Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.3

An Algorithm to Control Interlinking Converter in a Hybrid Microgrid

Amir Khorsandi[1]

[1]Assistant 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۳-۱۶

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.3

ارائه الگوریتمی جهت کنترل مبدل واسط در ریزشبکه 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 ریزشبکه ارائه شده است. ریزشبکه 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. ریزشبکه می‌تواند در حالت متصل به شبکه یا جدا از شبکه کار کند. ریزشبکه دارای دو نوع DC و AC می‌باشد. ریزشبکه ترکیبی شامل یک ریزشبکه AC، یک ریزشبکه DC و یک مبدل واسط بین این دو ریزشبکه است. برای عملکرد بهینه ریزشبکه ترکیبی لازم است که مبدل واسط به درستی کنترل شود. در این مقاله، یک روش جهت کنترل و مدیریت توان مبدل واسط بین دو ریزشبکه پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، با اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس در ترمینال سمت AC و نیز اندازه گیری ولتاژ در ترمینال سمت DC وضعیت بار دو ریزشبکه ارزیابی می‌شود و بسته به استراتژی‌های کنترلی اخذ شده، انتقال توان بین دو ریزشبکه 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 دهنده‌ی عملکرد مطلوب روش پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: ریزشبکه 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

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 دوجهته 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]. ازطرفی، 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 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.

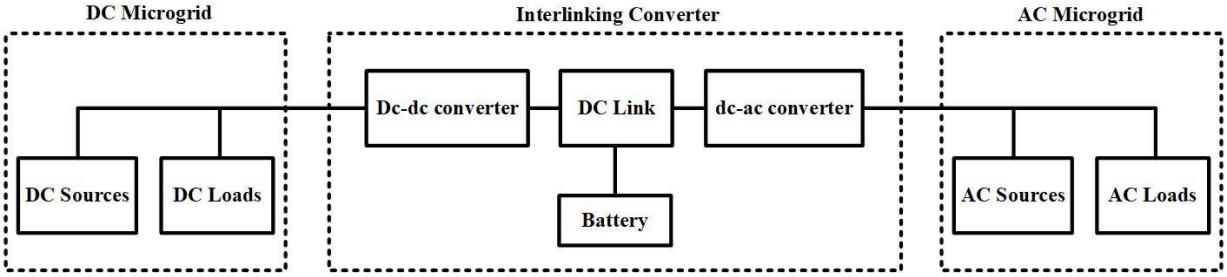
در مراجع [۱۲-۲۶] به نحوه‌ی تبادل توان بین ریزشبکه‌های AC و DC پرداخته شده است. در این مراجع یک روش کنترل افتی برای مبدل واسط بین دو ریزشبکه پیشنهاد شده است. در [۱۲] جهت کنترل مبدل واسط بین ریزشبکه‌های AC و DC از یک مبدل DC-DC و یک مبدل AC-DC بهره جسته است و در دو حالت، کنترل مبدل واسط بررسی شده است. 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 دخیره انرژی نقش بافر انرژی را بازی می‌کند و باعث می‌شود شبکه در برابر تغییرات ناگهانی بار مقاوم‌تر شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

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 ریزشبکه‌ها	استفاده از مبدل واسط جهت جبران سازی توان راکتیو	در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع تجدیدپذیر	در نظر گرفتن چند مبدل واسط	عدم استفاده از لینک مخابراتی
[۲۱]				✓		✓
[۲۲]					✓	✓
[۲۳]					✓	✓
[۲۴]						✓
[۲۵]						
[۲۶]			✓			
روش پیشنهادی	✓	✓	✓			✓



شکل (۱): ساختار ریزشبکه‌ی ترکیبی مورد مطالعه

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 ریزشبکه نیازمند تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. این مبدل نقش اساسی در عملکرد صحیح ریزشبکه‌ی ترکیبی داشته و لازم است تا حد امکان بصورت غیرمتمرکز کنترل شود. در این مقاله با توجه به اهمیت کنترل مبدل واسط ریزشبکه ترکیبی، ابتدا اهداف کنترلی مبدل واسط بین دو ریزشبکه 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 ریزشبکه ترکیبی مورد مطالعه

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

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

۲-۱- ریزشبکه‌ی AC

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

$$f_{ref} = f_{\max} + m_x P_{ac_x} \qquad (۱)$$

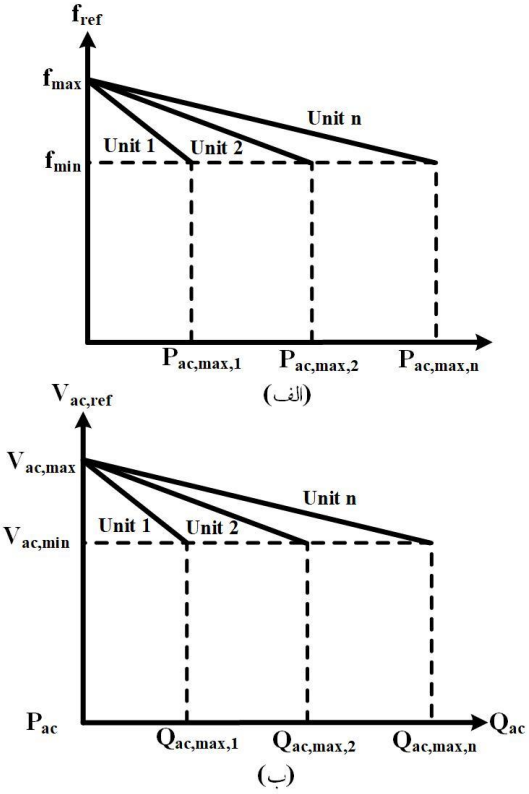
که $f_{\max}$ فرکانس نامی، $P_{ac\text{-}x}$ توان حقیقی منبع x-ام و m_x ضریب افتی مربوط به توان اکتیو منبع x-ام است که بصورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$m_x = \frac{f_{\min} - f_{\max}}{P_{ac_x,\max}} \qquad (۲)$$

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



شکل (۲): منحنی افتی منابع ریزشبکه‌ی AC

AC تنها یک فرکانس وجود دارد که این تک فرکانس توان تولیدی هر کدام از منابع تولیدی ریزشبکه‌ی AC را تعیین می‌کند.

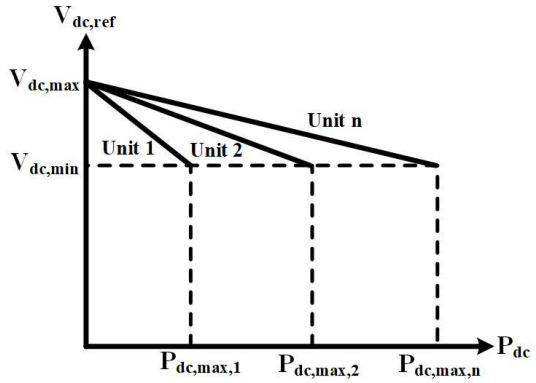
جهت تقسیم توان راکتیو در این ریزشبکه، از رابطه افتی Q-V استفاده می‌شود که در شکل ۲-ب نشان داده شده است که طبق رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۷]:

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

که $V_{ac,\max}$ فرکانس نامی، $Q_{ac\text{-}x}$ 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 ریزشبکه یکسان است ولتاژ به دلیل افت کابل‌ها در سرتاسر ریزشبکه 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 (۳): منحنی افتی منابع ریزشبکه‌ی DC

۲-۲- ریزشبکه DC

ریزشبکه‌ی DC را می‌توان شکل ساده شده‌ی ریزشبکه‌ی AC در نظر گرفت که در آن توان راکتیو و فرکانس صفر شده است. جهت تقسیم توان بین منابع ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی DC به AC نیاز باشد هر دو مبدل فعال می‌باشند و توان یکسانی را از ریزشبکه‌ی DC به AC انتقال می‌دهد. بطور مشابه وقتی انتقال توان از ریزشبکه‌ی AC به DC نیاز باشد، مجددا 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.

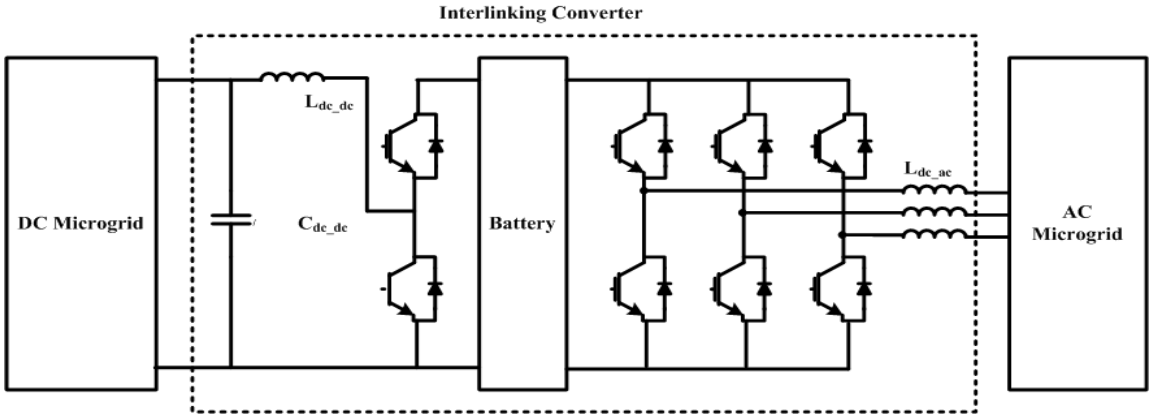
۳- استراتژی کنترلی مبدل واسط

چالش اساسی ریزشبکه‌ی ترکیبی کنترل و مدیریت صحیح توان مبدل واسط است که دو ریزشبکه 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 ریزشبکه در حالت کم باری قرار دارند ظرفیت اضافه‌ی هر کدام از ریزشبکه‌ها صرف شارژ باتری موجود در باس DC شود. با توجه به بازده بیشتر مبدل dc-dc در مقایسه با مبدل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



شکل (۴): ساختار مبدل واسط

dc-ac، در صورتی که حداکثر توان مجاز شارژ باتری از توان اضافه‌ی ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی DC بیشتر باشد توان اضافه‌ی هر دو ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه در حالت کم باری قرار داشته باشد و ریزشبکه‌ی دیگر در حالت پرباری نباشد، توان اضافه‌ی ریزشبکه‌ای که در حالت کم باری قرار دارد صرف شارژ باتری موجود در باس DC می‌شود.
- در صورتی که بار هر دو ریزشبکه در حالت نرمال خود قرار داشته باشد بگونه‌ای که هیچ کدام از دو ریزشبکه در حالت اضافه بار و یا کم باری نباشند، هیچ انتقال توانی بین دو ریزشبکه 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 ریزشبکه در حالت اضافه باری باشد و ریزشبکه‌ی دیگر در حالت اضافه باری نباشد مبدل واسط توان را از ریزشبکه‌ای که در شرایط اضافه باری نیست به ریزشبکه‌ی اضافه بار شده انتقال می‌دهد تا جایی که ریزشبکه‌ی انتقال دهنده‌ی توان خود در شرایط اضافه باری قرار نگیرد. در صورتی که این توان انتقال یافته جهت خروج ریزشبکه‌ی اضافه بار شده کافی نباشد، باتری از طریق عمل دشارژ کمبود توان باقی مانده را جبران می‌کند.
- اگر هر دو ریزشبکه در حالت اضافه بار قرار داشته باشند، باتری با عمل دشارژ، توان ذخیره شده‌ی خود را به دو ریزشبکه‌ی اضافه بار شده انتقال می‌دهد. در این حالت یکی از دو ریزشبکه در اولویت قرار می‌گیرد (که در اینجا ریزشبکه‌ی DC در نظر گرفته شده است) و انتقال توان به این ریزشبکه تا جایی انجام می‌شود که این ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ی دارای اولویت از حالت اضافه باری بیشتر باشد، توان باقی مانده‌ی باتری به ریزشبکه‌ی دیگر انتقال پیدا می‌کند تا جایی که این ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ی 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.

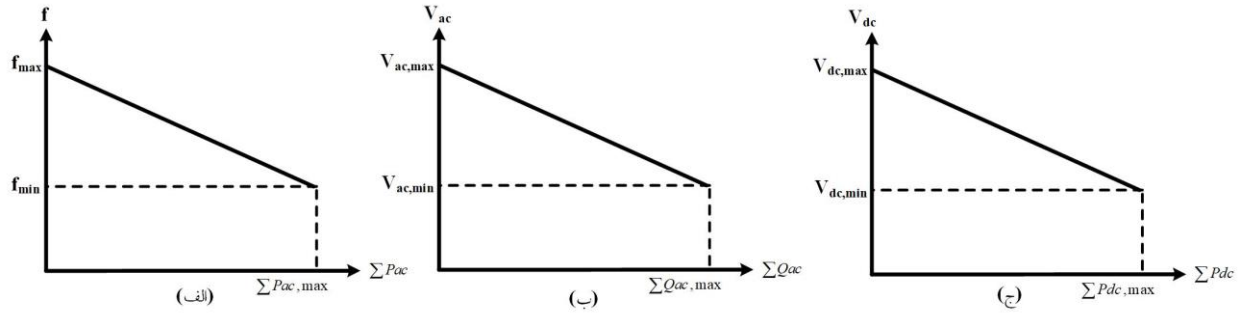
۴- کنترل مبدل واسط

دستیابی به اهداف کنترلی ذکر شده منوط به اطلاع از وضعیت بار هر کدام از دو ریزشبکه است. وضعیت بار و ظرفیت باقی مانده‌ی هر کدام از ریزشبکه‌ها را می‌توان به طور غیر مستقیم با اندازه گیری ولتاژ و فرکانس ترمینال سمت ریزشبکه‌ی AC و نیز ولتاژ ترمینال سمت ریزشبکه‌ی DC تعیین کرد. با استفاده از اندازه گیری فرکانس و ولتاژ ترمینال سمت ریزشبکه‌ی AC می‌توان از وضعیت بار اکتیو و راکتیو ریزشبکه‌ی AC و ظرفیت تولید باقی مانده‌ی آن اطلاع پیدا کرد. همچنین با اندازه گیری ولتاژ ترمینال سمت ریزشبکه‌ی DC می‌توان از وضعیت بار در ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ها مقدور نیست. البته این کنترل افتی‌ها تنها جهت تقسیم توان بین منابع داخل ریزشبکه مورد استفاده قرار می گیرد 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 P-f و Q-V تجمعی حاصل از همه‌ی منابع موجود در ریزشبکه‌ی AC و نیز شکل افتی ترکیبی ریزشبکه‌ی DC را نشان می‌دهد. این خطوط افتی در

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



شکل (۵): منحنی افتی تجمعی منابع ریزشبکه‌ی AC (شکل الف و ب) و ریزشبکه‌ی DC (شکل ج)

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

بنابراین با اندازه گیری این مقادیر می‌توان به طور غیر مستقیم ظرفیت باقی مانده‌ی هر کدام از ریزشبکه‌ها را بدون استفاده از رابط مخابراتی محاسبه کرد.

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

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

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

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

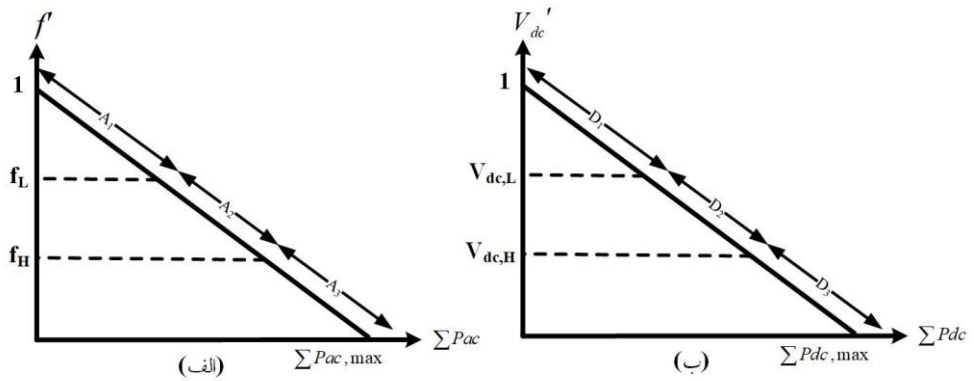
که در روابط بالا، f، V_{ac} و V_{dc} به ترتیب فرکانس، ولتاژ AC و ولتاژ DC اندازه گیری شده هستند. همچنین، f'، V'_{ac} و V'_{dc} به ترتیب فرکانس، ولتاژ AC و ولتاژ DC بر حسب مقادیر پریونیت هستند. منحنی‌های پریونیت شده‌ی افتی P-f ریزشبکه‌ی AC و افتی P-V ریزشبکه‌ی DC در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود عملکرد هر کدام از ریزشبکه‌ها به سه ناحیه تقسیم شده است. مقادیر f_L ($V_{dc,L}$) و f_H ($V_{dc,H}$) در ریزشبکه‌ی AC (DC) مقادیر فرکانس (ولتاژ) مرزی بین دو ناحیه می‌باشند و جهت تقسیم عملکرد ریزشبکه به سه ناحیه استفاده می‌شود. وقتی فرکانس (ولتاژ) اندازه گیری شده که به پریونیت تبدیل شده در ریزشبکه‌ی AC (DC) بزرگتر از f_L ($V_{dc,L}$) باشد ریزشبکه‌ی AC (DC) در حالت کم باری کار می‌کند که در شکل با A_1 (D_1) نشان داده شده است. وقتی فرکانس (ولتاژ) اندازه گیری شده بر حسب پریونیت بین f_L ($V_{dc,L}$) و f_H ($V_{dc,H}$) قرار گیرد ریزشبکه‌ی AC (DC) در حالت میان باری کار می‌کند که در شکل با A_2 (D_2) نشان داده شده است. زمانی که فرکانس (ولتاژ) اندازه گیری شده بر حسب پریونیت کمتر از f_H ($V_{dc,H}$) باشد ریزشبکه در پرباری کار می‌کند و در شکل با A_3 (D_3) نشان داده شده است. این سه حالت در ریزشبکه‌ی AC و DC بصورت ریاضی به ترتیب در روابط (۸) و (۹) آمده است.

$$\begin{cases} f_L \le f' & Light loading \\ f_H < f' \le f_L & Medium loading \\ f' \le f_H & Heavy loading \end{cases} \quad (۸)$$

$$\begin{cases} V_{dc,L} \le V_{dc}' & Light loading \\ V_{dc,H} < V_{dc}' \le V_{dc,L} & Medium loading \\ V_{dc}' \le V_{dc,H} & Heavy loading \end{cases} \quad (۹)$$

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



شکل (۶): منحنی افتی تجمعی منابع ریزشبکه‌ی AC و ریزشبکه‌ی DC

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

عملکرد مبدل واسط را به چهار حالت تقسیم کرد:

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

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

۴-۱- انتقال از ریزشبکه‌ی DC به ریزشبکه‌ی AC

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

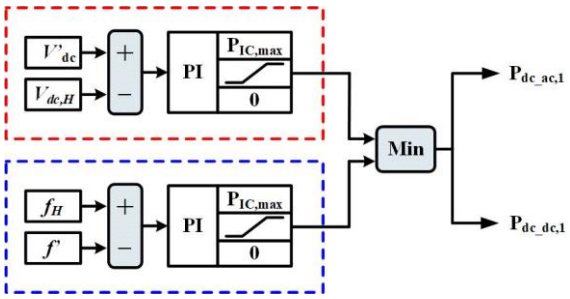
مطابق شکل ۷ اگر فرکانس اندازه گیری شده‌ی ترمینال AC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) بیشتر از f_H باشد به معنی این است که ریزشبکه‌ی AC در شرایط میان باری و یا کم باری قرار دارد و نیازی به انتقال توان به این ریزشبکه وجود ندارد. در این شرایط نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی با توجه به وجود محدود کننده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

زمانی که فرکانس اندازه گیری شده‌ی ترمینال AC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) کمتر از f_H باشد به معنی این است که ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی AC جهت خروج این ریزشبکه از شرایط اضافه باری است. انتقال توان در این حالت تا جایی ادامه میابد که ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی AC در شرایط پرباری باشد اما ریزشبکه‌ی 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: $P_{dc_dc,1}=0$ $P_{dc_ac,1}=$. 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 ریزشبکه‌ی AC به ریزشبکه‌ی DC

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



شکل (۷): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۱

از ریزشبکه‌ی AC به ریزشبکه‌ی DC انجام می‌شود. مقدار این انتقال توان بگونه‌ای است که ریزشبکه‌ی DC را از حالت اضافه باری خارج کند به شرطی که ریزشبکه‌ی 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 اندازه گیری شده‌ی ترمینال DC سمت ریزشبکه‌ی DC (بر حسب پریونیت) بیشتر از $V_{dc,H}$ باشد، ریزشبکه‌ی DC در شرایط میان باری و یا کم باری قرار دارد و نیازی به انتقال توان به این ریزشبکه نیست. در این شرایط نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین بالایی با توجه به وجود محدود کننده در خروجی کنترل کننده‌ی PI خروجی صفر می‌دهد و داریم: $P_{dc_ac,2}= P_{dc_dc,2}=0$.

اگر ولتاژ اندازه گیری شده‌ی ترمینال DC مبدل واسط (بر حسب پریونیت) کمتر از $V_{dc,H}$ باشد، ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی DC جهت خروج این ریزشبکه از شرایط اضافه باری است. انتقال توان در این حالت تا جایی مجاز است که ریزشبکه‌ی 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.

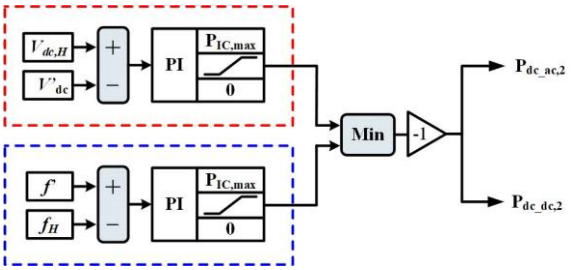
اگر ریزشبکه‌ی DC در شرایط پرباری باشد اما ریزشبکه‌ی AC نیز در شرایط پرباری باشد خروجی نمودار بلوکی نشان داده شده در خط چین پایینی با توجه به وجود محدود کننده صفر خواهد بود و در نهایت خواهیم داشت: $P_{dc_dc,2}=0$ $P_{dc_ac,2}=$. در این حالت کاری شارژ یا دشارژ باتری انجام نمی‌شود و همواره توان مبدل dc-ac و مبدل dc-dc یکسان خواهد بود. با توجه به اینکه جهت مثبت انتقال توان از ریزشبکه‌ی DC به ریزشبکه‌ی AC در نظر گرفته شده است و در این حالت جهت انتقال توان از ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ها در شرایط کم باری قرار داشته باشد و هیچکدام از دو ریزشبکه در شرایط پرباری نباشد. در این شرایط که یکی از ریزشبکه‌ها در شرایط

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



شکل (۸): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۲

کم باری است و ریزشبکه‌ی دیگر در شرایط پرباری نیست توان شارژ از ریزشبکه‌ای که در شرایط کم باری است به باتری انتقال میابد.

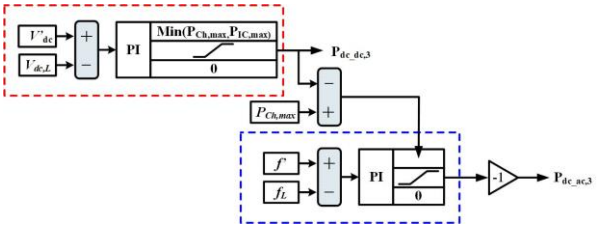
در صورتی که هر دو ریزشبکه در شرایط کم باری باشند، شارژ باتری ابتدا توسط مبدل dc-dc انجام می‌شود تا تلفات حداقل شود. در صورتی که توان شارژ تامین شده توسط مبدل dc-dc از توان حداکثر مجاز شارژ کمتر باشد، مبدل dc-ac نیز توان اضافه‌ی ریزشبکه‌ی AC را به باتری منتقل می‌کند. شکل ۹ نمودار بلوکی کنترلی در این حالت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

طبق شکل ۹، V'_{dc} -$V_{dc,L}$ بطور غیر مستقیم بیانگر ظرفیت اضافه در ناحیه‌ی کم باری ریزشبکه‌ی DC است. خروجی نمودار بلوکی خط چین بالایی توان اضافه‌ی ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی DC (خروجی نمودار بلوکی خط چین بالایی) کمتر از حداکثر توان شارژ باتری باشد و ریزشبکه‌ی AC نیز در حالت کم باری باشد، توان اضافه‌ی ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی AC و DC در شرایط پرباری قرار داشته باشند. در روش پیشنهادی، ریزشبکه‌ی DC در اولویت بوده و توان ذخیره شده در باتری به ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه‌ی DC به ریزشبکه‌ی AC نیز انتقال پیدا می‌کند تا این ریزشبکه را نیز از شرایط پرباری خارج نماید. شکل ۱۰ نمودار بلوکی کنترلی در این حالت را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۰، اگر هر دو ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ی DC از شرایط



شکل (۹): نمودار بلوکی کنترلی در حالت ۳

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

در نهایت توان حقیقی انتقالی مرجع مربوط به مبدل dc-dc برابر مجموع $P_{dc\text{-}dc1}$ تا $P_{dc\text{-}dc4}$ است که آن را با $P_{ref,dc\text{-}dc}$ و توان انتقالی مرجع مبدل dc-ac برابر مجموع $P_{dc\text{-}ac1}$ تا $P_{dc\text{-}ac4}$ خواهد بود که آن را با $P_{ref,dc\text{-}ac}$ 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 ریزشبکه‌ی DC به AC انجام می‌شود و توان مرجع باید در $P_{dc,max}$ (حداکثر ظرفیت تولید ریزشبکه‌ی DC) ضرب شود. اگر توان مرجع به دست آمده منفی باشد بدین معنی است که توان انتقالی از ریزشبکه‌ی AC به DC است و توان مرجع در $P_{ac,max}$ (حداکثر ظرفیت تولید ریزشبکه‌ی AC) ضرب می‌شود.

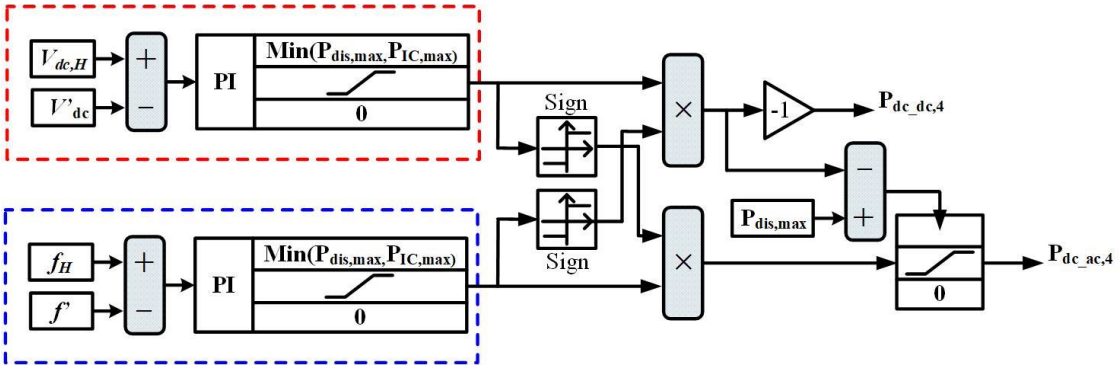
۴-۵- تامین توان راکتیو

مبدل dc-ac علاوه بر انتقال توان اکتیو می‌تواند در صورت وجود ظرفیت اضافه، توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC را نیز تامین کند. در روش پیشنهادی، تنها زمانی این مبدل در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC نقش دارد که این مبدل فعال بوده و انتقال توان اکتیو انجام دهد. بنابراین، زمانی که هر دو ریزشبکه 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.

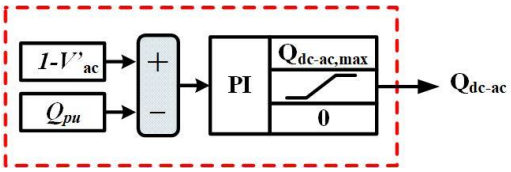
مقدار $1\text{-}V'_{ac}$ زمانی که توان راکتیو تولیدی ریزشبکه صفر باشد برابر صفر و زمانی که توان راکتیو تولیدی ریزشبکه حداکثر باشد، برابر یک خواهد بود. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تولید توان راکتیو مبدل dc-ac بگونه ای است که این مبدل و ریزشبکه‌ی AC از نظر پریونیت توان راکتیو یکسانی تولید کنند.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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



شکل (۱۰): نمودار بلوکی کنترلی در حالت۴



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

۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، ریزشبکه‌ی ترکیبی شکل ۴ در نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است. ظرفیت ریزشبکه‌ی AC برابر ۱۰ کیلووات و ۱۰ کیلووار، فرکانس آن در محدوده‌ی ۴۸ تا ۵۲ هرتز و ولتاژ در محدوده‌ی بین ۳۷۰ تا ۳۹۰ ولت است. ظرفیت ریزشبکه‌ی 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 DC به ریزشبکه‌ی AC مثبت و توان شارژ باتری نیز مثبت در نظر پریونیت): $f_L=V_{dc,L}=0.3$ و $f_H=V_{dc,H}=0.7$. انتقال توان از ریزشبکه‌ی گرفته شده است. نتایج شبیه سازی در آزمایش‌های زیر آمده است.

۵-۱- آزمایش ۱

این آزمایش با اعمال بار ۲ کیلوواتی و ۲ کیلووار در ریزشبکه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبکه‌ی DC آغاز می‌شود. در زمان t=2s بار ریزشبکه‌ی AC به ۵ کیلووات و ۴ کیلووار افزایش پیدا می‌کند. در واقع با این افزایش بار، ریزشبکه‌ی AC از شرایط کار کم باری (A_1 در شکل ۶) به حالت میان باری (A_2 در شکل ۶) انتقال می‌یابد. شکل ۱۲ توان منابع ریزشبکه‌ی AC و DC، شکل ۱۳ توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و شکل ۱۴ توان راکتیو منبع ریزشبکه‌ی AC و مبدل dc-ac را در این آزمایش نشان می‌دهد.

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

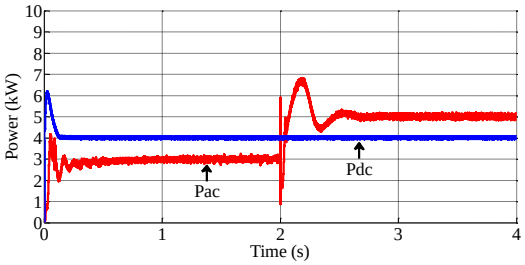
در t<2 s در این آزمایش، مبدل dc-ac فعال بوده و در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC نیز مطابق شکل ۱۴ مشارکت می‌کند و با توجه به اینکه ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC یکسان در نظر گرفته شده است، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبکه‌ی AC یکسان است. در زمان t>2 s که 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 ریزشبکه‌ی AC تماما توسط منابع آن تامین می‌شود.

۵-۲- آزمایش ۲

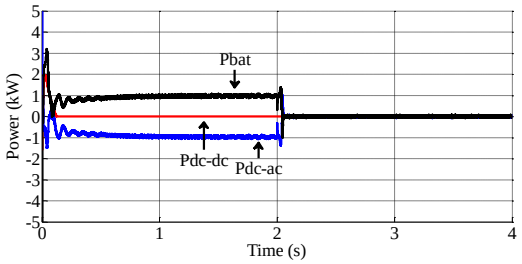
آزمایش ۲ با اعمال بار ۵ کیلوواتی و ۴ کیلووراری در ریزشبکه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبکه‌ی DC شروع می‌شود. در t=2s بار ریزشبکه‌ی AC به ۹ کیلووات و ۶ کیلووار افزایش پیدا می‌کند. با این افزایش بار ریزشبکه‌ی AC از شرایط میان باری (A_2 در شکل ۶) به حالت پر باری (A_3 در شکل ۶) انتقال می‌یابد. توان منابع ریزشبکه‌ی AC و DC، توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و توان راکتیو منبع ریزشبکه‌ی 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<2 s هر دو ریزشبکه در شرایط میان باری هستند و همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده بار هر ریزشبکه

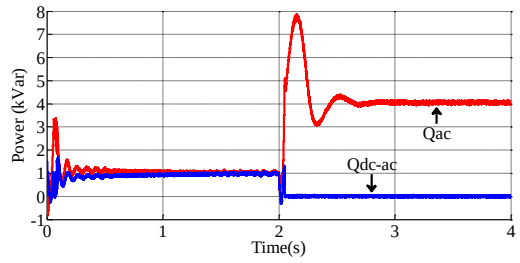
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



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



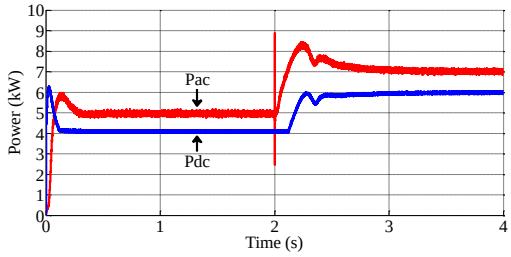
شکل (۱۳): توان مبدل dc-ac، dc-dc و شارژ باتری در آزمایش ۱



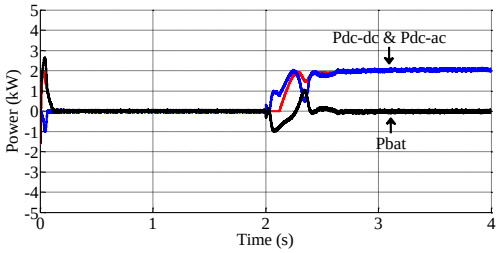
شکل (۱۴): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه AC در آزمایش ۱

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

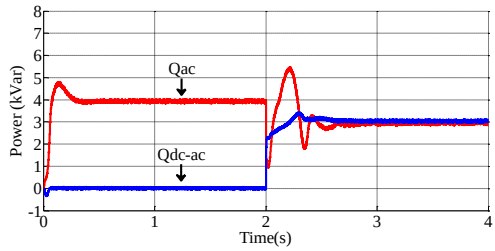
در t<2 s ، که مبدل dc-ac غیرفعال است، این مبدل نقشی در تامین توان راکتیو ندارد. در t>2 s که مبدل dc-ac فعال بوده و از ریزشبکه‌ی AC به DC انتقال توان انجام می‌دهد، در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC طبق شکل ۱۷ سهیم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC، توان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



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



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



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

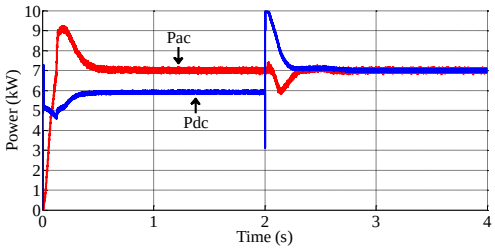
۵-۳- آزمایش ۳

آزمایش ۳ با اعمال بار ۹ کیلوواتی و ۶ کیلووار در ریزشبکه‌ی AC و بار ۴ کیلوواتی در ریزشبکه‌ی DC شروع می‌شود. در t=2s بار ریزشبکه‌ی DC به ۸ کیلووات افزایش پیدا می‌کند. این افزایش بار ریزشبکه‌ی DC را از شرایط میان باری (D_2 در شکل ۶) به حالت پر باری (D_3 در شکل ۶) می‌برد. شکل ۱۸ توان منابع ریزشبکه‌ی AC و DC، شکل ۱۹ توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ باتری و شکل ۲۰ توان راکتیو منبع ریزشبکه‌ی AC و مبدل dc-ac را در آزمایش ۳ نشان می‌دهد.

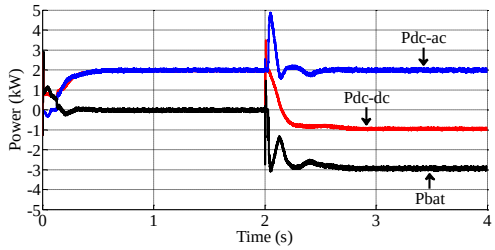
در t<2 s با توجه به اضافه بار بودن ریزشبکه‌ی AC توان از ریزشبکه‌ی DC به AC انتقال پیدا می‌کند. در t>2 s که هر دو ریزشبکه در پرباری هستند، باتری دشارژ شده و توان از باتری به دو ریزشبکه انتقال پیدا می‌کند تا دو ریزشبکه را همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، از پرباری خارج کند. توان انتقالی به ریزشبکه‌ی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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

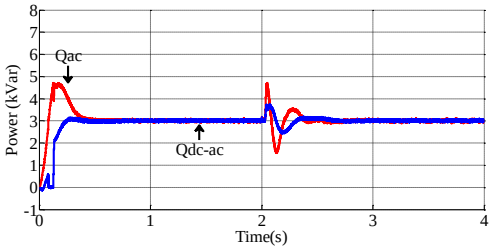
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



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



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



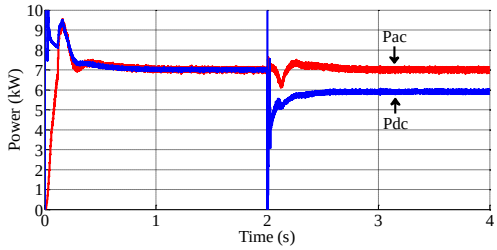
شکل (۲۰): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC در آزمایش ۳

حالت ۱ کیلووات است و در نتیجه توان دشارژ باتری ۳ کیلووات است که در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

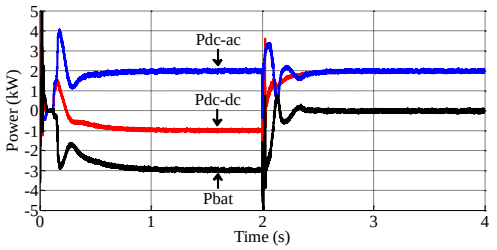
در این آزمایش، با توجه به اینکه مبدل dc-ac در تمام مدت شبیه‌سازی فعال است بنابراین در تمام مدت آزمایش در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC طبق شکل ۲۰ سهیم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبکه‌ی AC یکسان است.

۵-۴- آزمایش ۴

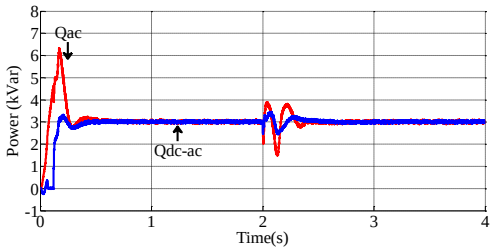
این آزمایش با اعمال بار ۹ کیلوواتی و ۶ کیلووای در ریزشبکه‌ی AC و بار ۸ کیلوواتی در ریزشبکه‌ی DC آغاز می‌شود. در زمان t=2s بار ریزشبکه‌ی DC به ۴ کیلووات کاهش پیدا می‌کند و ریزشبکه‌ی DC از شرایط پرباری به میان باری تغییر پیدا می‌کند. . توان منابع ریزشبکه‌ی AC و DC، توان مبدل‌های dc-ac و dc-dc و توان شارژ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



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



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



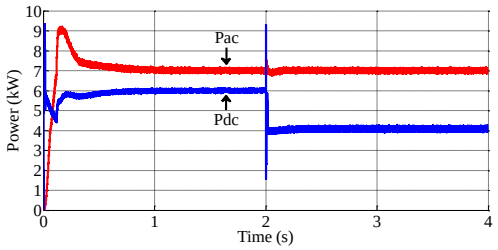
شکل (۲۳): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC در آزمایش ۴

در t<2 s با توجه به اضافه بار بودن هر دو ریزشبکه، هر دو ریزشبکه از طریق دشارژ باتری از شرایط پرباری خارج می‌شوند. در t>2 s که ریزشبکه‌ی DC از شرایط پرباری خارج می‌شود، بار مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC جهت خروج از شرایط پرباری (۲ کیلووات) از ریزشبکه‌ی DC به ریزشبکه‌ی AC انتقال پیدا می‌کند و توان تولیدی منابع ریزشبکه‌ی DC به ۶ کیلووات افزایش و توان تولیدی منابع ریزشبکه‌ی 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.

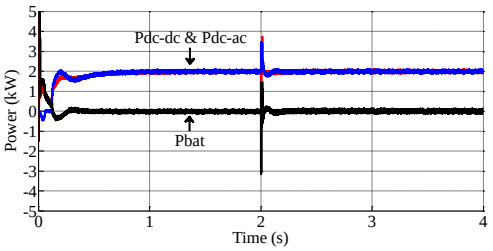
مشابه آزمایش قبل، با توجه به فعال بودن مبدل dc-ac در تمام مدت شبیه سازی، این مبدل در تمام مدت شبیه سازی در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC طبق شکل ۲۳ سهیم می‌باشد و با توجه به برابری ظرفیت توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC، توان راکتیو تامینی این مبدل و توان راکتیو تولیدی ریزشبکه‌ی AC یکسان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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]



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



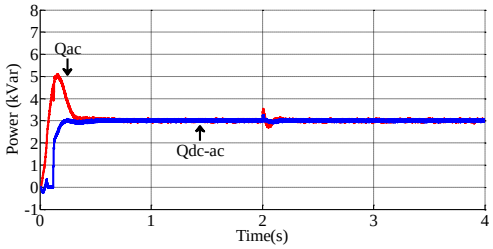
شکل (۲۵): توان مبدل dc-dc، dc-ac و شارژ باتری در آزمایش ۵

۵-۵- آزمایش ۵

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

در t<2 s با توجه به پرباری ریزشبکه‌ی AC و میان باری ریزشبکه‌ی DC انتقال توان از ریزشبکه‌ی DC به AC انتقال می‌یابد. در t>2 s که ریزشبکه‌ی DC وارد شرایط کم باری می‌شود، بار مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC جهت خروج از شرایط پرباری از ریزشبکه‌ی DC به ریزشبکه‌ی AC انتقال پیدا می‌کند (مشابه آزمایش ۴) و توان تولیدی منابع ریزشبکه‌ی DC به ۴ کیلووات افزایش و توان تولیدی منابع ریزشبکه‌ی 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 شبیه سازی در تامین توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC طبق شکل ۲۶ سهیم می‌باشد و نیمی از توان راکتیو مورد نیاز ریزشبکه‌ی AC را تامین می‌کند.



شکل (۲۶): توان راکتیو مبدل dc-ac و ریزشبکه‌ی AC 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 دهنده‌ی ریزشبکه‌ی DC و ریزشبکه‌ی AC در یک ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه به سه ناحیه‌ی کم باری، میان باری و پرباری تقسیم شد. مبدل واسط با اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس سمت AC و نیز ولتاژ سمت DC وضعیت بارگذاری هر ریزشبکه را مشخص کرده و بسته به اینکه هر کدام از ریزشبکه‌ها در کدام ناحیه است ۴ حالت کاری امکان پذیر است که عبارتند از: انتقال توان از ریزشبکه‌ی DC به AC، انتقال توان از ریزشبکه‌ی AC به DC، شارژ باتری و دشارژ باتری و برای هر کدام از مدهای کاری استراتژی کنترلی مناسب ارائه گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

جدول (۲): جمع بندی نتایج شبیه‌سازی

شماره آزمایش	شرایط آزمایش		حالت بهینه عملکردی
	ریزشبکه DC	ریزشبکه AC	
۱	**میان باری**	**از کم‌باری به میان باری**	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.
۲	**میان باری**	**از میان‌باری به پرباری**	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.
۳	**از میان‌باری به پرباری**	**پرباری**	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.
۴	**از پرباری به میان‌باری**	**پرباری**	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.
۵	**از میان‌باری به کم‌باری**	**پرباری**	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.

[4] Lorzadeh I, Askarian Abyaneh H, Savaghebi M S. Hierarchal 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.

[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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]

[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”, EEE 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.1]