

An Algorithm to Control Interlinking Converter in a Hybrid Microgrid

Amir Khorsandi¹

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
a_khorsandi@aut.ac.ir

Abstract:

In recent years, due to the development of distributed generation, the concept of a microgrid has been introduced. A microgrid is a small-scale grid that includes renewable energy sources such as wind turbines and solar energy, conventional energy sources such as microturbines, energy storage units such as batteries, and loads. The microgrid can operate connected to the utility or isolated from the utility. The microgrid can be grouped into AC and DC types. A hybrid microgrid is composed of an AC microgrid, a DC microgrid, and an interlinking converter between them. To optimally operate the interlinking converter, it should be properly controlled. In this paper, a method to control and manage the interlinking converter is proposed. In the proposed algorithm, the voltage and frequency at the terminal on the AC side, as well as the voltage at the terminal on the DC side, are measured to evaluate the load of both microgrids. Based on the proposed strategies, power transfer occurs between AC and DC microgrids in a manner that maximum efficiency is obtained. The proposed strategy is implemented in MATLAB/Simulink to demonstrate its effectiveness.

Keywords: Hybrid microgrid, Interlinking converter, Distributed energy resources, Power management

Article Type: Research

Received: 21. 01. 2024

Revised: 12. 03. 2024

Accepted: 25. 06. 2024

Corresponding author: Amir Khorsandi

Corresponding author's address: No. 350, Hafez Ave, Valiasr Square, Tehran, Iran 1591634311



Copyright © 2024 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the

original work is properly cited.

1. Motivation of the work

With the widespread usage of AC and DC microgrids, hybrid AC-DC microgrids are becoming more common. These systems integrate both AC and DC distributed generations and loads without unnecessary AC to DC or DC to AC conversions. To enhance operational efficiency and flexibility, this paper introduces a method for controlling the interlinking converter within hybrid microgrids. By proposing an algorithm that utilizes voltage and frequency measurements at key terminals, the research aims to optimize power transfer between AC and DC microgrids. Implementing this strategy in MATLAB/Simulink demonstrates effectiveness of the proposed control strategy.

2. Contributions

In [1] and [2], centralized controllers are proposed to control a hybrid microgrid. In [3], a hierarchical control method is presented for a hybrid microgrid. However, using the communication link may deteriorate system reliability and increase costs. In [4]-[8], various control methods for interlinking converters are proposed; however, they do not consider the loading conditions of the AC and DC microgrid. This paper determines the loading conditions of both grids using voltage and frequency measurements on the AC side and voltage measurements on the DC side. An optimal scenario is then determined based on these conditions, leading to the proposal of a new decentralized control strategy for the interlinking converter that ensures optimal operation in all modes. Additionally, the interlinking converter is utilized to compensate reactive power for the AC microgrid when feasible.

3. Procedures

To achieve a highly reliable and efficient hybrid microgrid, the interlinking converter should possess the following features:

- When both AC and DC microgrids are lightly loaded, surplus power from each microgrid charges the battery on the DC link of the interlinking converter.
- If one microgrid is lightly loaded while the other is heavily loaded, excess power from the lightly loaded microgrid charges the interlinking converter's battery.
- When both microgrids are in a normal state without heavy or light loading, no power is exchanged between them, and charging power is zero. The interlinking converter is turned off with zero losses.
- In cases where one microgrid is heavily loaded and the other isn't, the interlinking converter transfers power from the heavily loaded microgrid to the lightly loaded one until balance is achieved. If insufficient, the battery compensates for additional required power.
- If both microgrids are heavily loaded, the battery discharges to support them based on their priorities (assuming DC has higher priority than AC). Power transmission continues until both grids exit heavy loading conditions.

- The AC-DC converter within the interlinking converter handles reactive power compensation. For optimal efficiency, this compensation occurs only when active power transmission is active and the converter is operational.

The above features can be achieved by categorizing the operation of each AC and DC microgrid into three regions. According to the features, the operation of the interlinking converter is grouped into four states:

- Power transmission from the DC microgrid to the AC microgrid.
- Power transmission from the AC microgrid to the DC microgrid.
- Battery charging.
- Battery discharging.

For each state, a suitable control strategy is proposed to achieve high efficiency.

4. Findings

To demonstrate the effectiveness of the proposed method, a hybrid microgrid with each microgrid rated at 10 kW is simulated in MATLAB/Simulink. Using measurements from both AC and DC sides, the loading status of the microgrids is determined. Based on the loadings, power is transferred between the DC and AC microgrids, or the battery of the interlinking converter is charged or discharged accordingly. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

5. Conclusion

In this paper, the control and power management of an interlinking converter between AC and DC microgrids in a hybrid system was investigated. Initially, a control strategy aiming for maximum efficiency was proposed. Subsequently, control strategies were defined based on the operation of each microgrid under low loading, moderate loading, and high loading conditions. The interlinking converter determines the loading conditions of each microgrid by measuring voltage and frequency on the AC side and voltage on the DC side. Four operational modes are possible depending on the operational region of each microgrid: power transfer from DC to AC microgrid, power transfer from AC to DC microgrid, battery charging, and battery discharging. A suitable control strategy was proposed for each operational mode. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

ارائه الگوریتمی جهت کنترل مبدل واسط در ریزشبه ترکیبی

امیر خرسندی^۱

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

a_khorsandi@aut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر با توجه به توسعه منابع تولید پراکنده، مفهوم ریزشبه ارائه شده است. ریزشبه یک شبکه در مقیاس کوچک شامل منابع تولید تجدیدپذیر نظیر توربین بادی و سلول‌های خورشیدی، منابع تولید سنتی نظیر میکروتوربین، منابع ذخیره انرژی نظیر باتری و نیز بار می‌باشد. ریزشبه می‌تواند در حالت متصل به شبکه یا جدا از شبکه کار کند. ریزشبه دارای دو نوع DC و AC می‌باشد. ریزشبه ترکیبی شامل یک ریزشبه AC، یک ریزشبه DC و یک مبدل واسط بین این دو ریزشبه است. برای عملکرد بهینه ریزشبه ترکیبی لازم است که مبدل واسط به درستی کنترل شود. در این مقاله، یک روش جهت کنترل و مدیریت توان مبدل واسط بین دو ریزشبه پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، با اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس در ترمینال سمت AC و نیز اندازه‌گیری ولتاژ در ترمینال سمت DC وضعیت بار دو ریزشبه ارزیابی می‌شود و بسته به استراتژی‌های کنترلی اخذ شده، انتقال توان بین دو ریزشبه طوری صورت می‌گیرد تا بتوان به حداکثر بازده دست یافت. عملکرد استراتژی پیشنهادی در نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: ریزشبه ترکیبی، مبدل واسط، منابع تولید پراکنده، مدیریت توان

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر خرسندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - میدان ولیعصر - خیابان حافظ - پلاک ۳۵۰. صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۱- مقدمه

بصورت غیرمتمرکز می‌باشد که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

در مراجع [۷] و [۸] یک الگوریتم کنترلی در ریزشبکه ترکیبی ارائه شده است. در این مراجع فرض شده که منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در حالت ماکزیمم توان کار می‌کنند و بر اساس تعادل توان در حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای کنترل کننده‌های مناسب هر مبدل طراحی شده است. در این مراجع، شبیه سازی بر اساس مدل میانگین صورت گرفته و همچنین فرض شده که توان خروجی همه‌ی منابع مشخص هستند که این امر نیازمند رابط مخابراتی بین DG ها می‌باشد. در [۹] یک کنترل کننده‌ی متمرکز به منظور کنترل ریزشبکه‌ی ترکیبی پیشنهاد شده است. جهت بررسی اثر تاخیر رابط مخابراتی بر پایداری سیستم از تحلیل سیگنال کوچک استفاده شده است. اگر چه روش پیشنهادی در این مرجع انتقال توان بهینه بین دو ریزشبکه را به دنبال دارد اما استفاده از رابط مخابراتی بین مبدل‌های موجود در هر کدام از ریزشبکه‌ها و مبدل واسط ضروری است. در مرجع [۱۰] کنترل متمرکز ریزشبکه ترکیبی بررسی شده است. اما این روش نیازمند رابط‌های مخابراتی بوده و برای شبکه‌های خیلی کوچک و با پراکندگی کم منابع و بار مناسب است.

کنترل سلسله مراتبی مبدل‌های AC-DC موازی در ریزشبکه‌ی ترکیبی که واسط دو ریزشبکه‌ی DC و ریزشبکه‌ی AC است در [۱۱] پیشنهاد شده است. کنترل سلسله مراتبی پیشنهادی شامل سه مرحله است. کنترل اولیه، یک کنترل غیرمتمرکز است که با کنترل افتی محقق می‌شود. کنترل ثانویه جهت حذف انحراف ولتاژ باس DC ناشی از کنترل افتی بکار می‌رود. کنترل ثالثیه به منظور اتصال ریزشبکه به شبکه‌ی خارجی استفاده می‌شود. کنترل ثانویه و ثالثیه از طریق رابط مخابراتی به هم ارتباط پیدا می‌کنند. استفاده از رابط مخابراتی باعث افزایش هزینه می‌شود. بعلاوه، کاهش قابلیت اطمینان شبکه را به دنبال دارد.

در مراجع [۱۲-۲۶] به نحوه‌ی تبادل توان بین ریزشبکه‌های AC و DC پرداخته شده است. در این مراجع یک روش کنترل افتی برای مبدل واسط بین دو ریزشبکه پیشنهاد شده است. در [۱۲] جهت کنترل مبدل واسط بین ریزشبکه‌های AC و DC از یک مبدل DC-DC و یک مبدل AC-DC بهره جسته است و در دو حالت، کنترل مبدل واسط بررسی شده است. در حالت اول خازن در باس DC قرار داده شده و در حالت دوم یک منبع ذخیره‌ی انرژی نظیر باتری در باس DC در نظر گرفته شده است. منبع ذخیره انرژی نقش بافر انرژی را بازی می‌کند و باعث می‌شود شبکه در برابر تغییرات ناگهانی بار مقاوم‌تر شود.

سیستم‌های توزیع موجود، بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده طراحی شده اند. در نتیجه، استفاده روز افزون از واحدهای تولید پراکنده باعث ایجاد مشکلاتی از جمله مشکلات حفاظتی و کیفیت توان می‌شود [۱]. از طرفی مزایای فنی و اقتصادی بکارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع موجب شده است که منابع تولید پراکنده مورد توجه شرکت‌های توزیع و مشترکین قرار گیرد. کاربرد منابع تولید پراکنده در ریزشبکه بسیار با اهمیت بوده بطوری که در این کاربرد چندین مولد بصورت شبکه کوچک در کنار هم قرار گرفته و در واقع یک شبکه تولید، توزیع و انتقال کوچک را تشکیل می‌دهند. این شبکه بسیار هوشمند است و قابلیت وصل به شبکه سراسری را دارد [۲-۴].

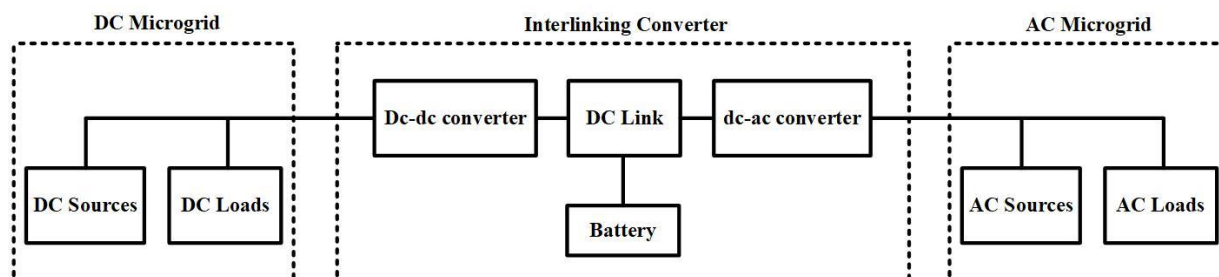
ریزشبکه‌ها به دو دسته ریزشبکه AC و DC تقسیم می‌شوند. هر کدام از ریزشبکه‌های AC و DC دارای مزایا و معایبی هستند. در ریزشبکه‌ی ترکیبی سعی می‌شود با استفاده از مبدل‌های دوجته تا حد امکان مزیت هر دو ریزشبکه AC و DC حاصل شود و معایب آن تا حد ممکن کاهش پیدا کند. ریزشبکه‌ی ترکیبی شامل منابع مختلف AC و DC است که بارهای DC و AC را طوری تغذیه می‌کند که حداقل مبدل نیاز باشد. واضح است که این امر بازده سیستم و قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد [۳]. از طرفی، ترکیب بارها و منابع AC و DC مختلف نیاز به الگوریتم‌های کنترلی پیچیده دارد. بعلاوه، مدیریت توان ریزشبکه‌ی ترکیبی در مقایسه با ریزشبکه AC و DC دشوارتر است. در ریزشبکه‌ی ترکیبی منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره‌ی انرژی به هر دو باس AC و DC متصل شده‌اند. در این ساختار با توجه به کاهش مبدل‌های مورد نیاز، بازده کلی سیستم افزایش و هزینه کاهش پیدا می‌کند. دستیابی به مزایای ذکر شده در ریزشبکه‌ی ترکیبی AC-DC مستلزم استفاده از الگوریتم کنترلی مناسب برای مبدل واسط بین دو ریزشبکه است. تفاوت‌های مبدل واسط بین ریزشبکه‌ی AC و DC با دیگر مبدل‌های متداول در ریزشبکه AC عبارتند از [۵]:

- بر خلاف مبدل‌هایی که به عنوان رابط در منابع متداول تولید پراکنده استفاده می‌شود، این مبدل باید دو جهته باشد و کنترل توان بین دو ریزشبکه بطور مناسب صورت پذیرد.
- مبدل واسط برای یک ریزشبکه نقش منبع و برای ریزشبکه دیگر نقش بار را بازی می‌کند.
- برخلاف توان اکتیو که در هر دو ریزشبکه وجود دارد، توان راکتیو تنها در ریزشبکه AC وجود دارد.

در سال‌های اخیر توجه به ریزشبکه‌های ترکیبی و نحوه‌ی کنترل آنها افزایش یافته است [۷-۱۷]. بطور کلی الگوریتم‌های پیشنهادی در زمینه‌ی کنترل ریزشبکه‌ی ترکیبی که چالش اساسی در آن کنترل و مدیریت توان مبدل واسط آن است به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شود. دسته‌ی اول کنترل دقیق با استفاده از رابط مخابراتی و دسته‌ی دوم

جدول (۱): مقایسه روش پیشنهادی با مراجع دیگر

مرجع	استفاده از سیستم ذخیره انرژی در مبدل واسط	در نظر گرفتن وضعیت کم باری و پر باری ریزشکه‌ها	استفاده از مبدل واسط جهت جبران سازی توان راکتیو	در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع تجدیدپذیر	در نظر گرفتن گرفتن چند مبدل واسط	عدم استفاده از لینک مخابراتی
[۲۱]				✓		✓
[۲۲]					✓	✓
[۲۳]					✓	✓
[۲۴]						✓
[۲۵]						
[۲۶]			✓			
روش پیشنهادی	✓	✓	✓			✓



شکل (۱): ساختار ریزشکه‌ی ترکیبی مورد مطالعه

در ادامه‌ی بحث، انتقال توان از ریزشکه‌ی DC به ریزشکه‌ی AC مثبت در نظر گرفته شده است.

۲-۱- ریزشکه‌ی AC

زیر ریزشکه‌ی AC نشان داده شده در شکل ۲ می‌تواند شامل چندین منبع و نیز بارهای مختلف باشد. این ریزشکه علاوه بر منابع و بار می‌تواند شامل منابع ذخیره‌ی انرژی نیز باشد. این منابع جهت تقسیم توان از کنترل اکتیو استفاده می‌کنند. شکل ۲-الف شکل اکتیو $p-f$ ریزشکه‌ی AC را نشان می‌دهد که رابطه‌ی ریاضی آن به صورت رابطه (۱) است [۱۶]:

$$f_{ref} = f_{max} + m_x P_{ac-x} \quad (1)$$

که f_{max} فرکانس نامی، P_{ac-x} توان حقیقی منبع x -ام و m_x ضریب اکتیو مربوط به توان اکتیو منبع x -ام است که بصورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

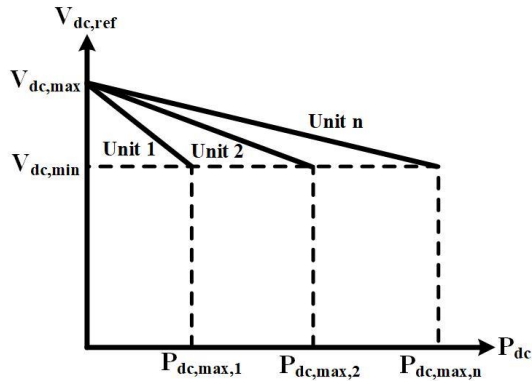
$$m_x = \frac{f_{min} - f_{max}}{P_{ac-x,max}} \quad (2)$$

در واقع، f_{max} فرکانس حداکثر در حالت بی باری ریزشکه $(P_{ac}=0)$ و f فرکانس مرجع است. در حالت ماندگار، در ریزشکه‌ی

جدول ۱ مقایسه بین ویژگی‌های روش پیشنهاد شده در این مقاله و دیگر مراجع را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، انتخاب، کنترل و مدیریت توان مبدل واسط بین دو ریزشکه نیازمند تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. این مبدل نقش اساسی در عملکرد صحیح ریزشکه‌ی ترکیبی داشته و لازم است تا حد امکان بصورت غیرمتمرکز کنترل شود. در این مقاله با توجه به اهمیت کنترل مبدل واسط ریزشکه ترکیبی، ابتدا اهداف کنترلی مبدل واسط بین دو ریزشکه ارائه می‌شود و بر اساس اهداف کنترلی در نظر گرفته شده، روش کنترلی پیشنهادی مبدل واسط ارائه می‌شود. روش پیشنهادی غیرمتمرکز بوده و باعث عملکرد بهینه در همه شرایط کاری می‌شود.

۲- ساختار ریزشکه ترکیبی مورد مطالعه

ساختار ریزشکه‌ی ترکیبی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ریزشکه، هر کدام از زیر ریزشکه‌های DC و AC منابع و بارهای مربوط به خود را دارند و این دو ریزشکه از طریق مبدل واسط به هم متصل می‌شوند و این مبدل واسط در صورت نیاز به انتقال توان بین دو ریزشکه می‌پردازد و یا در صورت نیاز با دشارژ منبع ذخیره‌ی انرژی کمبود توان بین دو ریزشکه را جبران می‌کند و در مواقعی منبع ذخیره‌ی انرژی موجود در باس DC را شارژ می‌کند.



شکل (۳): منحنی افتی منابع ریزشبهی DC

۲-۲- ریزشبهی DC

ریزشبهی DC را می‌توان شکل ساده شده‌ی ریزشبهی AC در نظر گرفت که در آن توان راکتیو و فرکانس صفر شده است. جهت تقسیم توان بین منابع ریزشبهی DC از کنترل افتی $V-I$ یا $V-P$ استفاده می‌شود. شکل منحنی افتی در شکل ۳ نشان داده شده است. در صورتی که از مقاومت کابل‌ها صرف نظر شود ولتاژ یکسانی در شبکه حکم فرماست که این ولتاژ یکسان تعیین کننده‌ی توان تحویلی هر کدام از منابع تولیدی انرژی به شبکه است.

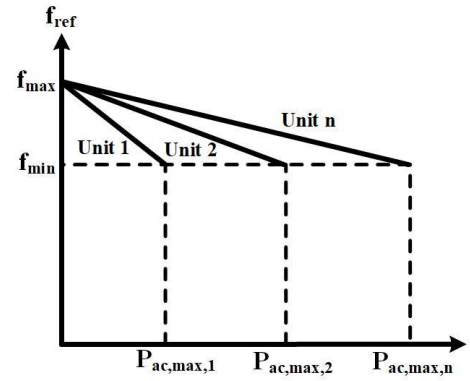
۲-۳- ساختار مبدل واسط

ساختار مبدل واسط انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مبدل واسط شامل یک مبدل dc-dc ساده و مبدل ac-dc نیز شامل شش کلید است و هر دوی این مبدل‌ها قابلیت انتقال توان دو طرفه دارند. زمانی که انتقال توان از ریزشبهی DC به AC نیاز باشد هر دو مبدل فعال می‌باشند و توان یکسانی را از ریزشبهی DC به AC انتقال می‌دهد. بطور مشابه وقتی انتقال توان از ریزشبهی AC به DC نیاز باشد، مجدداً هر دو مبدل فعال بوده و توان انتقالی آنها یکسان خواهد بود. در حالت شارژ و یا دشارژ بر خلاف دو حالت قبل، توان انتقالی هر کدام از این دو مبدل متفاوت خواهد بود و در مواقعی یکی از مبدل‌ها غیرفعال خواهد بود.

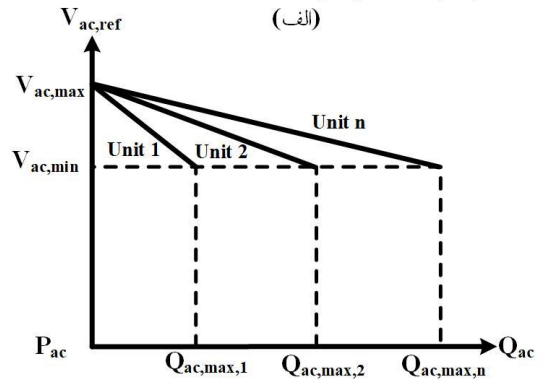
۳- استراتژی کنترلی مبدل واسط

چالش اساسی ریزشبهی ترکیبی کنترل و مدیریت صحیح توان مبدل واسط است که دو ریزشبهی را به هم وصل می‌کند تا بتوان به قابلیت اطمینان و بازده بیشتر دست پیدا کرد. بدین منظور مبدل واسط باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- زمانی که هر دو ریزشبهی در حالت کم باری قرار دارند ظرفیت اضافی هر کدام از ریزشبهی‌ها صرف شارژ باتری موجود در باس DC شود. با توجه به بازده بیشتر مبدل dc-dc در مقایسه با مبدل



(الف)



(ب)

شکل (۴): منحنی افتی منابع ریزشبهی AC

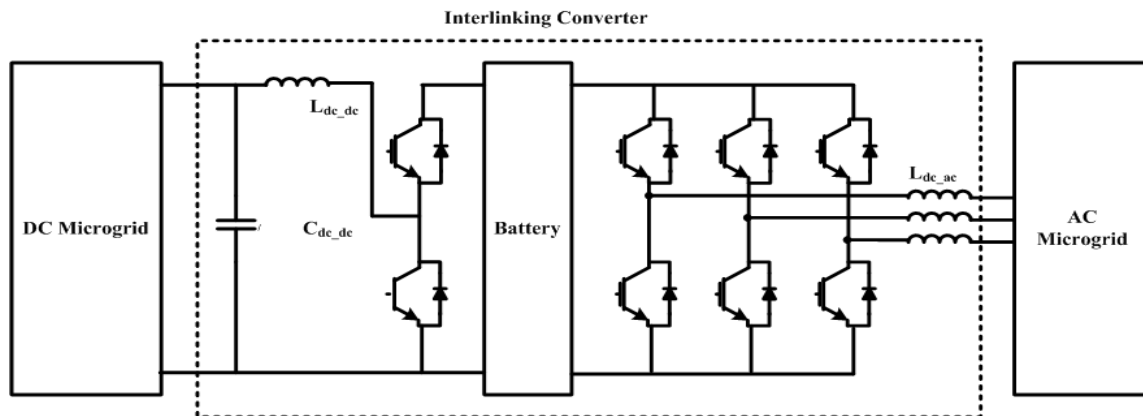
AC تنها یک فرکانس وجود دارد که این تک فرکانس توان تولیدی هر کدام از منابع تولیدی ریزشبهی AC را تعیین می‌کند. جهت تقسیم توان راکتیو در این ریزشبهی، از رابطه افتی $Q-V$ استفاده می‌شود که در شکل ۲-ب نشان داده شده است که طبق رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۷]:

$$V_{ac,ref} = V_{ac,max} + n_x Q_{ac-x} \quad (۳)$$

که $V_{ac,max}$ فرکانس نامی، Q_{ac-x} توان راکتیو منبع x -ام، $V_{ac,ref}$ ولتاژ مرجع و n ضریب افتی مربوط به توان راکتیو منبع x -ام است که بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$n_x = \frac{V_{ac,min} - V_{ac,max}}{Q_{ac-x,max}} \quad (۴)$$

بر خلاف فرکانس که در سرتاسر ریزشبهی یکسان است ولتاژ به دلیل افت کابل‌ها در سرتاسر ریزشبهی کمی متفاوت خواهد بود که این مسئله باعث می‌شود تقسیم توان راکتیو بطور دقیق انجام نشود. هر چند راه حل‌هایی اعم از متمرکز [۱۸] و غیر متمرکز [۱۹-۲۲] جهت جبران این افت ولتاژ و تقسیم دقیق توان راکتیو پیشنهاد شده است که در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرد.



شکل (۴): ساختار مبدل واسط

اولویت از حالت اضافه باری بیشتر باشد، توان باقی مانده‌ی باتری به ریزشبه‌ی دیگر انتقال پیدا می‌کند تا جایی که این ریزشبه را نیز از حالت اضافه باری خارج کند. در صورتی که توان دشارژ بدین منظور کافی نباشد ممکن است مجبور به بارزدایی شویم.

- در تقسیم توان راکتیو نیز مبدل ac-dc می‌تواند از ریزشبه‌ی AC پشتیبانی نماید. جهت دستیابی به بازدهی بالا، مشارکت مبدل dc-ac در تامین توان راکتیو مورد نیاز تنها زمانی انجام می‌شود که مبدل dc-ac روشن بوده و انتقال توان اکتیو انجام دهد.

در ادامه به نحوه‌ی کنترل مبدل واسط جهت نیل به اهداف کنترلی ذکر شده در بالا پرداخته می‌شود.

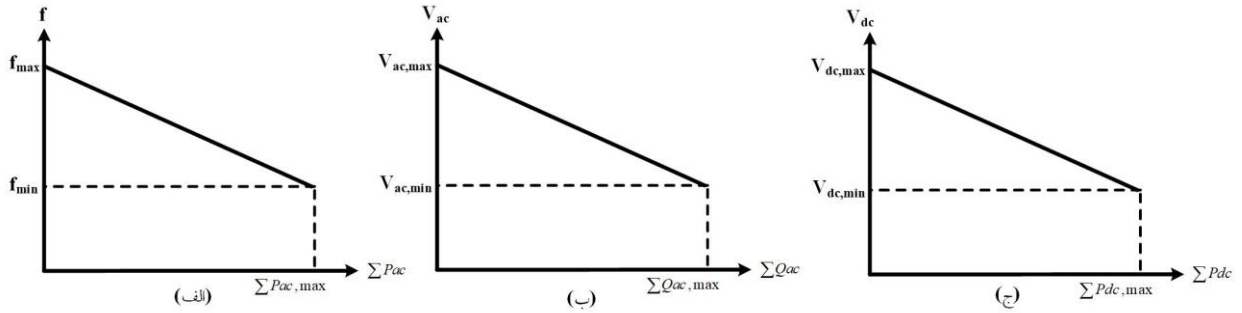
۴- کنترل مبدل واسط

دستیابی به اهداف کنترلی ذکر شده منوط به اطلاع از وضعیت بار هر کدام از دو ریزشبه است. وضعیت بار و ظرفیت باقی مانده‌ی هر کدام از ریزشبه‌ها را می‌توان به طور غیر مستقیم با اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس ترمینال سمت ریزشبه‌ی AC و نیز ولتاژ ترمینال سمت ریزشبه‌ی DC تعیین کرد. با استفاده از اندازه‌گیری فرکانس و ولتاژ ترمینال سمت ریزشبه‌ی AC می‌توان از وضعیت بار اکتیو و راکتیو ریزشبه‌ی AC و ظرفیت تولید باقی مانده‌ی آن اطلاع پیدا کرد. همچنین با اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال سمت ریزشبه‌ی DC می‌توان از وضعیت بار در ریزشبه‌ی DC و ظرفیت تولید باقی مانده‌ی آن اطلاع پیدا کرد.

دسترسی به منحنی افتی تک تک منابع و نیز تعداد منابع در هر کدام از ریزشبه‌ها مقدر نیست. البته این کنترل افتی‌ها تنها جهت تقسیم توان بین منابع داخل ریزشبه مورد استفاده قرار می‌گیرد و اطلاع از تک تک آنها جهت کنترل مبدل واسط مورد نیاز نیست. از دید مبدل واسط این منحنی افتی‌ها با هم تجمیع می‌شوند و تشکیل منحنی افتی ترکیبی می‌دهند. شکل ۵ منحنی افتی $Q-V$ و $P-f$ تجمعی حاصل از همه‌ی منابع موجود در ریزشبه‌ی AC و نیز شکل افتی ترکیبی ریزشبه‌ی DC را نشان می‌دهد. این خطوط افتی در

در صورتی که حداکثر توان مجاز شارژ باتری از توان اضافه‌ی ریزشبه‌ی DC کمتر باشد، توان شارژ باتری تنها از طریق مبدل dc-dc تامین می‌شود و باتری با حداکثر توان مجاز شارژ، شارژ می‌شود تا بتوان به بازده بالاتری دست یافت. در صورتی که حداکثر توان مجاز شارژ باتری از توان اضافه‌ی ریزشبه‌ی DC بیشتر باشد توان اضافه‌ی هر دو ریزشبه‌ی AC و DC از طریق هر دو مبدل dc-dc و dc-ac توان شارژ باتری را تامین می‌کند.

- در صورتی که یکی از دو ریزشبه در حالت کم باری قرار داشته باشد و ریزشبه‌ی دیگر در حالت پرباری نباشد، توان اضافه‌ی ریزشبه‌ای که در حالت کم باری قرار دارد صرف شارژ باتری موجود در باس DC می‌شود.
- در صورتی که بار هر دو ریزشبه در حالت نرمال خود قرار داشته باشد بگونه‌ای که هیچ کدام از دو ریزشبه در حالت اضافه بار و یا کم باری نباشند، هیچ انتقال توانی بین دو ریزشبه انجام نمی‌شود و توان شارژ نیز در این حالت صفر خواهد بود. در این حالت مبدل واسط خاموش بوده و هیچ تلفاتی ایجاد نخواهد کرد.
- اگر یکی از دو ریزشبه در حالت اضافه باری باشد و ریزشبه‌ی دیگر در حالت اضافه باری نباشد مبدل واسط توان را از ریزشبه‌ای که در شرایط اضافه باری نیست به ریزشبه‌ی اضافه بار شده انتقال می‌دهد تا جایی که ریزشبه‌ی انتقال دهنده‌ی توان خود در شرایط اضافه باری قرار نگیرد. در صورتی که این توان انتقال یافته جهت خروج ریزشبه‌ی اضافه بار شده کافی نباشد، باتری از طریق عمل دشارژ کمبود توان باقی مانده را جبران می‌کند.
- اگر هر دو ریزشبه در حالت اضافه بار قرار داشته باشند، باتری با عمل دشارژ، توان ذخیره شده‌ی خود را به دو ریزشبه‌ی اضافه بار شده انتقال می‌دهد. در این حالت یکی از دو ریزشبه در اولویت قرار می‌گیرد (که در اینجا ریزشبه‌ی DC در نظر گرفته شده است) و انتقال توان به این ریزشبه تا جایی انجام می‌شود که این ریزشبه از حالت اضافه باری خارج شود به شرطی که توان حداکثر دشارژ باتری بدین منظور کافی باشد. در صورتی که توان حداکثر دشارژ باتری از توان مورد نیاز جهت خروج ریزشبه‌ی دارای



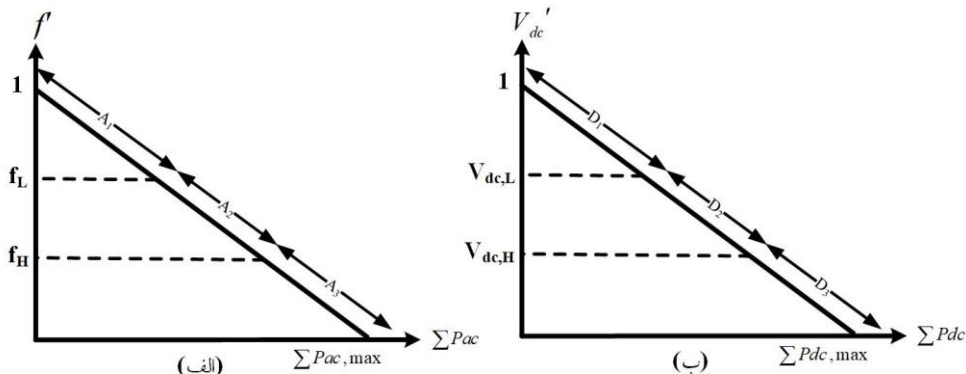
شکل (۵): منحنی افقی تجمعی منابع ریزشکله‌ی AC (شکل الف و ب) و ریزشکله‌ی DC (شکل ج)

دو ناحیه می‌باشند و جهت تقسیم عملکرد ریزشکله به سه ناحیه استفاده می‌شود. وقتی فرکانس (ولتاژ) اندازه‌گیری شده که به پریونیت تبدیل شده در ریزشکله‌ی AC (DC) بزرگتر از $(V_{dc,L})f_L$ باشد ریزشکله‌ی AC (DC) در حالت کم باری کار می‌کند که در شکل با A_1 (D₁) نشان داده شده است. وقتی فرکانس (ولتاژ) اندازه‌گیری شده بر حسب پریونیت بین $(V_{dc,L})f_L$ و $(V_{dc,H})f_H$ قرار گیرد ریزشکله‌ی AC (DC) در حالت میان باری کار می‌کند که در شکل با A_2 (D₂) نشان داده شده است. زمانی که فرکانس (ولتاژ) اندازه‌گیری شده بر حسب پریونیت کمتر از $(V_{dc,H})f_H$ باشد ریزشکله در پرباری کار می‌کند و در شکل با A_3 (D₃) نشان داده شده است. این سه حالت در ریزشکله‌ی AC و DC بصورت ریاضی به ترتیب در روابط (۸) و (۹) آمده است.

$$\begin{cases} f_L \leq f' & \text{Lightloading} \\ f_H < f' \leq f_L & \text{Mediumloading} \\ f' \leq f_H & \text{Heavyloading} \end{cases} \quad (۸)$$

$$\begin{cases} V_{dc,L} \leq V_{dc}' & \text{Lightloading} \\ V_{dc,H} < V_{dc}' \leq V_{dc,L} & \text{Mediumloading} \\ V_{dc}' \leq V_{dc,H} & \text{Heavyloading} \end{cases} \quad (۹)$$

با تقسیم عملکرد ریزشکله به سه ناحیه می‌توان به اهداف کنترلی مطلوب دست پیدا کرد. با توجه به اهداف کنترلی ذکر شده، می‌توان



شکل (۶): منحنی افقی تجمعی منابع ریزشکله‌ی AC و ریزشکله‌ی DC

واقع از ترکیب منحنی افقی تمامی منابع (که در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است) به دست می‌آید.

بنابراین با اندازه‌گیری این مقادیر می‌توان به طور غیر مستقیم ظرفیت باقی مانده‌ی هر کدام از ریزشکله‌ها را بدون استفاده از روابط مخابراتی محاسبه کرد.

پس از اندازه‌گیری فرکانس، ولتاژ AC و ولتاژ DC، با استفاده از روابط (۵)، (۶) و (۷)، مقادیر اندازه‌گیری شده به پریونیت تبدیل می‌شوند.

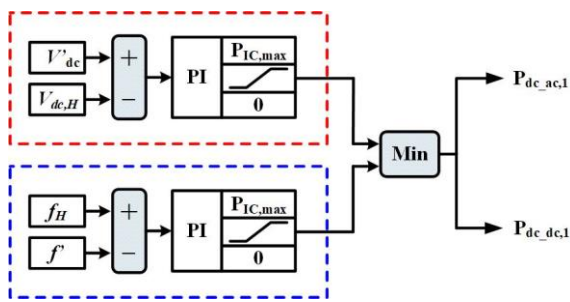
$$f' = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (۵)$$

$$V_{ac}' = \frac{V_{ac} - V_{ac,\min}}{V_{ac,\max} - V_{ac,\min}} \quad (۶)$$

$$V_{dc}' = \frac{V_{dc} - V_{dc,\min}}{V_{dc,\max} - V_{dc,\min}} \quad (۷)$$

که در روابط بالا، f ، V_{ac} و V_{dc} به ترتیب فرکانس، ولتاژ AC و ولتاژ DC اندازه‌گیری شده هستند. همچنین، f' ، V_{ac}' و V_{dc}' به ترتیب فرکانس، ولتاژ AC و ولتاژ DC بر حسب مقادیر پریونیت هستند. منحنی‌های پریونیت شده‌ی افقی P-f ریزشکله‌ی AC و افقی P-V ریزشکله‌ی DC در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود عملکرد هر کدام از ریزشکله‌ها به سه ناحیه تقسیم شده است. مقادیر f_L و $(V_{dc,L})f_L$ در ریزشکله‌ی AC (DC) مقادیر فرکانس (ولتاژ) مرزی بین



شکل (۷): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۱

از ریزشبه‌کی AC به ریزشبه‌کی DC انجام می‌شود. مقدار این انتقال توان بگونه‌ای است که ریزشبه‌کی DC را از حالت اضافه باری خارج کند به شرطی که ریزشبه‌کی AC خود در حالت اضافه باری قرار نگیرد. شکل ۸ نمودار کنترلی کنترلی در حالت ۲ را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، اگر ولتاژ اندازه‌گیری شده ترمینال DC سمت ریزشبه‌کی DC (بر حسب پریونیت) بیشتر از $V_{dc,H}$ باشد، ریزشبه‌کی DC در شرایط میان باری و یا کم باری قرار دارد و نیازی به انتقال توان به این ریزشبه‌کی نیست. در این شرایط نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین بالایی با توجه به وجود محدود کننده در خروجی کنترل کننده PI خروجی صفر می‌دهد و داریم: $P_{dc,ac,2} = P_{dc,dc,2} = 0$.

اگر ولتاژ اندازه‌گیری شده ترمینال DC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) کمتر از $V_{dc,H}$ باشد، ریزشبه‌کی DC در شرایط اضافه باری قرار دارد و نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین بالایی شکل ۸ خروجی غیر صفر می‌دهد و خروجی آن در این حالت بیانگر توان مورد نیاز ریزشبه‌کی DC جهت خروج این ریزشبه‌کی از شرایط اضافه باری است. انتقال توان در این حالت تا جایی مجاز است که ریزشبه‌کی AC در شرایط اضافه باری قرار نگیرد که این محدودیت در نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی در نظر گرفته شده است.

اگر ریزشبه‌کی DC در شرایط پرباری باشد اما ریزشبه‌کی AC نیز در شرایط پرباری باشد خروجی نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی با توجه به وجود محدود کننده صفر خواهد بود و در نهایت خواهیم داشت: $P_{dc,ac,2} = P_{dc,dc,2} = 0$. در این حالت کاری شارژ یا دشارژ باتری انجام نمی‌شود و همواره توان مبدل dc-ac و مبدل dc-dc یکسان خواهد بود. با توجه به اینکه جهت مثبت انتقال توان از ریزشبه‌کی DC به ریزشبه‌کی AC در نظر گرفته شده است و در این حالت جهت انتقال توان از ریزشبه‌کی AC به DC است از ضریب ۱- در خروجی استفاده شده است.

۴-۳- شارژ باتری

شارژ باتری تنها زمانی صورت می‌گیرد که حداقل یکی از ریزشبه‌کی‌ها در شرایط کم باری قرار داشته باشد و هیچکدام از دو ریزشبه‌کی در شرایط پرباری نباشد. در این شرایط که یکی از ریزشبه‌کی‌ها در شرایط

عملکرد مبدل واسط را به چهار حالت تقسیم کرد:

- انتقال از ریزشبه‌کی DC به ریزشبه‌کی AC
- انتقال از ریزشبه‌کی AC به ریزشبه‌کی DC
- شارژ باتری
- دشارژ باتری

در ادامه به نحوه‌ی کنترل مبدل واسط در هر کدام از حالت‌های بالا پرداخته می‌شود.

۴-۱- انتقال از ریزشبه‌کی DC به ریزشبه‌کی AC

انتقال توان از ریزشبه‌کی DC به ریزشبه‌کی AC زمانی انجام می‌شود که ریزشبه‌کی AC در حالت اضافه باری قرار داشته باشد و ریزشبه‌کی DC در شرایط کم باری و یا میان باری باشد. مقدار این انتقال توان بگونه‌ای است که ریزشبه‌کی AC را از حالت اضافه باری خارج کند به شرطی که ریزشبه‌کی DC خود در حالت اضافه باری قرار نگیرد. شکل ۷ نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۱ را نشان می‌دهد.

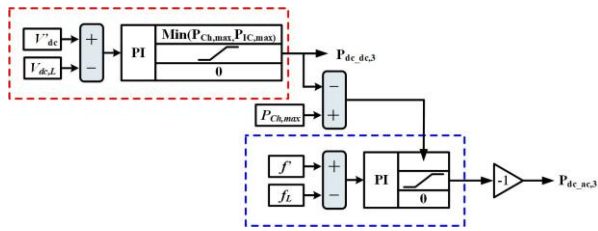
مطابق شکل ۷ اگر فرکانس اندازه‌گیری شده ترمینال AC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) بیشتر از f_H باشد به معنی این است که ریزشبه‌کی AC در شرایط میان باری و یا کم باری قرار دارد و نیازی به انتقال توان به این ریزشبه‌کی وجود ندارد. در این شرایط نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی با توجه به وجود محدود کننده در خروجی کنترل کننده PI خروجی صفر می‌شود و بنابراین داریم: $P_{dc,ac,1} = P_{dc,dc,1} = 0$.

زمانی که فرکانس اندازه‌گیری شده ترمینال AC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) کمتر از f_H باشد به معنی این است که ریزشبه‌کی AC در شرایط اضافه باری قرار دارد و نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی خروجی غیر صفر می‌دهد. خروجی نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی در این حالت بیانگر توان مورد نیاز ریزشبه‌کی AC جهت خروج این ریزشبه‌کی از شرایط اضافه باری است. انتقال توان در این حالت تا جایی ادامه می‌یابد که ریزشبه‌کی DC خود در شرایط اضافه باری قرار نگیرد که این محدودیت در نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین بالایی در نظر گرفته شده است.

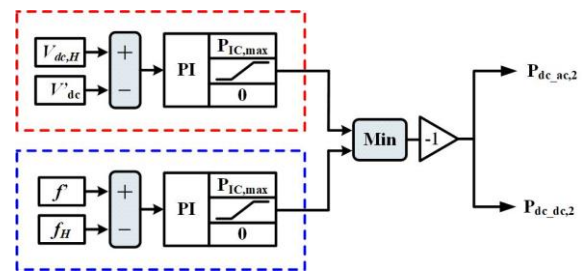
در صورتی که ریزشبه‌کی AC در شرایط پرباری باشد اما ریزشبه‌کی DC نیز در شرایط پرباری باشد خروجی نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین بالایی با توجه به وجود محدود کننده صفر خواهد بود و در نهایت خواهیم داشت: $P_{dc,ac,1} = P_{dc,dc,1} = 0$. در این حالت کاری شارژ یا دشارژ باتری انجام نمی‌شود و همواره توان مبدل dc-ac و مبدل dc-dc یکسان خواهد بود.

۴-۲- انتقال از ریزشبه‌کی AC به ریزشبه‌کی DC

زمانی که ریزشبه‌کی DC در حالت اضافه باری قرار داشته باشد و ریزشبه‌کی AC در شرایط کم باری و یا میان باری باشد، انتقال توان



شکل (۹): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۳



شکل (۸): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۲

پرباری را تعیین می‌کند. تفاضل توان انتقالی به ریزشبه‌ی DC و حداکثر توان مجاز دشارژ حد بالایی توان قابل انتقال به ریزشبه‌ی AC را تعیین می‌کند. در صورتی که این تفاضل غیر صفر باشد، ریزشبه‌ی AC نیز توسط عمل دشارژ باتری از حالت پرباری خارج می‌شود تا جایی که فرکانس (که در واقع بطور غیرمستقیم بیانگر توان مصرفی در ریزشبه‌ی AC است) برابر f_H شود.

در نهایت توان حقیقی انتقالی مرجع مربوط به مبدل dc-dc برابر مجموع P_{dc-dc1} تا P_{dc-dc4} است که آن را با $P_{ref,dc-dc}$ و توان انتقالی مرجع مبدل dc-ac برابر مجموع P_{dc-ac1} تا P_{dc-ac4} خواهد بود که آن را با $P_{ref,dc-ac}$ نشان می‌دهیم. با توجه به اینکه مقادیر مرجع بدست آمده بر حسب پریونیت است لازم است که توان انتقالی به دست آمده به توان بر حسب وات (یا کیلووات) تبدیل شود. وقتی توان مرجع مثبت باشد، بدین معنی است که انتقال توان از ریزشبه‌ی DC به AC انجام می‌شود و توان مرجع باید در $P_{dc,max}$ (حداکثر ظرفیت تولید ریزشبه‌ی DC) ضرب شود. اگر توان مرجع به دست آمده منفی باشد بدین معنی است که توان انتقالی از ریزشبه‌ی AC به DC است و توان مرجع در $P_{ac,max}$ (حداکثر ظرفیت تولید ریزشبه‌ی AC) ضرب می‌شود.

۴-۵- تامین توان راکتیو

مبدل dc-ac علاوه بر انتقال توان اکتیو می‌تواند در صورت وجود ظرفیت اضافه، توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC را نیز تامین کند. در روش پیشنهادی، تنها زمانی این مبدل در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC نقش دارد که این مبدل فعال بوده و انتقال توان اکتیو انجام دهد. بنابراین، زمانی که هر دو ریزشبه‌ی در شرایط میان باری باشند و مبدل dc-ac غیرفعال باشد، توان راکتیو این مبدل نیز صفر خواهد بود تا بازدهی سیستم افزایش پیدا کند. شکل ۱۱ نمودار بلوکی کنترلی در این حالت را نشان می‌دهد.

مقدار $1-V_{ac}$ زمانی که توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی صفر باشد برابر صفر و زمانی که توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی حداکثر باشد، برابر یک خواهد بود. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تولید توان راکتیو مبدل dc-ac بگونه‌ای است که این مبدل و ریزشبه‌ی AC از نظر پریونیت توان راکتیو یکسانی تولید کنند. لازم به ذکر است که این بلوک تنها زمانی فعال خواهد بود که مبدل dc-ac انتقال توان اکتیو انجام دهد.

کم باری است و ریزشبه‌ی دیگر در شرایط پرباری نیست توان شارژ از ریزشبه‌ی که در شرایط کم باری است به باتری انتقال می‌یابد.

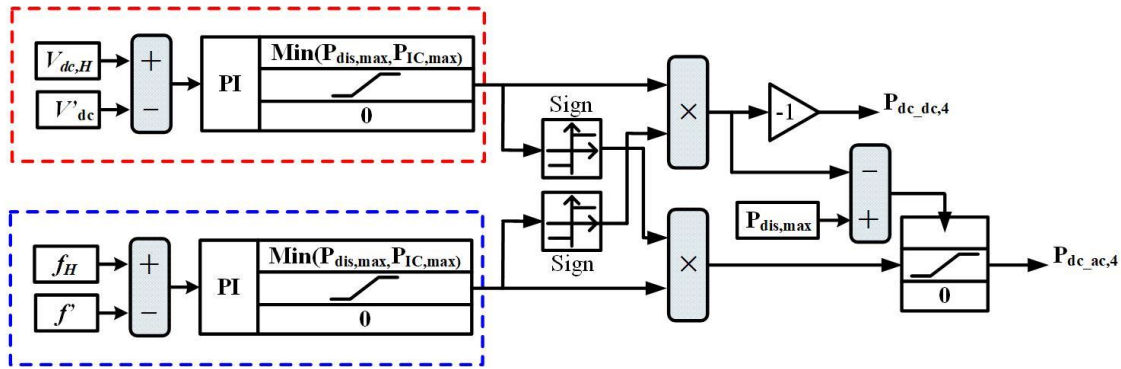
در صورتی که هر دو ریزشبه‌ی در شرایط کم باری باشند، شارژ باتری ابتدا توسط مبدل dc-dc انجام می‌شود تا تلفات حداقل شود. در صورتی که توان شارژ تامین شده توسط مبدل dc-dc از توان حداکثر مجاز شارژ کمتر باشد، مبدل dc-ac نیز توان اضافه‌ی ریزشبه‌ی AC را به باتری منتقل می‌کند. شکل ۹ نمودار بلوکی کنترلی در این حالت کاری را نشان می‌دهد.

طبق شکل ۹، $V_{dc} - V_{dc,L}$ بطور غیر مستقیم بیانگر ظرفیت اضافه در ناحیه‌ی کم باری ریزشبه‌ی DC است. خروجی نمودار بلوکی خط چین بالایی توان اضافه‌ی ریزشبه‌ی DC است که توسط محدود کننده بین دو مقدار محدود می‌شود. حد پایینی این محدود کننده صفر و حد بالایی آن حداقل مقدار بین حداکثر توان شارژ باتری و حداکثر توان قابل انتقال مبدل واسط است. در صورتی که توان شارژ حاصل از ریزشبه‌ی DC (خروجی نمودار بلوکی خط چین بالایی) کمتر از حداکثر توان شارژ باتری باشد و ریزشبه‌ی AC نیز در حالت کم باری باشد، توان اضافه‌ی ریزشبه‌ی AC نیز صرف شارژ باتری باس DC می‌شود که در نمودار بلوکی داخل خط چین پایینی شکل ۹ نشان داده شده است.

۴-۴- دشارژ باتری

دشارژ باتری زمانی انجام می‌شود که هر دو ریزشبه‌ی AC و DC در شرایط پرباری قرار داشته باشند. در روش پیشنهادی، ریزشبه‌ی DC در اولویت بوده و توان ذخیره شده در باتری به ریزشبه‌ی DC منتقل می‌شود تا آن را از شرایط پرباری خارج کند. در صورتی که این توان انتقالی کمتر از توان حداکثر دشارژ باشد، توان باتری علاوه بر انتقال به ریزشبه‌ی DC به ریزشبه‌ی AC نیز انتقال پیدا می‌کند تا این ریزشبه‌ی را نیز از شرایط پرباری خارج نماید. شکل ۱۰ نمودار بلوکی کنترلی در این حالت را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۰، اگر هر دو ریزشبه‌ی AC و DC در شرایط پرباری باشند $V_{dc,H} - V_{dc}$ و $f_H - f$ مثبت بوده و خروجی هر دو کنترل کننده‌ی PI مثبت است. در این شرایط بلوک Sign (که تابع علامت است) خروجی ۱ خواهد داشت و خروجی کنترل کننده‌ی PI بالایی مقدار مرجع توان مورد نیاز جهت خروج ریزشبه‌ی DC از شرایط



شکل (۱۰): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۴

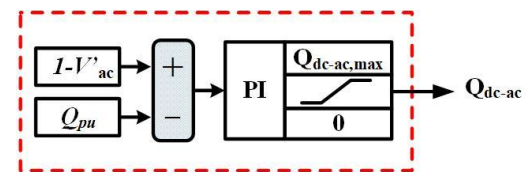
همانطور که مشاهده می‌شود، قبل از $t=2s$ که بار ریزشبه‌ی AC، ۲ کیلووات است، ۱ کیلووات از ریزشبه‌ی AC صرف شارژ باتری می‌شود و در نهایت توان انتقالی توسط مبدل dc-ac برابر ۱ کیلووات است (انتقال توان از ریزشبه‌ی DC به ریزشبه‌ی AC مثبت در نظر گرفته شده است). بنابراین، توان اکتیو ریزشبه‌ی AC ۳ کیلووات است. توان تولیدی ریزشبه‌ی DC نیز برابر توان بار این ریزشبه‌ی است که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بعد از افزایش بار در ریزشبه‌ی AC هر دو ریزشبه‌ی در شرایط میان باری قرار می‌گیرند و توانی بین دو ریزشبه‌ی منتقل نمی‌شود که این موضوع نیز در شکل ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است.

در $t < 2s$ از این آزمایش، مبدل dc-ac فعال بوده و در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC نیز مطابق شکل ۱۴ مشارکت می‌کند و با توجه به اینکه ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC یکسان در نظر گرفته شده است، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی AC یکسان است. در زمان $t > 2s$ که مبدل dc-ac خاموش است جهت کاهش تلفات توان مبدل dc-ac همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، نقشی در تامین توان راکتیو ندارد و توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC تماماً توسط منابع آن تامین می‌شود.

۵-۲- آزمایش ۲

آزمایش ۲ با اعمال بار ۵ کیلوواتی و ۴ کیلوواتی در ریزشبه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبه‌ی DC شروع می‌شود. در $t=2s$ بار ریزشبه‌ی AC به ۹ کیلووات و ۶ کیلووات افزایش پیدا می‌کند. با این افزایش بار ریزشبه‌ی AC از شرایط میان باری (شکل ۶) به حالت پر باری (شکل ۶) انتقال می‌یابد. توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC، توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و توان راکتیو منبع ریزشبه‌ی AC و مبدل dc-ac در این آزمایش به ترتیب در شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نشان داده شده است.

در این آزمایش، در $t < 2s$ هر دو ریزشبه‌ی در شرایط میان باری هستند و همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده بار هر ریزشبه‌ی



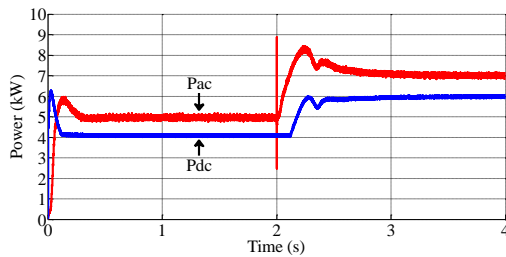
شکل (۱۱): نمودار بلوکی کنترلی مربوط به تامین توان راکتیو

۵- نتایج شبیه‌سازی

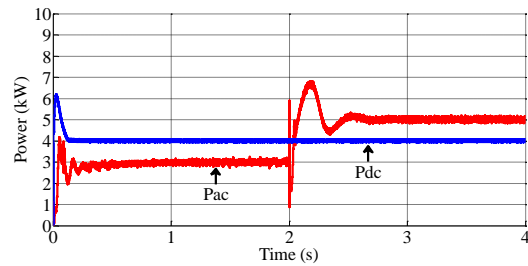
به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، ریزشبه‌ی ترکیبی شکل ۴ در نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است. ظرفیت ریزشبه‌ی AC برابر ۱۰ کیلووات و ۱۰ کیلووات، فرکانس آن در محدوده‌ی ۴۸ تا ۵۲ هرتز و ولتاژ در محدوده‌ی بین ۳۷۰ تا ۳۹۰ ولت است. ظرفیت ریزشبه‌ی DC نیز ۱۰ کیلووات و محدوده‌ی ولتاژی آن بین ۱۹۰ تا ۲۱۰ ولت در نظر گرفته شده است. ظرفیت مبدل dc-ac و dc-dc نیز ۱۰ کیلووات می‌باشد. حداکثر توان شارژ و دشارژ باتری برابر ۴ کیلووات است. در شبیه سازی ها داریم (بر حسب ریزشبه‌ی AC مثبت و توان شارژ باتری نیز مثبت در نظر می‌گیریم): $f_H=V_{dc,H}=0.7$ و $f_L=V_{dc,L}=0.3$. انتقال توان از ریزشبه‌ی گرفته شده است. نتایج شبیه سازی در آزمایش‌های زیر آمده است.

۵-۱- آزمایش ۱

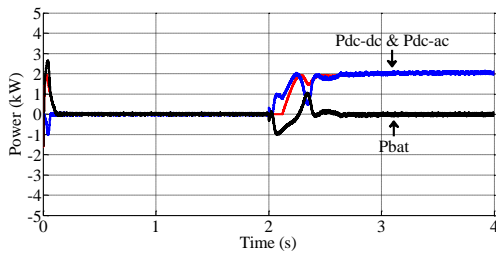
این آزمایش با اعمال بار ۲ کیلوواتی و ۲ کیلوواتی در ریزشبه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبه‌ی DC آغاز می‌شود. در زمان $t=2s$ بار ریزشبه‌ی AC به ۵ کیلووات و ۴ کیلووات افزایش پیدا می‌کند. در واقع با این افزایش بار، ریزشبه‌ی AC از شرایط کار کم باری (شکل ۶) به حالت میان باری (شکل ۶) انتقال می‌یابد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که منابع ریزشبه‌ی AC و DC، شکل ۱۳ توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و شکل ۱۴ توان راکتیو منبع ریزشبه‌ی AC و مبدل dc-ac را در این آزمایش نشان می‌دهد.



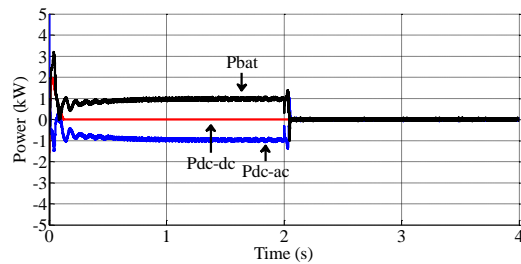
شکل (۱۵): توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC در آزمایش ۲



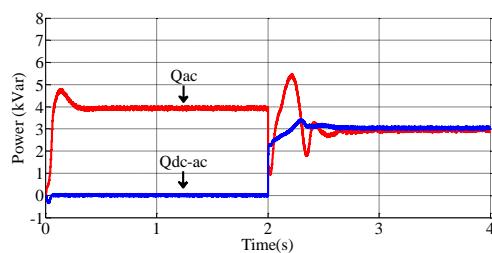
شکل (۱۲): توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC در آزمایش ۱



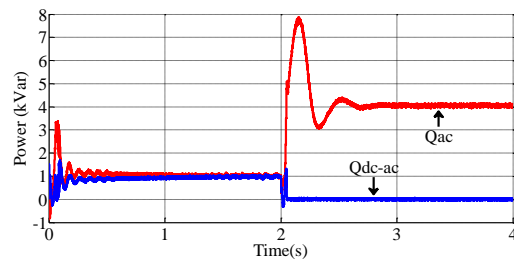
شکل (۱۶): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژ باتری در آزمایش ۲



شکل (۱۳): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژ باتری در آزمایش ۱



شکل (۱۷): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC در آزمایش ۲



شکل (۱۴): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC در آزمایش ۱

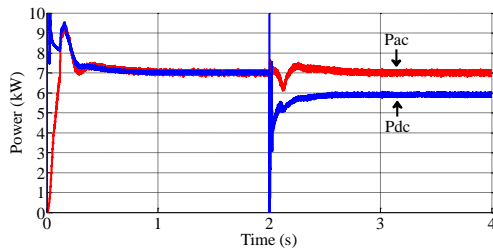
۵-۳- آزمایش ۳

آزمایش ۳ با اعمال بار ۹ کیلوواتی و ۶ کیلوواری در ریزشبه‌ی AC و ۴ کیلوواتی در ریزشبه‌ی DC شروع می‌شود. در $t=2s$ بار ریزشبه‌ی DC به ۸ کیلووات افزایش پیدا می‌کند. این افزایش بار ریزشبه‌ی DC را از شرایط میان باری (شکل ۶) به حالت پر باری (شکل ۶) می‌برد. شکل ۱۸ توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC، شکل ۱۹ توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و شکل ۲۰ توان راکتیو منبع ریزشبه‌ی AC و مبدل dc-ac را در آزمایش ۳ نشان می‌دهد.

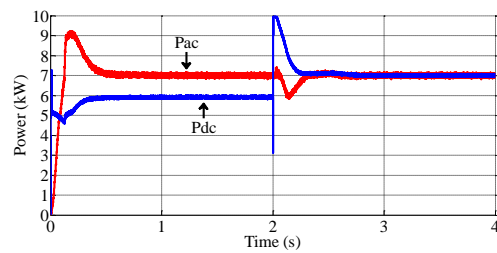
در $t < 2s$ با توجه به اضافه بار بودن ریزشبه‌ی AC توان از ریزشبه‌ی DC به AC انتقال پیدا می‌کند. در $t > 2s$ که هر دو ریزشبه در پر باری هستند، باتری دشارژ شده و توان از باتری به دو ریزشبه انتقال پیدا می‌کند تا دو ریزشبه را همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، از پر باری خارج کند. توان انتقالی به ریزشبه‌ی AC در این حالت ۲ کیلووات و توان انتقالی به ریزشبه‌ی DC در این

توسط منابع همان ریزشبه تامین می‌شود و مطابق شکل ۱۶ توان انتقالی بین دو ریزشبه صفر است. بعد از افزایش بار در زمان $t=2s$ ، ریزشبه‌ی AC در شرایط پر باری قرار می‌گیرد. در این حالت، با توجه به اینکه ریزشبه‌ی DC در شرایط میان باری است، توان از ریزشبه‌ی DC به ریزشبه‌ی AC انتقال می‌یابد تا ریزشبه‌ی AC را از شرایط پر باری خارج کند. توان انتقالی در این حالت مطابق شکل ۱۶ برابر ۲ کیلووات است. این انتقال توان باعث می‌شود ریزشبه‌ی AC از پر باری خارج شود. توان منابع در این ریزشبه مطابق شکل ۱۵ برابر ۷ کیلووات است.

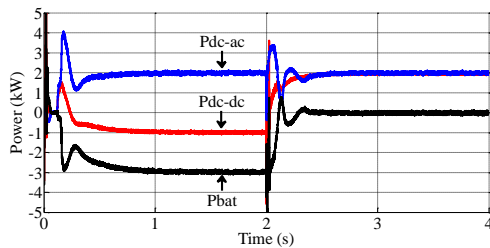
در $t < 2s$ ، که مبدل dc-ac غیرفعال است، این مبدل نقشی در تامین توان راکتیو ندارد. در $t > 2s$ که مبدل dc-ac فعال بوده و از ریزشبه‌ی AC به DC انتقال توان انجام می‌دهد، در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC طبق شکل ۱۷ سهم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی AC یکسان است.



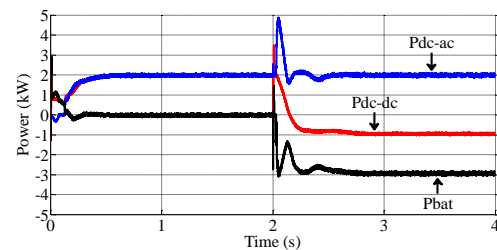
شکل (۲۱): توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC در آزمایش ۴



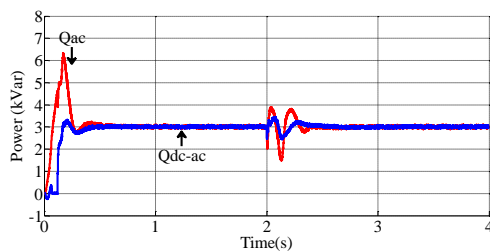
شکل (۱۸): توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC در آزمایش ۳



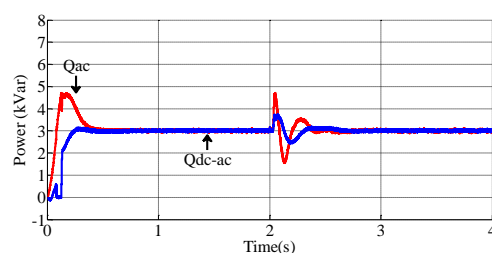
شکل (۲۲): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژر باتری در آزمایش ۴



شکل (۱۹): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژر باتری در آزمایش ۳



شکل (۲۳): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC در آزمایش ۴



شکل (۲۰): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC در آزمایش ۳

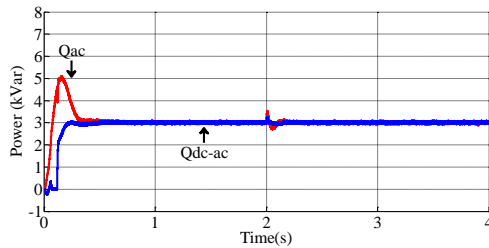
در $t < 2$ s با توجه به اضافه بار بودن هر دو ریزشبه‌ی، هر دو ریزشبه‌ی از طریق دشارژر باتری از شرایط پرباری خارج می‌شوند. در $t > 2$ s که ریزشبه‌ی DC از شرایط پرباری خارج می‌شود، بار مورد نیاز ریزشبه‌ی AC جهت خروج از شرایط پرباری (۲ کیلووات) از ریزشبه‌ی DC به ریزشبه‌ی AC انتقال پیدا می‌کند و توان تولیدی منابع ریزشبه‌ی DC به ۶ کیلووات افزایش و توان تولیدی منابع ریزشبه‌ی AC به ۷ کیلووات کاهش پیدا می‌کند که در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در این حالت همانطور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است توان باتری صفر است.

مشابه آزمایش قبل، با توجه به فعال بودن مبدل dc-ac در تمام مدت شبیه سازی، این مبدل در تمام مدت شبیه سازی در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC طبق شکل ۲۳ سهیم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی AC یکسان است.

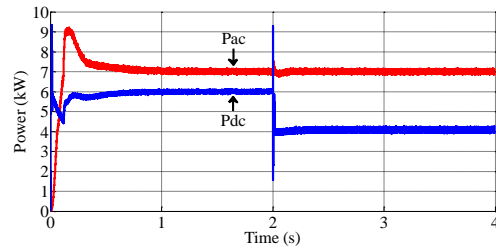
حالت ۱ کیلووات است و در نتیجه توان دشارژر باتری ۳ کیلووات است که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در این آزمایش، با توجه به اینکه مبدل dc-ac در تمام مدت شبیه سازی فعال است بنابراین در تمام مدت آزمایش در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC طبق شکل ۲۰ سهیم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبه‌ی AC یکسان است.

۴-۵- آزمایش ۴

این آزمایش با اعمال بار ۹ کیلوواتی و ۶ کیلوواتی در ریزشبه‌ی AC و بار ۸ کیلوواتی در ریزشبه‌ی DC آغاز می‌شود. در زمان $t=2$ s بار ریزشبه‌ی DC به ۴ کیلووات کاهش پیدا می‌کند و ریزشبه‌ی DC از شرایط پرباری به میان باری تغییر پیدا می‌کند. توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC، توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژر باتری و توان راکتیو منبع ریزشبه‌ی AC و مبدل dc-ac در این آزمایش به ترتیب در شکل ۲۱، شکل ۲۲ و شکل ۲۳ نشان داده شده است.



شکل (۲۶): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبه‌ی AC در آزمایش ۵



شکل (۲۴): توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC در آزمایش ۵

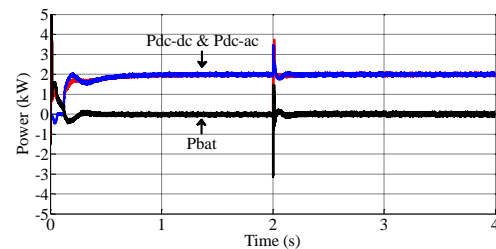
در جدول ۲ جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی به همراه توضیحات مربوطه ذکر شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل و مدیریت توان مبدل واسط ارتباط دهنده ریزشبه‌ی DC و ریزشبه‌ی AC در یک ریزشبه‌ی ترکیبی بررسی شد. بدین منظور ابتدا استراتژی کنترلی مبدل واسط با هدف نیل به حداکثر بازده ارائه گردید. سپس، به منظور محقق کردن استراتژی‌های کنترلی تعریف شده، عملکرد هر ریزشبه به سه ناحیه کم باری، میان باری و پر باری تقسیم شد. مبدل واسط با اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس سمت AC و نیز ولتاژ سمت DC وضعیت بارگذاری هر ریزشبه را مشخص کرده و بسته به اینکه هر کدام از ریزشبه‌ها در کدام ناحیه است ۴ حالت کاری امکان پذیر است که عبارتند از: انتقال توان از ریزشبه‌ی DC به AC، انتقال توان از ریزشبه‌ی AC به DC، شارژ باتری و دشارژ باتری و برای هر کدام از مدهای کاری استراتژی کنترلی مناسب ارائه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری عملکرد مطلوب روش پیشنهادی را نشان داد.

مراجع

- [1] Javadi S, Rezaei N, Hesami Naghshbandi A. Design of a New Differential Protection scheme for DC Microgrids Based on Fault Current Components. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2022; 19 (1): 139-147
- [2] Babaie M, Rezvani M, N. Shirazi A, Yousefi B. A distributed finite-time secondary average controller for voltage regulation and power sharing in AC microgrids. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (4): 113-122
- [3] Veisi M, Adabi F, Kavousi-Fard A. Operation of Grid-Connected Multi-Microgrids Constrained to Participation in the Energy and Ancillary Services Markets Considering Uncertainties of Generation and Load. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (4): 101-111



شکل (۲۵): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژ باتری در آزمایش ۵

۵-۵- آزمایش ۵

این آزمایش با اعمال بار ۹ کیلوواتی و ۶ کیلوواتی در ریزشبه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبه‌ی DC آغاز می‌شود. در زمان $t=2s$ بار ریزشبه‌ی DC به ۲ کیلووات کاهش پیدا می‌کند و ریزشبه‌ی DC از شرایط میان باری به کم باری تغییر پیدا می‌کند. توان منابع ریزشبه‌ی AC و DC، توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و توان راکتیو منبع ریزشبه‌ی AC و مبدل dc-ac در این آزمایش به ترتیب در شکل ۲۴، شکل ۲۵ و شکل ۲۶ نشان داده شده است.

در $t < 2s$ با توجه به پر باری ریزشبه‌ی AC و میان باری ریزشبه‌ی DC انتقال توان از ریزشبه‌ی DC به AC انتقال می‌یابد. در $t > 2s$ که ریزشبه‌ی DC وارد شرایط کم باری می‌شود، بار مورد نیاز ریزشبه‌ی AC جهت خروج از شرایط پر باری از ریزشبه‌ی DC به ریزشبه‌ی AC انتقال پیدا می‌کند (مشابه آزمایش ۴) و توان تولیدی منابع ریزشبه‌ی DC به ۴ کیلووات افزایش و توان تولیدی منابع ریزشبه‌ی AC به ۷ کیلووات کاهش پیدا می‌کند که در شکل ۲۴ نشان داده شده است. در این حالت توان شارژ باتری صفر است که در شکل ۲۵ نشان داده شده است.

مشابه دو آزمایش قبل، مبدل dc-ac در تمام مدت شبیه‌سازی در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC طبق شکل ۲۶ سهیم می‌باشد و نیمی از توان راکتیو مورد نیاز ریزشبه‌ی AC را تامین می‌کند.

جدول (۲): جمع بندی نتایج شبیه سازی

حالت بهینه عملکردی	شرایط آزمایش		شماره آزمایش
	ریزشبکه AC	ریزشبکه DC	
وقتی ریزشبکه AC در شرایط کم‌باری قرار دارد، توان مازاد آن صرف شارژ باتری مبدل واسط می‌شود. در این بازه، مبدل واسط بخشی از توان راکتیو ریزشبکه AC را نیز تامین می‌کند.	از کم‌باری به میان باری	میان باری	۱
وقتی ریزشبکه AC در شرایط پرباری قرار می‌گیرد، توان ریزشبکه DC از طریق مبدل واسط به ریزشبکه AC منتقل می‌شود تا آن را از شرایط پرباری خارج کند. در این بازه، مبدل واسط بخشی از توان راکتیو ریزشبکه AC را نیز تامین می‌کند.	از میان باری به پرباری	میان باری	۲
وقتی ریزشبکه DC در شرایط میان‌باری قرار دارد، توان ریزشبکه DC از طریق مبدل واسط به ریزشبکه AC منتقل می‌شود تا آن را از شرایط پرباری خارج کند. وقتی هر دو ریزشبکه در پرباری قرار دارند، توان باتری از طریق مبدل‌ها به ریزشبکه DC و AC منتقل می‌شود تا آنها را از پرباری خارج کند. با توجه به فعال بودن مبدل واسط، در تمام بازه، مبدل واسط بخشی از توان راکتیو ریزشبکه AC را نیز تامین می‌کند.	پرباری	از میان باری به پرباری	۳
وقتی هر دو ریزشبکه در پرباری قرار دارند، توان باتری از طریق مبدل‌ها به ریزشبکه DC و AC منتقل می‌شود تا آنها را از پرباری خارج کند. وقتی ریزشبکه DC در شرایط میان باری قرار می‌گیرد، توان ریزشبکه DC از طریق مبدل واسط به ریزشبکه AC منتقل می‌شود تا آن را از شرایط پرباری خارج کند. با توجه به فعال بودن مبدل واسط، در تمام بازه، مبدل واسط بخشی از توان راکتیو ریزشبکه AC را نیز تامین می‌کند.	پرباری	از پرباری به میان باری	۴
توان ریزشبکه DC از طریق مبدل واسط به ریزشبکه AC منتقل می‌شود تا آن را از شرایط پرباری خارج کند. با توجه به فعال بودن مبدل واسط، در تمام بازه، مبدل واسط بخشی از توان راکتیو ریزشبکه AC را نیز تامین می‌کند.	پرباری	از میان باری به کم‌باری	۵

- [9] Z. Liang, Z. Dong, C. Li, C. Wu and H. Chen, "A Data-Driven Convex Model for Hybrid Microgrid Operation with Bidirectional Converters", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 2, pp. 1313-1316, 2023.
- [10] J. Duan, Z. Yi, D. Shi, C. Lin, X. Lu and Z. Wang, "Reinforcement-Learning-Based Optimal Control of Hybrid Energy Storage Systems in Hybrid AC-DC Microgrids", in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 9, pp. 5355-5364, 2019.
- [11] J. Wang, C. Jin and P. Wang, "A Uniform Control Strategy for the Interlinking Converter in Hierarchical Controlled Hybrid AC/DC Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 8, pp. 6188-6197, Aug. 2018.
- [12] L. Wang, X. Fu and M. -C. Wong, "Operation and Control of a Hybrid Coupled Interlinking Converter for Hybrid AC/Low Voltage DC Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 8, pp. 7104-7114, Aug. 2021.
- [13] B. Papari et al., "Distributed Control in Hybrid AC-DC Microgrids Based on a Hybrid MCSA-ADMM Algorithm", IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 2, pp. 121-130, 2021.
- [14] S. Peyghami, H. Mokhtari and F. Blaabjerg, "Autonomous Operation of a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Interlinking Converters", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6480-6488, 2018.
- [4] Lorzadeh I, Askarian Abyaneh H, Savaghebi M S. Hierarchical Control for Accurate Sharing of Reactive Power and Harmonic Currents in Islanded Microgrids based on Instantaneous Circulating Currents. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2016; 13 (3) :57-72
- [5] Biglarahmadi, M., Ketabi, A., Baghaee, H.R., Guerrero, J.M., "Integrated Nonlinear Hierarchical Control and Management of Hybrid AC/DC Microgrids", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 902-913, 2022.
- [6] S. Patel, A. Ketabi, H.R. Baghaee, J.M. Guerrero, "Effective Power Management Strategy and Control of a Hybrid Microgrid with Hybrid Energy Storage Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 59, No. 6, pp. 7341-7355, 2023.
- [7] A. Kirakosyan, E. F. El-Saadany, M. S. E. Moursi, A. H. Yazdavar and A. Al-Durra, "Communication-Free Current Sharing Control Strategy for DC Microgrids and Its Application for AC/DC Hybrid Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 1, pp. 140-151, 2020.
- [8] M. Zolfaghari, M. Abedi and G. B. Gharehpetian, "Power Flow Control of Interconnected AC-DC Microgrids in Grid-Connected Hybrid Microgrids Using Modified UIPC", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6298-6307, 2019.

- [15] Y. Xia, W. Wei, M. Yu, X. Wang and Y. Peng, "Power Management for a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Subgrids", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, pp. 3520-3533, 2018.
- [16] A. Gupta, S. Doolla and K. Chatterjee, "Hybrid AC-DC Microgrid: Systematic Evaluation of Control Strategies", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3830-3843, July 2018.
- [17] Z. Yi, W. Dong and A. H. Etemadi, "A Unified Control and Power Management Scheme for PV-Battery-Based Hybrid Microgrids for Both Grid-Connected and Islanded Modes", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5975-5985, 2018.
- [18] S. K. Sahoo, A. K. Sinha and N. K. Kishore, "Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 738-759, 2018.
- [19] S. Patel, A. Ghosh, P. K. Ray and V. Gurugubelli, "Effective Power Management Strategy and Control of a Hybrid Microgrid with Hybrid Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 6, pp. 7341-7355, 2023.
- [20] A. Hussain, V. -H. Bui and H. -M. Kim, "Resilience-Oriented Optimal Operation of Networked Hybrid Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 204-215, 2019.
- [21] B. Papari, C. S. Edrington, I. Bhattacharya and G. Radman, "Effective Energy Management of Hybrid AC-DC Microgrids With Storage Devices", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 193-203, 2019.
- [22] P. Yang, Y. Xia, M. Yu, W. Wei and Y. Peng, "A Decentralized Coordination Control Method for Parallel Bidirectional Power Converters in a Hybrid AC-DC Microgrid", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6217-6228, 2018.
- [23] X. Li et al., "A Unified Control for the DC-AC Interlinking Converters in Hybrid AC/DC Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6540-6553, 2018.
- [24] P. S. Kumar, R. P. S. Chandrasena, V. Ramu, G. N. Srinivas and K. V. S. M. Babu, "Energy Management System for Small Scale Hybrid Wind Solar Battery Based Microgrid", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8336-8345, 2020.
- [25] K. Zhang, M. Su, Z. Liu, H. Han, X. Zhang and P. Wang, "A Distributed Coordination Control for Islanded Hybrid AC/DC Microgrid", *IEEE Systems Journal*, vol. 17, pp. 1819-1830, 2023.
- [26] J. Chang, S. Chae and G. Lee, "Distributed Optimal Power Sharing Strategy in an Islanded Hybrid AC/DC Microgrid to Improve Efficiency", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38 pp. 724-737, 2023.