و امکان جبران عدم تعادل جریان بار و ولتاژ توسط این فنر پیشنهادی در ریزشبه های DC دوقطبی بررسی شده است. کارایی ساختار پیشنهادی از طریق شبیه سازی در بخش چهارم تأیید شده است.

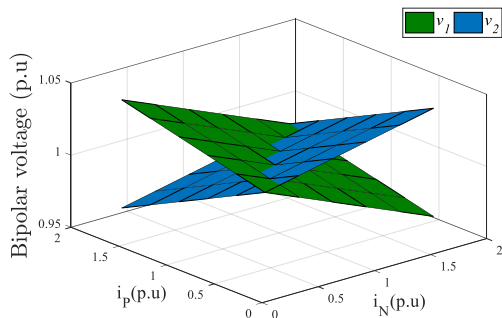
۲- جبران عدم تعادل بار با استفاده از فنر الکتریکی DC

یک فنر الکتریکی DC، یک بار هوشمند و کنترل شده متشکل از یک ذخیره ساز، مبدل الکترونیک قدرت و یک بار غیربحرانی مانند گرمکن حرارتی است که در دو نوع سری و موازی ساخته شده و برای مدیریت مستقیم توان در سمت تقاضا بکار می رود [۱۴]. استفاده از از فنرهای الکتریکی DC برای کنترل و تثبیت ولتاژ باس DC [۱۷]، بهبود کیفیت توان [۱۸]، بهبود پایداری [۱۹] و کاهش تلفات [۲۰] در ریزشبه های DC پیشنهاد شده است.

در فنر الکتریکی سری برای کاهش ظرفیت ذخیره ساز مورد نیاز، از یک بار غیربحرانی به صورت سری با فنر الکتریکی استفاده می شود. در نتیجه فنر الکتریکی سری برای تنظیم ولتاژ باس، علاوه بر استفاده از ظرفیت ذخیره ساز، توان بار غیر بحرانی را نیز می تواند تغییر دهد. بنابراین فنر الکتریکی سری در مقایسه با فنر موازی از ظرفیت ذخیره ساز و هزینه کمتری برخوردار بوده و کاربرد بیشتری دارد [۲۱].

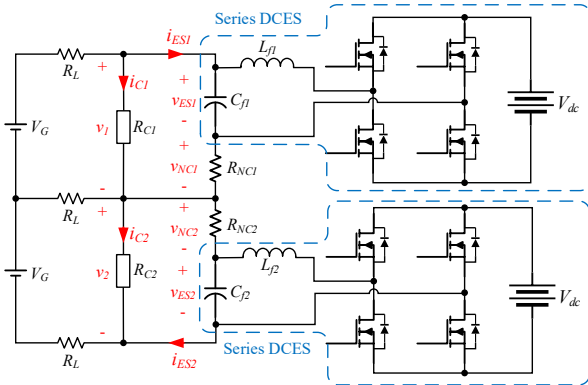
۲-۱- ساختار و عملکرد فنر الکتریکی DC سری

شکل ۱ ساختار یک فنر DC سری به همراه نحوه اتصال آن در یک ریزشبه DC تک قطبی را نمایش می دهد. همانطور که در این شکل نشان داده



شکل ۴- رابطه بین ولتاژ و جریان قطب‌های مثبت و منفی در ریزشبه DC دوقطبی

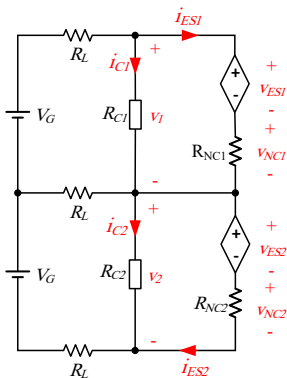
یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای بهبود عدم تعادل جریان و ولتاژ در ریزشبه‌های DC دوقطبی مطابق شکل ۵ استفاده از دو فنر الکتریکی DC مجزا بین دو قطب مثبت و منفی به عنوان دو بار هوشمند و کنترل شده متصل بین این دو قطب است. این دو فنر الکتریکی با کنترل توان بار غیربحرانی، توان تزریقی و یا جذب‌شده به دو قطب ریزشبه را در راستای بهبود عدم تعادل جریان و ولتاژ تغییر می‌دهند [۱۵-۱۶].



شکل ۵- توپولوژی دو فنر DC سری در ریزشبه DC دوقطبی برای جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان [۱۵]

در این شکل R_{C1} و R_{C2} مقاومت معادل بار بحرانی متصل بین دو قطب مثبت و منفی و R_{NC1} و R_{NC2} بار غیربحرانی سری با دو فنر الکتریکی DC متصل بین این دو قطب را نمایش می‌دهد. همچنین ولتاژ فنرهای قطب مثبت و منفی را نشان می‌دهد که به ولتاژ لینک DC محدود بوده و به صورت رابطه $|v_{ES1,2}| \leq V_{dc}$ بیان می‌شود.

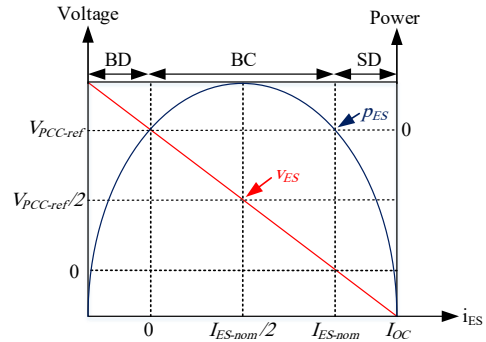
در صورتی که دو فنر الکتریکی DC به عنوان دو منبع ولتاژ کنترل شده در نظر گرفته شوند، مدار معادل ساده شده این ساختار به صورت ارائه شده در شکل ۶ ساده می‌شود.



شکل ۶- مدار معادل فنر DC سری در ریزشبه DC دوقطبی [۱۵]

I_{OC} حداکثر جریان مجاز فنر و I_{ES-nom} جریان نامی فنر الکتریکی DC

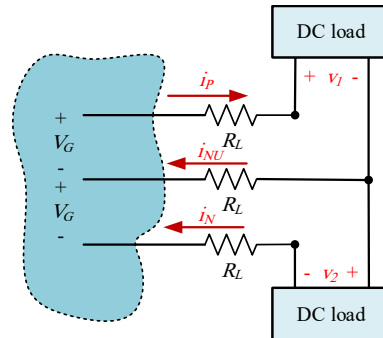
می‌باشد.



شکل ۷- منحنی ولتاژ و توان فنر DC سری در نواحی عملکرد مختلف [۱۷]

۲-۲- جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه DC دوقطبی با استفاده از دو فنر الکتریکی DC مجزا در دو قطب

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از مشکلات ریزشبه‌های دوقطبی عدم تعادل ولتاژ و جریان در دو قطب می‌باشد. یکی از کاربردهایی که برای فنر الکتریکی DC پیشنهاد شده جبران عدم تعادل ولتاژ در این ریزشبه‌ها می‌باشد. شکل ۳ ساختار ساده یک ریزشبه DC دوقطبی را نشان می‌دهد. بارهای این ریزشبه می‌توانند بار مقاومتی، توان ثابت و یا هر نوع بار غیرخطی باشند. برای سادگی مقاومت همه خطوط یکسان و برابر با R_L در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- ساختار ساده یک ریزشبه DC دوقطبی

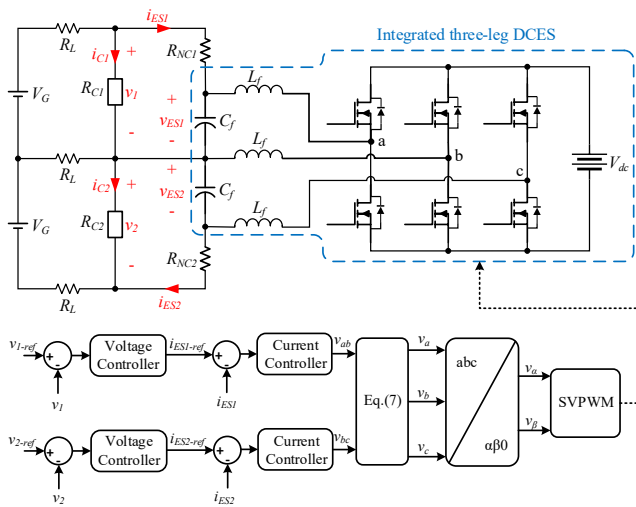
با توجه به شکل فوق ولتاژ دو بار حساس متصل بین دو قطب مثبت و منفی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} v_1 = V_G - R_L i_P - R_L i_{NU} \\ v_2 = V_G - R_L i_N + R_L i_{NU} \\ i_{NU} = i_P - i_N \end{cases} \quad (3)$$

که در آن V_G ولتاژ تونن ریزشبه، R_L مقاومت خطوط انتقال مثبت، منفی و نول، i_P ، i_N و i_{NU} به ترتیب جریان‌های خطوط انتقال مثبت، منفی و نول و v_1 و v_2 ولتاژ دو بار حساس متصل بین قطب‌های مثبت و منفی ریزشبه دوقطبی هستند.

شکل ۴ رابطه ولتاژ دو بار حساس متصل به قطب مثبت و منفی (v_1 و v_2) را به صورت پریونیت برحسب جریان این دو قطب (i_P و i_N) نمایش می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود عدم تعادل جریان موجب نابرابری و عدم تعادل ولتاژ دو قطب می‌شود. علاوه بر این به دلیل وجود مقاومت سیم نول، جریان هریک از دو قطب مثبت و منفی بر ولتاژ قطب دیگر نیز اثر می‌گذارد. بنابراین تزریق جریان به یکی از قطب‌ها، برای جبران عدم تعادل ولتاژ، علاوه بر تأثیر بر ولتاژ همان قطب بر ولتاژ قطب دیگر نیز تأثیر می‌گذارد.

DC واحد امکان استفاده از یک مجموعه ذخیره‌ساز در لینک DC آن وجود دارد. در این ساختار مجموع ولتاژ فتر قطب‌های مثبت و منفی به ولتاژ لینک DC محدود بوده و به صورت رابطه $|v_{ES1} + v_{ES2}| \leq V_{dc}$ نشان داده می‌شود.



شکل ۸- شمای فتر DC سه‌ساق یکپارچه پیشنهادی و بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ بارهای بحرانی قطب مثبت و منفی

مقایسه ساختار پیشنهادی و ساختار رایج، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقایسه ساختار پیشنهادی و ساختار رایج

ساختار رایج	ساختار پیشنهادی	
۸	۶	تعداد کلیدها
۲	۱	مجموعه ذخیره‌ساز لینک DC
V_{dc}	V_{dc}	حداکثر ولتاژ کلیدها
$I_{ub}/2$	ساق وسط دو ساق دیگر	حداکثر جریان کلیدها
I_{ub}	$I_{ub}/2$	

I_{ub} جریان نامتعادل را نشان می‌دهد که ناشی از نابرابر بودن بارهای قطب مثبت و منفی ریزشبه می‌باشد.

۳-۱- کنترل فتر DC سه‌ساق یکپارچه پیشنهادی

برای جبران عدم تعادل جریان و ولتاژ در ریزشبه DC دوقطبی از بلوک دیاگرام کنترلی نشان داده شده در شکل ۸ استفاده شده است. این ساختار کنترلی از دو شاخه کنترلی مجزا و مشابه برای هر یک از دو قطب ریزشبه و شاخه فتر متصل به آن تشکیل شده است. هریک از شاخه‌های کنترلی از دو حلقه کنترلی آباشاری یا تو در تو برای کنترل جریان تزریقی به ریزشبه توسط آن شاخه از فتر و به تبع آن کنترل ولتاژ آن قطب از ریزشبه تشکیل شده است. حلقه بیرونی هر شاخه یا قطب، حلقه کنترل ولتاژ آن قطب از ریزشبه است که برای کنترل و در نتیجه متعادل‌سازی ولتاژ قطب‌ها طبق رابطه (۴) جریان تزریقی توسط فتر به آن قطب را مشخص و کنترل می‌کند. این جریان‌ها به عنوان مرجع به حلقه داخلی یعنی حلقه کنترل جریان دو شاخه فتر وارد می‌شوند. اگر از فتر الکتریکی DC صرفاً برای متعادل‌سازی جریان دو قطب

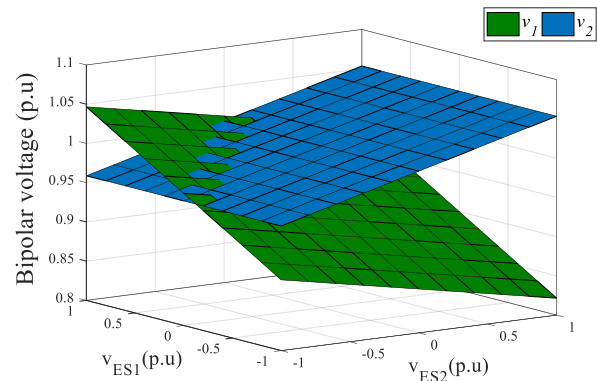
با استفاده از مدار معادل ارائه شده در شکل ۶ معادله (۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} v_1 = V_G - [2(i_{C1} + i_{ES1}) - (i_{C2} + i_{ES2})]R_L \\ v_2 = V_G - [2(i_{C2} + i_{ES2}) - (i_{C1} + i_{ES1})]R_L \end{cases} \quad (4)$$

در نتیجه داریم:

$$\begin{cases} v_1 = V_G - [2(i_{C1} + \frac{v_1 - v_{ES1}}{R_{NC1}}) - (i_{C2} + \frac{v_2 - v_{ES2}}{R_{NC2}})]R_L \\ v_2 = V_G - [2(i_{C2} + \frac{v_2 - v_{ES2}}{R_{NC2}}) - (i_{C1} + \frac{v_1 - v_{ES1}}{R_{NC1}})]R_L \end{cases} \quad (5)$$

با استفاده از این رابطه، تغییرات ولتاژ دو باس مثبت و منفی ریزشبه دوقطبی برحسب ولتاژ فترهای متصل به این دو قطب در شکل ۷ رسم شده است. محل تقاطع دو سطح رسم شده در این شکل جایی است که ولتاژ دو باس مثبت و منفی با هم برابر می‌شوند، که نشان‌دهنده امکان متعادل نمودن ولتاژ ریزشبه دوقطبی با استفاده از دو فتر الکتریکی DC سری به ازای بارهای بحرانی مختلف و نامتعادل متصل بین این دو قطب است.



شکل ۷- رابطه بین ولتاژ باس DC و ولتاژ خروجی فترهای الکتریکی DC

اگرچه جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه دوقطبی با استفاده از این روش بررسی شده است اما در این روش جبران‌سازی، به دلیل استفاده از دو فتر الکتریکی DC، علاوه بر تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت زیاد، نیاز به دو مجموعه ذخیره‌ساز مجزا برای لینک DC هر فتر الکتریکی وجود دارد که هزینه جبران‌سازی را بطور چشمگیری افزایش می‌دهند. برای رفع مشکلات ذکر شده، در این مقاله یک ساختار جدید تحت عنوان فتر الکتریکی سه‌ساق یکپارچه برای جبران عدم تعادل جریان و ولتاژ در ریزشبه‌های DC دوقطبی پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای قبلی از تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت کمتری برخوردار بوده و به دلیل داشتن یک لینک DC، تنها از یک مجموعه ذخیره‌ساز در لینک DC آن استفاده شده است.

۳- ساختار و کنترل فتر DC سه‌ساق یکپارچه پیشنهادی

در این مقاله یک فتر الکتریکی DC سه‌ساق یکپارچه مطابق شکل ۸ برای جبران عدم تعادل جریان و ولتاژ در ریزشبه DC دوقطبی پیشنهاد شده است. در ساختار پیشنهادی از یک مبدل منبع ولتاژ سه‌ساق به عنوان یک فتر الکتریکی DC سه‌ساق یکپارچه استفاده شده که در آن ساق وسط مبدل به صورت مستقیم به سیم نول ریزشبه DC دوقطبی و دو ساق دیگر به صورت سری با دو بار غیربحرانی قرار داشته و به دو قطب مثبت و منفی ریزشبه متصل شده‌اند. ساختار پیشنهادی در مقایسه با دو فتر الکتریکی DC مجزا از تعداد کلید الکترونیک قدرت کمتری برخوردار بوده و به دلیل داشتن یک لینک

برای طراحی حلقه کنترل ولتاژ نیز از مدار معادل ارائه شده در شکل ۶ و رابطه (۴) استفاده شده است. حلقه کنترل ولتاژ برای کنترل ولتاژ بارهای حساس متصل به قطب‌های مثبت و منفی، جریان تزریقی توسط فنر به آن قطب را تعیین کرده و ولتاژ هر قطب ریزشبه را مطابق رابطه (۴) کنترل و متعادل می‌نماید که در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است.

در هنگام طراحی حلقه کنترل ولتاژ می‌توان کوپلینگ بین دو قطب را به عنوان اغتشاش در نظر گرفت و از آن صرف نظر نمود و یا با پیشخور آن را حذف کرد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد ساختار پیشنهاد شده در یک ریزشبه DC دوقطبی 48V بررسی و کارایی آن اثبات شده است. پارامترهای ریزشبه و فنرهای الکتریکی پیشنهادی در جدول ۳ ارائه شده است.

برای تایید اثربخشی ساختار پیشنهادی، سیستم ارائه شده در شکل ۸ با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ شبیه‌سازی شده است. در ابتدا نتایج شبیه‌سازی این ریزشبه دوقطبی 48V بدون جبران عدم تعادل توسط فنر الکتریکی در شکل ۱۰ آمده است.

جدول ۳- پارامترهای ریزشبه و فنر DC پیشنهادی

مقدار	پارامتر	
48 V	$V_{1,2-ref}$	ولتاژ نامی باس DC
0.8 Ω	R_L	مقاومت خط توزیع
17 Ω	$R_{CI,2}$	مقاومت بار بحرانی
17 Ω	$R_{NCI,2}$	مقاومت بار غیربحرانی
52.5 V	V_G	ولتاژ تونن ریزشبه DC
21 μF	C_f	خازن فیلتر خروجی فنر
3.3 mH	L_f	سلف فیلتر خروجی فنر
72 V	V_{dc}	ولتاژ لینک DC فنر
20 KHz	f_{SW}	فرکانس کلیدزنی
0	K_{P-C}	ضریب K_P حلقه کنترل جریان ریزشبه
-513.64	K_{I-C}	ضریب K_I حلقه کنترل جریان ریزشبه
200 rad/s	ω_C	پهنای باند حلقه کنترل جریان ریزشبه
0	K_{P-V}	ضریب K_P حلقه کنترل ولتاژ ریزشبه
-78.5	K_{I-V}	ضریب K_I حلقه کنترل ولتاژ ریزشبه
20 rad/s	ω_V	پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ ریزشبه

در این شبیه‌سازی ولتاژ دو شاخه فنر کاملاً صفر بوده و دو بار غیربحرانی 17 Ω که سری با دو شاخه فنر هستند نیز همیشه به طور کامل در مدار هستند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در شروع، مقاومت دو بار بحرانی متصل به قطب مثبت و منفی ریزشبه نیز برابر 17 Ω بوده و ولتاژ هر یک از دو قطب مثبت و منفی برابر با 48V می‌باشد. در این شرایط جریان عبوری از دو قطب مثبت و منفی با هم برابر و برابر با 5.64A و جریان عبوری از سیم نول ریزشبه صفر است.

استفاده شود، دو حلقه کنترل ولتاژ هر دو شاخه حذف می‌شود. در این صورت جریان‌هایی که توسط دو شاخه فنر به دو قطب ریزشبه تزریق می‌شوند به صورت مستقیم و در راستای متعادل‌سازی جریان‌های دو قطب ریزشبه مشخص می‌شوند.

حلقه‌های داخلی دو حلقه کنترل جریان برای کنترل جریان دو شاخه فنر هستند که ولتاژ اعمالی توسط مبدل (v_{bc} و v_{ab}) و در نتیجه ولتاژ خروجی دو شاخه فنر (v_{ES1} و v_{ES2}) را در راستای کنترل جریان بارهای غیربحرانی و فنر و ساخت جریان‌های مرجع مشخص می‌کنند.

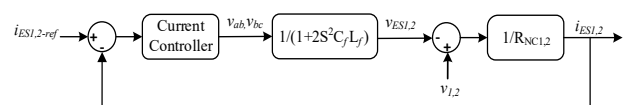
در نهایت برای ساخت دو ولتاژ v_{ab} و v_{bc} توسط مبدل سه‌ساق از روش مدولاسیون بردار فضایی استفاده شده است. برای این منظور با تبدیل عکس گرفتن از رابطه (۶) که ولتاژهای v_{bc} و v_{ab} را برحسب ولتاژ سه ساق بیان می‌کند، رابطه (۷) بدست می‌آید که در آن ولتاژهای سه ساق مبدل برای ساخت v_{ab} و v_{bc} مدنظر بدست می‌آید. این سه ولتاژ با استفاده از تبدیل کلارک به دستگاه $\alpha\beta$ منتقل شده و در نهایت توسط مدولاسیون بردار فضایی رایج ساخته می‌شوند [۲۲-۲۳].

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

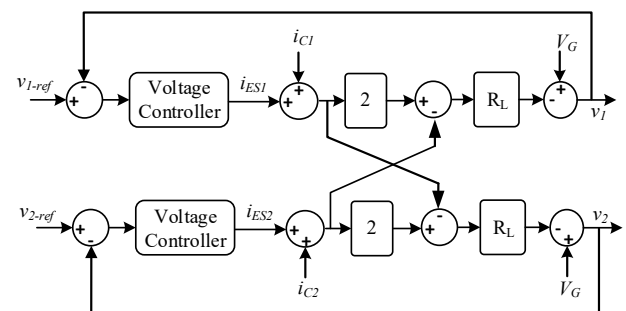
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix}}_{A^{-1}} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

برای طراحی حلقه کنترل جریان از مدار معادل ارائه شده در شکل ۶ و رابطه (۸) استفاده شده است. حلقه کنترل جریان برای تعیین و کنترل جریان تزریقی دو شاخه فنر، ولتاژ اعمالی توسط مبدل سه‌ساق را تعیین کرده که این ولتاژها بر اساس رابطه (۸) ولتاژ خروجی دو شاخه فنر و به تبع آن، جریان تزریقی فنر را مشخص می‌کنند که در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است:

$$\begin{cases} v_{ES1} = \frac{v_{ab}}{1 + 2S^2 C_f L_f} \\ v_{ES2} = \frac{v_{bc}}{1 + 2S^2 C_f L_f} \end{cases} \quad (8)$$



(الف)



(ب)

شکل ۹- (الف) بلوک دیاگرام طراحی حلقه کنترل جریان قطب مثبت و منفی فنر (ب) بلوک دیاگرام طراحی حلقه کنترل ولتاژ بارهای بحرانی قطب مثبت و منفی

۴-۱- جبران سازی عدم تعادل ولتاژ و جریان با استفاده فنر الکتريکی DC سه ساق يکپارچه

در این زیر بخش برای بررسی کارایی ساختار پیشنهاد شده، شبیه سازی ارائه شده در قسمت قبل با فرض جبران عدم تعادل توسط فنر سه ساق پیشنهادی مجدداً تکرار شده و نتایج شبیه سازی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل های ۱۱ (الف)-(ج) مشاهده می شود، در صورت جبران عدم تعادل با ساختار پیشنهاد شده، هنگامی که در 0.15 ثانیه بار بحرانی متصل به قطب مثبت از 17Ω به 12.68Ω کاهش می یابد، برای این که ولتاژ v_2 روی 48 ولت ثابت بماند باید جریان بار بحرانی R_{C1} از 2.82A به 3.78A افزایش پیدا کند که به این منظور فنر قطب مثبت فعال شده و توان 30.38W و ولتاژ 16.29V را تولید می کند. در این شرایط جریان بار غیر بحرانی R_{NC1} (جریان فنر قطب مثبت) از 2.82A به 1.86A و ولتاژ بار R_{NC1} نیز از 48V به 31.71V کاهش می یابد، در نتیجه توان مصرفی بار غیر بحرانی R_{NC1} از 135.5W به 59.14W کاهش می یابد، یعنی توان مصرفی بار غیر بحرانی کاهش می یابد تا ولتاژ ثابت 48V برای بار بحرانی تأمین شود.

هنگامی که در 0.25 ثانیه بار بحرانی متصل به قطب منفی از 17Ω به 11.44Ω کاهش پیدا می کند، در این حالت برای ثابت ماندن ولتاژ v_2 باید جریان بار بحرانی R_{C2} از 2.82A به 4.19A افزایش پیدا کند که به این منظور فنر قطب منفی فعال شده و توان 33.85W و ولتاژ 23.31V را تولید می کند. در این شرایط جریان فنر قطب منفی یا جریان بار غیر بحرانی R_{NC2} از 2.82A به 1.45A و ولتاژ بار R_{NC2} نیز از 48V به 24.7V کاهش می یابد، در نتیجه توان مصرفی آن نیز از 135.5W به 35.9W کاهش پیدا می کند، یعنی کیفیت توان بار غیر بحرانی قربانی می شود تا ولتاژ ثابت 48V برای بار بحرانی تأمین شود.

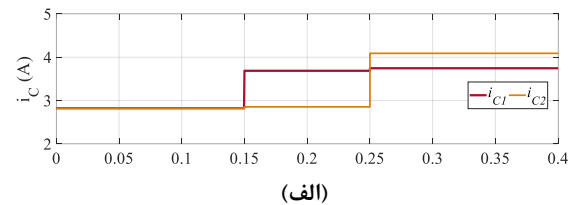
شکل ۱۱ (ج) ولتاژ بارهای بحرانی متصل به قطب مثبت و منفی را با وجود فنر DC فعال نشان می دهد. مشاهده می شود که در هنگام وقوع بارگذاری نامتقارن، عدم تعادل جریان و ولتاژ ایجاد شده به خوبی توسط فنر DC پیشنهادی جبران سازی می شود و ولتاژهای v_1 و v_2 روی 48V تنظیم می شوند. با توجه به شکل های ۱۱ (د) و ۱۱ (ک) جریان عبوری از قطب های مثبت و منفی نیز به ترتیب روی مقادیر 5.64A و 5.64A تنظیم می شوند و در نتیجه جریان سیم نول و تلفات توان ناشی از عبور جریان از آن نیز صفر می شود.

شکل ۱۱ (ی) توان مبادله شده با ذخیره ساز موجود در لینک DC فنر را نشان می دهد و همانطور که مشاهده می شود در 0.15 ثانیه که بار بحرانی متصل به قطب مثبت از 17Ω به 12.68Ω کاهش می یابد، توان مبادله شده با ذخیره ساز لینک DC از 0W به 30.38W تغییر می کند و در 0.25 ثانیه که بار بحرانی متصل به قطب منفی از 17Ω به 11.44Ω کاهش می یابد، توان مبادله شده با لینک DC از 30.38W به 64.23W افزایش می یابد و فنر برای جبران سازی عدم تعادل جریان و ولتاژ رخ داده، توان بیشتری را با ریزشبه مبادله می کند.

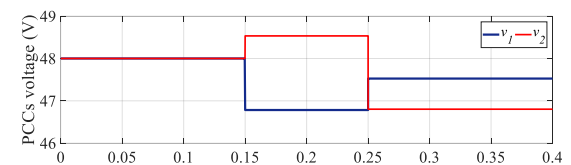
مشاهده می شود که با استفاده از فنر DC سه ساق يکپارچه پیشنهادی می توان به خوبی عدم تعادل ولتاژ و جریان در ریزشبه DC دوقطبی را جبران کرد و با توجه به کمتر بودن تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت و ذخیره سازهای مورد نیاز در ساختار پیشنهادی نسبت به دو فنر DC مجزا، هزینه جبران سازی بطور چشم گیری کاهش پیدا می کند.

در لحظه 0.15 ثانیه، مقاومت بار بحرانی متصل به قطب مثبت از 17Ω به 12.68Ω کاهش می یابد. با کاهش مقاومت بار بحرانی متصل به قطب مثبت، جریان این بار از 2.82A به 3.68A افزایش یافته و ریزشبه نامتعادل می شود. در این شرایط جریان قطب مثبت از 5.64A به 6.43A افزایش یافته و ولتاژ قطب مثبت نیز از 48V به 46.78V کاهش می یابد. اگر چه بار بحرانی متصل به قطب منفی تغییری نداشته است، اما به دلیل عبور جریان 0.72A از سیم نول، ولتاژ قطب منفی از 48V به 48.53V افزایش و در نتیجه جریان این قطب نیز از 5.64A به 5.71A کاهش یافته و تلفات توان ناشی از عبور جریان از سیم نول نیز از 0W به 0.42W افزایش یافته است.

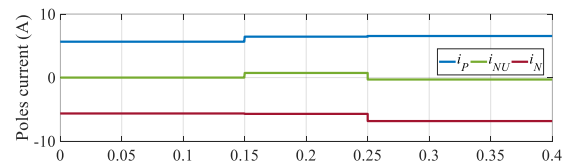
در لحظه 0.25 ثانیه، مقدار مقاومت بار بحرانی متصل به قطب منفی نیز از 17Ω به 11.44Ω کاهش می یابد و در اثر این تغییر، جریان کشیده شده توسط این بار از 2.85A به 4.09A و به تبع آن جریان کشیده شده از قطب منفی از 5.71A به 6.84A تغییر می یابد. اگر چه در این زمان تنها بار بحرانی متصل به قطب منفی تغییر داشته است اما همانطور که در این شکل مشاهده می شود، به دلیل تغییر جریان سیم نول از 0.72A به 0.3A، علاوه بر تغییر ولتاژ قطب منفی از 48.53V به 46.8V، ولتاژ و جریان قطب مثبت نیز به ترتیب از 46.78V به 47.53V و از 6.43A به 6.54A و تلفات توان ناشی از عبور جریان از سیم نول نیز از 0.42W به 0.72W تغییر می یابد.



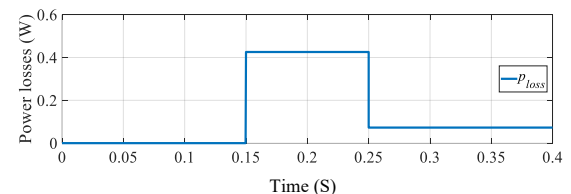
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۰- (الف) جریان بارهای بحرانی (ب) ولتاژ بارهای بحرانی (پ) جریان قطب های مثبت، منفی و نول (ت) تلفات توان سیم نول؛ بدون وجود فنر DC و جبران ریزشبه

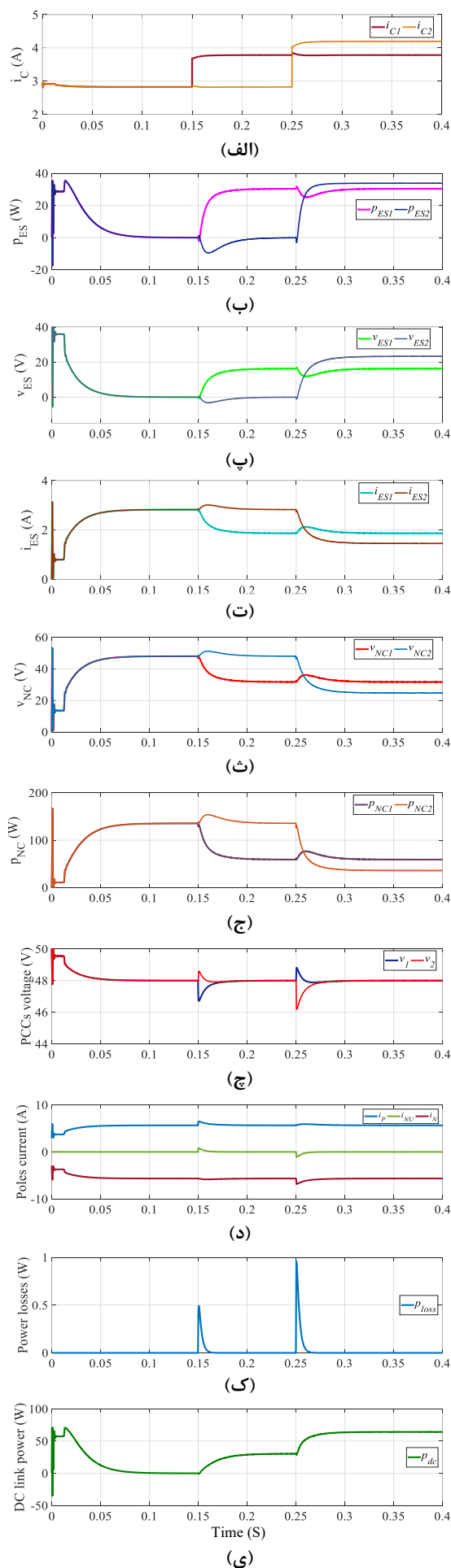
شکل (۱۱-الف) جریان بارهای بحرانی (ب) توان فنر DC (پ) ولتاژ فنر DC (ت) جریان فنر DC (ث) ولتاژ بارهای غیربحرانی (ج) توان بارهای غیربحرانی (چ) ولتاژ بارهای بحرانی (د) جریان قطب‌های مثبت، منفی و نول (ک) تلفات توان سیم نول (ی) متوسط توان مبادله شده با لینک DC فنر؛ با وجود فنر DC سه‌ساق یکپارچه پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک فنر DC سه‌ساق یکپارچه با ذخیره‌ساز انرژی برای تنظیم و متعادل‌سازی ولتاژ باس و جریان سیم نول در ریزشک‌های DC دوقطبی پیشنهاد شده است. استفاده از ساختار پیشنهادی در شرایطی که بارگذاری قطب‌های مثبت و منفی ریزشک نامتقارن باشند، می‌تواند توان مصرفی بارهای غیربحرانی را تغییر داده و از این طریق بین قطب‌های مثبت و منفی تعادل ایجاد کرده و ولتاژ بارهای بحرانی را تنظیم و متعادل نماید، در نتیجه جریان سیم نول و تلفات توان ناشی از آن نیز بطور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. ساختار پیشنهادی به دلیل کاهش تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت و ذخیره‌سازهای مورد نیاز در مقایسه با دو فنر DC مجزا، می‌تواند هزینه متعادل کردن ریزشک دوقطبی را کاهش دهد.

مراجع

- [1] M. Heidari, M. A. Shamsinejad, M. Monfared, "Reducing DC Link Capacitor Capacity in Grid-Connected Solar Inverters Using a Parallel Madrasah System", No. 49, 4, pp. 1577-1590, 2019.
- [2] O. Souri, M. Heydari, Ehsan Najafi, "Presentation of a new high-voltage gain DC-DC converter based on active network and coupled inductor", Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, vol. 50, Issue 4, pp. 1647-1659, 2019.
- [3] A. Kwasinski and C. N. Onwuchekwa, "Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 822-834, 2011.
- [4] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Distribution Voltage Control for DC Microgrids Using Fuzzy Control and Gain-Scheduling Technique," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2246-2258, 2013.
- [5] P. C. Loh, S. Member, D. Li, Y. K. Chai, and F. Blaabjerg, "Autonomous Operation of Hybrid Microgrid With AC and DC Subgrids," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2214-2223, 2013.
- [6] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066-3075, 2010.
- [7] Esmail Rak Rak, Leila Miri, "Non-isolated single-switch DC-DC converter with high efficiency and gain and low input current ripple for photovoltaic applications", Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, Volume 49, Issue 1, pp. 181-190, 2019.
- [8] N. H. van der Blij, L. M. Ramirez-Elizondo, M. T. J. Spaan, and P. Bauer, "A state-space approach to modelling DC distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 949-950, 2018.
- [9] Y. Gu, W. Li, and X. He, "Analysis and control of bipolar LVDC grid with DC symmetrical component method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 685-694, Jan. 2016.
- [10] G. Gwon, C. Kim, Y. Oh, C. Noh, T. Jung, and J. Han, "Electrical Power and Energy Systems Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 158-167, 2017.
- [11] G. H. Gwon, C. H. Kim, Y. S. Oh, C. H. Noh, T. H. Jung, and J. Han, "Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 158-167, Sep. 2017.
- [12] A. Bagherian, T. Nouri, M. Shaneh, M. Radmehr, "Presentation of a super-boosted DC-DC interleaved converter with zero-voltage switching capability and low voltage stress on the switches for renewable energy system applications", Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, Volume 52, Issue 4, Pages 217-227, 1401.
- [13] G. H. Gwon, C. H. Kim, Y. S. Oh, C. H. Noh, T. H. Jung, and J. Han, "Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in



- in DC Microgrids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1167–1177, 2018.
- [19] A. Hosseinipour and H. Hojabri, “Small-Signal Stability Analysis and Active Damping Control of DC Microgrids Integrated with Distributed Electric Springs,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 3737–3747, 2020.
- [20] Y. Yang, S. C. Tan, and S. Y. R. Hui, “Mitigating distribution power loss of dc microgrids with DC electric springs,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5897–5906, 2018.
- [21] M. Wang, Y. He, X. Xu, Z. Dong, and Y. Lei, “A Review of AC and DC Electric Springs,” *IEEE Access*, vol. 9, no. iii, pp. 14398–14408, 2021.
- [22] M. Naghizadeh, H. S. Gohari, H. Hojabri, and E. Muljadi, “New Single-Phase Three-Wire Interlinking Converter and Hybrid AC/LVDC Microgrid,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 4, pp. 4451–4463, Apr. 2023.
- [23] D. O. Neacsu, “Space vector modulation - An introduction,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 1, no. 2, pp. 1583–1592, 2001.
- bipolar low voltage DC distribution system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 158–167, Sep. 2017.
- [14] K. T. Mok, M. H. Wang, S. C. Tan, and S. Y. R. Hui, “DC electric springs - A technology for stabilizing DC power distribution systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1088–1105, 2017.
- [15] J. Liao, N. Zhou, Y. Huang, and Q. Wang, “Unbalanced Voltage Suppression in a Bipolar DC Distribution Network Based on DC Electric Springs,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1667–1678, 2020.
- [16] J. Liao, N. Zhou, Y. Huang, and Q. Wang, “Decoupling Control for DC Electric Spring-Based Unbalanced Voltage Suppression in a Bipolar DC Distribution System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 4, pp. 3239–3250, 2021.
- [17] M. H. Wang, K. T. Mok, S. C. Tan, and S. Y. Hui, “Multifunctional DC Electric Springs for Improving Voltage Quality of DC Grids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2248–2258, 2018.
- [18] M. H. Wang, S. Yan, S. C. Tan, and S. Y. R. Hui, “Hybrid-DC Electric Springs for DC Voltage Regulation and Harmonic Cancellation