

به کارگیری ریزشبکه‌های به هم پیوسته برای افزایش تداوم برق‌رسانی شبکه‌های توزیع در شرایط اضطراری

رضا حق‌مرام*

استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۱۲/۱۹، پذیرش: ۹۵/۰۵/۱۴)

چکیده

در کنار مزایای مختلف ریزشبکه‌ها، عدم امکان تولید مداوم توان در حالت جزیره‌ای امنیت برق‌رسانی بارهای حساس شبکه توزیع را در شرایط اضطراری تهدید می‌کند. راه‌کاری که در این مقاله برای تأمین پدافند غیرعامل شبکه‌های توزیع نسل آینده در شرایط اضطراری ارائه شده است، ایجاد شبکه توزیع حاصل از اتصال چند ریزشبکه است تا در شرایطی که تأمین توان از شبکه سراسری میسر نیست ریزشبکه‌ها از ظرفیت توان همدیگر بهره‌مند شوند. یک مبدل DC-DC دوطرفه ماژولار برای اتصال ریزشبکه DC به شبکه توزیع DC پیشنهاد شده است که امکان انتقال دوطرفه توان را فراهم می‌آورد. اصول عملکرد مبدل از طریق پیاده‌سازی نمونه آزمایشگاهی و راهبردی مدیریت توان پیشنهادی برای ریزشبکه متصل به شبکه توزیع با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC بررسی شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد با اتصال ریزشبکه‌ها به همدیگر امنیت تأمین توان الکتریکی بارهای ریزشبکه در شرایط اضطراری که همراه با حالت جزیره‌ای ریزشبکه‌هاست افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ریزشبکه DC، ریزشبکه‌های به هم پیوسته، مبدل DC-DC ماژولار، راهبرد مدیریت توان

Application of Interconnected Microgrids to Increase the Continuation of Electrification in Distribution Networks under Emergencies Situations

R. Haghmaram*

Imam Hossein University

(Received: 10/03/2016; Accepted: 04/08/2016)

Abstract

Beside various advantages of microgrids, impossibility of continuous power generation in islanding mode threatens the security of electrification of sensitive loads under emergencies. This paper proposes a construction for distribution networks which is formed using microgrids connection in which the microgrids use each other power capacity when the power transfer from the utility grid is not possible. This solution can provide passive defense of next generation of distribution networks in emergency conditions. A modular bidirectional DC-DC converter for connection of a DC microgrid to a DC distribution network is proposed which provides the bidirectional power transfer. Operation principle of the proposed converter is verified using experimental measurement, and proposed power management strategy for microgrid connection to the distribution network is investigated using PSCAD/EMTDC software. Analysis results show that interconnection of microgrids increases the security of electric power for microgrid loads under emergencies, which is frequently along with microgrids islanding mode.

Keywords: DC Microgrid, Interconnected Microgrids, Modular DC-DC Converter, Power Management Strategy.

۱. مقدمه

متقابل ریزشبه‌های متصل به هم دیگر نظیر تغییرات ولتاژ و حتی ناپایداری ولتاژ رفع گردد. یکی از اهداف مهم در به‌کارگیری ریزشبه‌های متصل به هم تأمین توان بارهای حساس ریزشبه‌های مختلف در شرایط جزیره‌ای ریزشبه‌ها است. بنابراین لازم است بر حسب ضرورت و اولویت بارهای ریزشبه تقسیم توان مناسب بین ریزشبه‌ها صورت پذیرد [۹ و ۱۰].

در ریزشبه‌های مدرن، مبدل‌های الکترونیک قدرت نقش مهمی را ایفاء می‌کنند به طوری که در سال‌های اخیر کاربردهای مختلفی برای این تجهیزات الکتریکی در ریزشبه‌ها ارائه شده است. به عنوان مثال مبدل DC-DC چند ورودی^۴ برای اتصال چند منبع توان DC به شین DC مشترک ریزشبه معرفی شده است [۱۱ و ۱۲]. کاربرد ترانسفورماتورهای نیمه‌هادی^۵ با هدف پخش توان در ریزشبه مطرح شده است [۱۳ و ۱۴]. بررسی کارهای قبلی انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که اتصال متعارف یک ریزشبه DC به شبکه توزیع از طریق مبدل دوطرفه AC به DC انجام می‌پذیرد اما این روش مبادله توان را محدود و یا حداقل مراحل تبدیل توان را افزایش می‌دهد. در بعضی تحقیقات مبدل ماژولار^۶ با مبدل پایه پل اکتیو دو طرفه یا همان مبدل DAB^۷ برای کاربرد ریزشبه معرفی شده است که از تعداد کلید قدرت بسیار زیادی استفاده می‌شود و این موضوع هزینه، اندازه و حجم مبدل را افزایش و حتی در بعضی موارد بازده را کاهش می‌دهد. مشکل دیگر در طرح مذکور محدودیت توسعه مبدل واسط برای افزایش ظرفیت توان انتقالی بین ریزشبه و شبکه توزیع است.

در این مقاله به منظور افزایش سطح ایمنی ریزشبه‌ها در تأمین مداوم توان الکتریکی بارهای متصل به آن، ساختار شبکه توزیع DC متشکل از چندین ریزشبه و یک مبدل DC-DC ماژولار دو طرفه با ایزولاسیون الکتریکی به عنوان واسط انتقال توان بین ریزشبه DC و شبکه توزیع پیشنهاد می‌شود. در ادامه راه‌برد مدیریت توان بر اساس عملکرد مبدل DC-DC ماژولار پیشنهادی برای ریزشبه DC مورد مطالعه ارائه شده است تا عملکرد قابل اطمینانی را برای آن فراهم آورد. در نهایت عملکرد یک ریزشبه DC بر پایه منبع توان فتو ولتایک (PV^۸) و پیل سوختی (FC^۹) در اتصال با شبکه توزیع DC با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود.

یکی از اولین پیامدهای رخ دادن شرایط اضطراری نظیر جنگ در یک کشور آسیب دیدن خطوط انتقال انرژی و عدم تأمین انرژی الکتریکی شبکه توزیع تحت تغذیه خطوط مذکور است. (۵-۱) تجربه حملات تروریستی نشان می‌دهد که حمله به زیرساخت سیستم قدرت می‌تواند سبب قطع بار گسترده و همچنین اختلال در سایر زیرساخت‌ها شود [۱]. یکی از اصول پدافند غیرعامل در زمینه انرژی الکتریکی بحث پراکندگی در تولید انرژی الکتریکی است چرا که تولید توان به شکل سنتی نیروگاه‌های متمرکز برای تأمین توان بارهای شبکه دارای امنیت کامل نیست. خطوط انتقال انرژی الکتریکی به دلیل فاصله طولانی از نیروگاه‌ها به شبکه توزیع و در نهایت بارهای الکتریکی در معرض آسیب‌های متعدد در شرایط اضطراری هستند. بنابراین رویکرد تأمین توان در فرم تولید پراکنده^۱ و ریزشبه‌ها^۲ می‌تواند بستر سیستم قدرت را نسبت به تهدیدات موجود ایمن‌تر کند. ایرادی که در طرح تولید پراکنده و ریزشبه‌ها وجود دارد این است که در صورت قطعی خطوط انتقال یا فوق توزیع حالت جزیره‌ای پیش می‌آید که در صورت مداوم نبودن توان تولیدی بعد از مدت کوتاهی تغذیه بارها قطع خواهد شد.

پیشرفت‌های اخیر در استفاده از ریزشبه‌ها برای افزایش بازده عملکرد و قابلیت اطمینان، سیستم‌های قدرت را برای تمرکززدایی تولید توان مناسب کرده است [۲ و ۳]. با توجه به جایگاه ریزشبه‌ها در نسل آینده شبکه‌های قدرت حفظ امنیت برق‌رسانی ریزشبه‌ها مخصوصاً در شرایط بروز بحران در سیستم‌های قدرت نیاز به توجه جدی دارد. یکی از روش‌های حفظ امنیت برق‌رسانی ریزشبه‌ها ایجاد ارتباط بین چند ریزشبه است یا به اصطلاح ایجاد شبکه بین ریزشبه‌ها است^۳. ریزشبه‌های شبکه شده می‌توانند از طریق ظرفیت‌های تولیدی محلی هم دیگر را حمایت کنند و از این طریق قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش دهند [۴-۶]. قابلیت عملکرد مستقل از شبکه سراسری، به عنوان یک ریزشبه جزیره‌ای، قدمی مهم در اطمینان از عملکرد پایدار و پیوسته ناحیه در زمان از دست رفتن شبکه سراسری است [۷]. با استفاده از روش‌های کنترلی جدید از ظرفیت خود بازاری ریزشبه‌ها در اتصال آن‌ها به هم دیگر می‌توان بهره برد [۸]. این شرایط در صورتی میسر خواهد بود که توان مازاد ریزشبه‌ها در اختیار ریزشبه‌های مجاور آن‌ها قرار گیرد هر چند در طراحی روش‌های کنترلی باید اثرات منفی

^۴ Multi Input^۵ Solid-State Transformers^۶ Modular Converter^۷ Dual Active Bridge^۸ Photovoltaic^۹ Fuel Cell^۱ Distributed Generation^۲ Microgrids^۳ Networked Microgrids

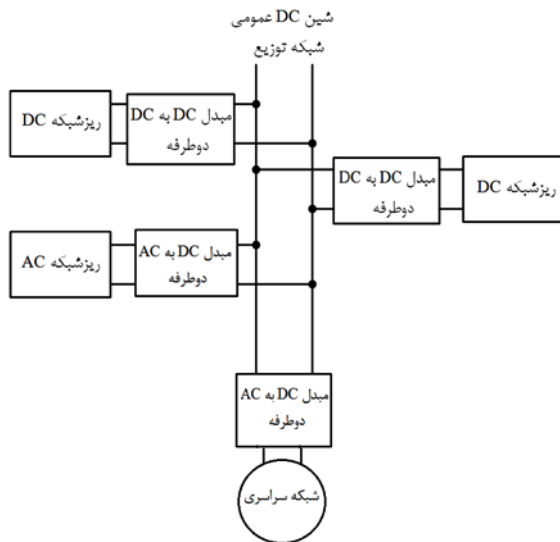
۲. روش تحقیق

۲-۱. ساختار ریزشبه‌های به هم پیوسته^۱

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از منابع تولید پراکنده و ریزشبه‌ها در شبکه‌های توزیع، بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده و تأمین انرژی الکتریکی بارها مخصوصاً در شرایط بحرانی سیستم قدرت که اغلب با حالت جزیره‌ای منابع تولید پراکنده و ریزشبه‌ها همراه است اهمیت ویژه‌ای دارد. در شرایط اضطراری شبکه قدرت باید بهره‌برداری از ریزشبه‌ها از لحاظ ساختار و برنامه‌ریزی و مدیریت توان مورد توجه ویژه قرار گیرد. شکل (۱) ساختار شبکه توزیع DC به هم پیوسته را نشان می‌دهد. ایده اصلی این کار استفاده از ریزشبه‌ها از ظرفیت توان هم دیگر است. در این طرح ریزشبه‌های مختلف AC و DC به یک شین DC مشترک که با استفاده از یک مبدل AC-DC دو طرفه به شبکه سراسری متصل شده است در ارتباط هستند. ریزشبه‌های AC و DC به ترتیب از طریق مبدل AC به DC و مبدل DC به DC دو طرفه هر طرفه به شین DC مشترک شبکه توزیع DC متصل می‌شوند. هر ریزشبه می‌تواند شامل واحدهای مختلف تولید توان، ذخیره ساز انرژی و بارها باشد. مبدل AC-DC دو طرفه به شین DC شبکه توزیع متصل است تا ولتاژ این شین را از طریق مبادله توان با شبکه سراسری تنظیم کند. زمانی که یک ریزشبه نیاز به توان اضافی دارد و مجموع توان تزریقی از سایر ریزشبه‌ها کافی نیست، مبدل AC-DC توان AC شبکه سراسری را به توان DC تبدیل و به شبکه توزیع DC به هم پیوسته تزریق می‌کند و زمانی که توان تزریقی ریزشبه‌ها به شبکه توزیع بیش از توان مصرفی آن باشد، مبدل AC-DC توان DC مازاد شبکه توزیع را به توان AC تبدیل و به شبکه سراسری تزریق می‌کند. با اتصال ریزشبه‌های مختلف به هم دیگر امنیت شبکه توزیع برای تأمین مداوم انرژی الکتریکی بارها افزایش می‌یابد و زمانی که در اثر شرایط اضطراری در شبکه قدرت، اختلالی در تأمین توان الکتریکی شبکه سراسری رخ دهد، اتصال ریزشبه‌ها به هم دیگر امکان تأمین توان الکتریکی بارهای حساس شبکه فراهم می‌شود.

یک ریزشبه شامل چهار بخش اصلی واحد تولید توان، سیستم ذخیره ساز انرژی^۲، بار و یک مبدل برای اتصال به شبکه سراسری است. تولید انرژی الکتریکی می‌تواند از طریق توربین بادی، سیستم فتو ولتائیک، پیل سوختی، ژنراتور دیزلی و سایر منابع تولید پراکنده فراهم شود. سیستم ذخیره ساز انرژی در

ریزشبه DC می‌تواند باتری یا سوپرکازن^۳ باشد. بر خلاف ریزشبه‌های مرسوم که از مبدل AC-DC برای اتصال به شبکه سراسری استفاده می‌کنند، در ساختار پیشنهادی ریزشبه DC از طریق یک مبدل DC-DC به شین عمومی متصل می‌شود.



شکل ۱. ساختار ریزشبه‌های به هم پیوسته

۲-۲. مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار با ایزولاسیون

الکتریکی^۴

ساختار مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار پیشنهادی برای اتصال ریزشبه DC به شین DC عمومی شبکه توزیع^۵ در شکل (۲) نشان داده شده است. پل‌های مبدل از ساق‌های موازی تشکیل شده است که در هر یک از این ساق‌ها یک جفت کلید قدرت قرار دارد. سمت اولیه مبدل لینک DC متصل به یک پل ماژولار موازی است و سمت ثانویه مبدل نیز لینک DC متصل به پل ماژولار موازی دیگر است. ترانسفورماتورهای فرکانس بالا^۶ بین دو پل موازی قرار داده شده‌اند به طوری که سیم‌پیچ اولیه آن‌ها در پل سمت اولیه و سیم‌پیچ سمت ثانویه آن‌ها در پل سمت ثانویه مبدل قرار دارد. ترانسفورماتورهای فرکانس بالا ایزولاسیون الکتریکی بین دو سمت اولیه و ثانویه مبدل را فراهم می‌آورند و اندوکتانس ناشی از آن‌ها به عنوان عنصر ذخیره کننده لحظه‌ای انرژی در انتقال توان از یک سمت مبدل به سمت دیگر نقش اساسی ایفا می‌کنند. دو پل مبدل ساختار کاملاً مشابهی دارند بنابراین یک ساختار متقارن برای مبدل ایجاد می‌شود که این ویژگی مبدل امکان انتقال دو طرفه توان را فراهم می‌آورد.

^۳ Super Capacitor

^۴ Electrical isolation

^۵ PCC (Point Of common coupling)

^۶ High frequency transformer

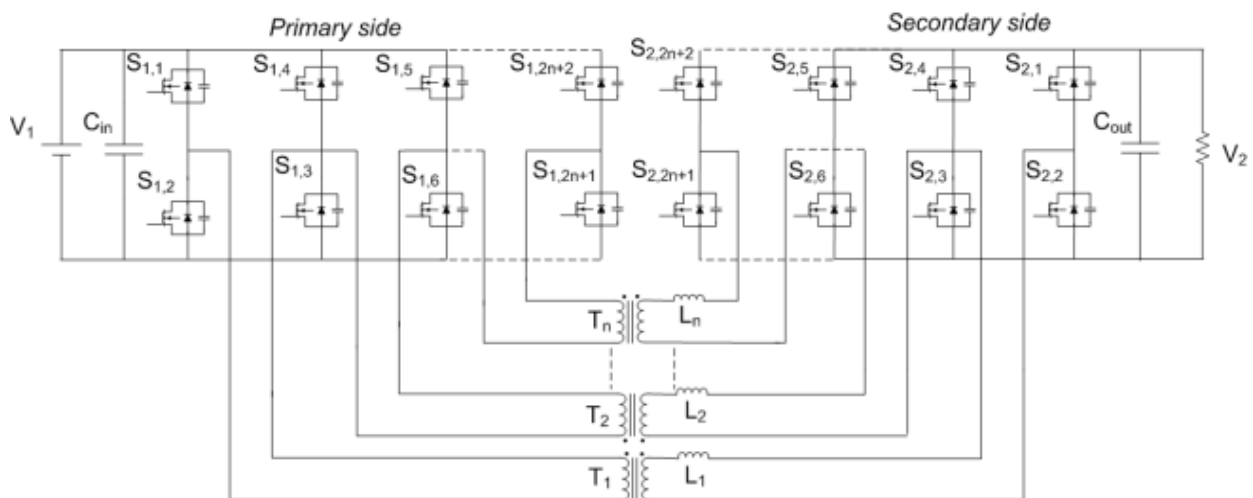
^۱ Integrated DC distribution network

^۲ Energy Storage System

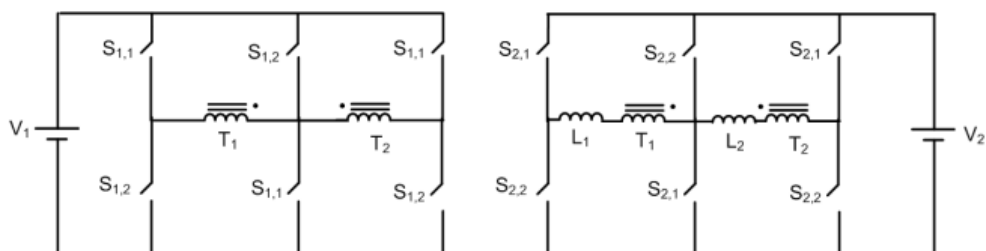
اولیه و در نیم سیکل اول دسته کلیدهای $S_{1,2}$ و در نیم سیکل دوم دسته کلیدهای $S_{1,1}$ هدایت می‌کنند. به‌طور مشابه در پل سمت ثانویه نیز در نیم سیکل اول دسته کلیدهای $S_{2,2}$ و در نیم سیکل دوم دسته کلیدهای $S_{2,1}$ هدایت می‌کنند. هدایت دسته کلیدهای $S_{1,1}$ و $S_{2,1}$ با اختلاف فازی نسبت به هم دیگر انجام می‌پذیرد که بر اساس این اختلاف فاز جهت و اندازه توان انتقالی تعیین می‌شود. اگر شکل موج اولیه نسبت به شکل موج ثانویه پیش‌فاز باشد توان از سمت اولیه به سمت ثانویه ثانویه نسبت به شکل موج اولیه پیش‌فاز باشد توان از سمت ثانویه به سمت اولیه مبدل منتقل می‌شود. شرایط دقیقاً مشابهی برای کلیدزنی دسته کلیدهای $S_{1,2}$ و $S_{2,2}$ با همان اندازه اختلاف فاز برقرار است. فرآیند انتقال توان از ولتاژی که در نتیجه اختلاف فاز دو سمت روی اندوکتانس معادل قرار می‌گیرد آغاز می‌شود. در ساختار مبدل اندوکتانس معادل نقش ذخیره‌کننده لحظه‌ای و انتقال‌دهنده انرژی را ایفاء می‌کند به‌طوری که ولتاژ روی اندوکتانس باعث ایجاد جریان و در نتیجه انتقال توان از یک سمت به سمت دیگر مبدل می‌شود.

ساختار متقارن و امکان مبادله دو طرفه توان، ایجاد ایزولاسیون الکتریکی بین دو سمت DC مبدل و چگالی توان بالا از مهم‌ترین ویژگی‌های مبدل پیشنهادی است.

در ساختار مبدل پیشنهادی، دو پل ماژولار دو طرفه تولید ولتاژ AC برای سمت ترانسفورماتورها و یکسو کردن ولتاژ AC فرکانس بالا برای لینک DC مبدل را بر عهده دارند. نحوه انتقال توان از یک سمت مبدل به سمت دیگر آن بر اساس کنترل شیفت فاز^۱ بین شکل موج‌های AC تولیدی توسط دو پل است. برای درک راحت‌تر اصول عملکرد مبدل ماژولار، ساختار مبدل پیشنهادی با دو ماژول در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴) نحوه کلیدزنی مبدل را در دو نیم سیکل متوالی نشان می‌دهد. کلیدهای مجاور به صورت مکملی و با سیکل کاری ۵۰ درصد روشن و خاموش می‌شوند تا شکل موج مربعی AC در اولیه و ثانویه دو ترانسفورماتور ایجاد شود. بنابراین در پل سمت

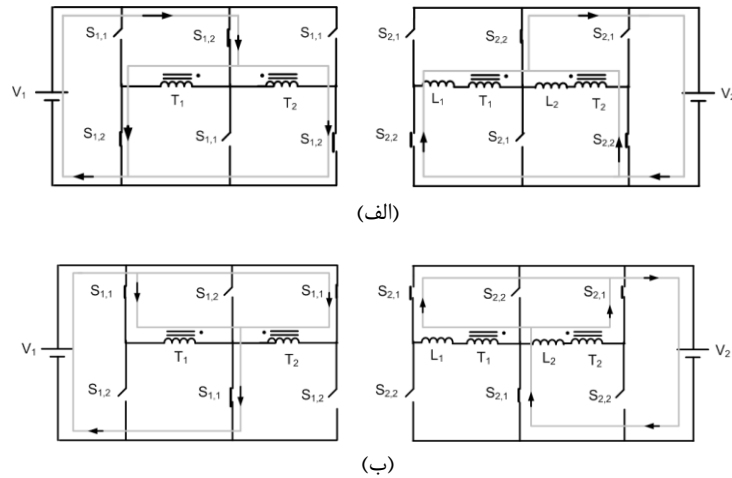


شکل ۲. ساختار مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار پیشنهادی برای اتصال یک ریزشبه DC به شین شبکه توزیع DC



شکل ۳. ساختار ساده‌شده مبدل DC-DC پیشنهادی با دو ماژول

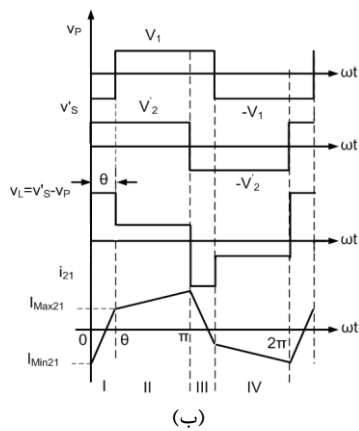
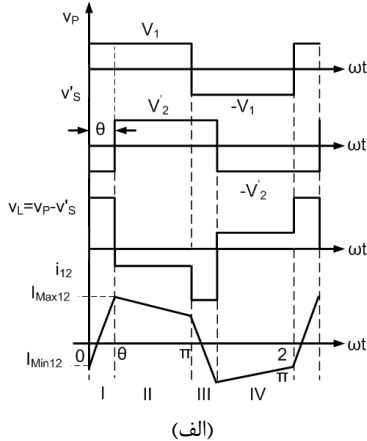
^۱ Phase shift control



شکل ۴. نحوه کلیدزنی مبدل در (الف) نیم سیکل اول کلیدزنی، (ب) نیم سیکل دوم کلیدزنی

به‌طور مشابه رابطه جریان برای دوره زمانی II نیز از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$i_{12}(\omega t) = \left(\frac{V_1 - V_2'}{L\omega}\right)(\omega t - \theta) + i_{12}(\theta), \quad \theta \leq \omega t \leq \pi \quad (2)$$



شکل ۵. شکل موج‌های ولتاژ موج مربعی اولیه و ولتاژ انتقال‌یافته ثانویه، ولتاژ اندوکتانس معادل در هر ماژول و جریان عبوری از ترانسفورماتور برای (الف) انتقال توان از سمت اولیه به سمت ثانویه، (ب) انتقال توان از سمت ثانویه به سمت اولیه

شکل موج‌های ولتاژ مربعی طرف اولیه و ثانویه یکی از ترانسفورماتورها همراه با ولتاژ روی اندوکتانس معادل در طرف اولیه ترانسفورماتور و جریان عبوری از آن برای انتقال توان از سمت اولیه به سمت ثانویه در شکل (۵) نشان داده شده است البته با پیش‌فاز کردن ولتاژ ثانویه نسبت به ولتاژ اولیه می‌توان شکل موج‌های مربوط به انتقال توان از سمت ثانویه مبدل به سمت اولیه را نیز به دست آورد

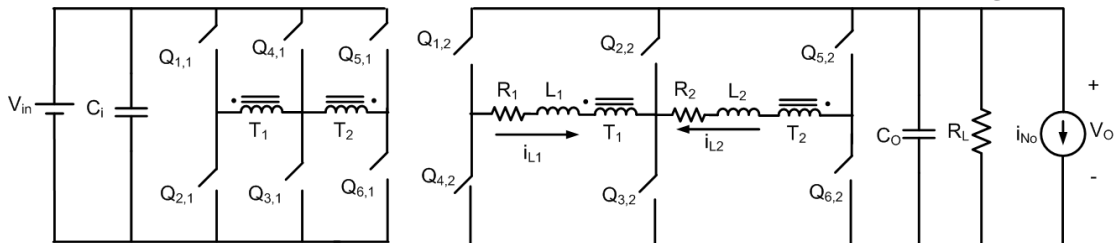
در تحلیلی که در ادامه می‌آید v_p و v_s به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ موج مربعی AC تولیدشده در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور، n نسبت تعداد دور سیم‌پیچ اولیه به سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور، v_s' ولتاژ موج مربعی AC سمت ثانویه انتقال‌یافته به اولیه ترانسفورماتور که برابر با $n v_s$ است، V_1 اندازه ولتاژ DC سمت اولیه مبدل، V_2 اندازه ولتاژ DC سمت ثانویه مبدل، ولتاژ DC سمت ثانویه منتقل‌شده به سمت اولیه که برابر است با $n V_2$ زاویه شیفت فاز اعمالی بین ولتاژ اولیه و ثانویه مبدل، v_L ولتاژ روی اندوکتانس معادل ترانسفورماتور، L اندوکتانس معادل ترانسفورماتور که برابر با مجموع اندوکتانس نشی ترانسفورماتور و اندوکتانس کمکی خارجی است، i_{12} جریان عبوری از ترانسفورماتور و اندوکتانس معادل از سمت اولیه به سمت ثانویه و i_{21} جریان عبوری از ترانسفورماتور و اندوکتانس معادل از سمت ثانویه به سمت اولیه است. محاسبه روابط برای انتقال توان الکتریکی از سمت اولیه به سمت ثانویه مبدل در نظر گرفته می‌شود و برای انتقال توان در جهت معکوس روابط مشابهی را می‌توان به دست آورد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، جریان در دوره زمانی I در سمت اولیه ترانسفورماتور برابر با رابطه (۱) است.

$$i_{12}(\omega t) = \left(\frac{V_1 + V_2'}{L\omega}\right)\omega t + i_{12}(0), \quad 0 \leq \omega t \leq \theta \quad (1)$$

$$P_o = NP_{12} = N \frac{nV_1V_2}{L\omega} \theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (7)$$

۲-۳. مدل سیگنال کوچک مبدل ماژولار پیشنهادی

برای بررسی عملکرد حالت دینامیکی مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار پیشنهادی و طراحی کنترل کننده برای بهبود رفتار دینامیکی آن، لازم است با روش مناسبی به مدل سازی دینامیکی آن پرداخته شود. روش متوسط گیری فضای حالت، روشی مرسوم برای مدلسازی مبدل های کلیدزنی است. به کارگیری این روش در مبدل های DC-DC مستلزم چشم پوشی کردن از ریپل جریان سلف است اما این روش برای مبدل پیشنهادی قابل استفاده نیست چرا که جریان عبوری از ترانسفورماتورهای آن، جریان AC خالص هستند و در حالت ایده آل مقدار متوسط DC آنها صفر است. در این مقاله از روش متوسط گیری تعمیم یافته برای مدل سازی مبدل پیشنهادی استفاده می شود. در این روش از تعداد بیشتری از ضرایب سری فوریه برای بیان یک متغیر استفاده می شود. این روش پیش تر برای مدل سازی دینامیکی مبدل های مختلفی [۱۷-۱۵] استفاده شده است. مدل ساده شده مبدل DC-DC پیشنهادی برای تحلیل سیگنال کوچک در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. مدل ساده شده مبدل ماژولار پیشنهادی

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = -\frac{1}{R_L C_o} v_o(t) + \frac{2}{C_o} \eta_2(t) i_L(t) - \frac{i_{No}}{C_o} \quad (8)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{R_L}{L_T} i_L(t) + \frac{\eta_1(t)}{nL_T} v_{in}(t) - \frac{\eta_2(t)}{L_T} v_o(t) \quad (9)$$

که در روابط بالا $\eta_1(t)$ و $\eta_2(t)$ به عنوان توابع کلیدزنی پل های ماژولار اولیه و ثانویه مبدل به شرح زیر تعریف می شوند. در این روابط T برابر $2\pi/\omega$ و δ به عنوان نسبت شیفت فاز برابر با θ/π تعریف می شود.

$$\eta_1(\tau) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tau < \frac{T}{2} \\ -1 & \frac{T}{2} \leq \tau < T \end{cases}, \quad (10)$$

$$\eta_2(\tau) = \begin{cases} 1 & \frac{\delta T}{2} \leq \tau < \frac{\delta T}{2} + \frac{T}{2} \\ -1 & 0 \leq \tau < \frac{\delta T}{2} \text{ and } \frac{\delta T}{2} + \frac{T}{2} \leq \tau < T \end{cases}$$

در حالت دائمی جریان ترانسفورماتور برای هر نیم سیکل متقارن است بنابراین می توان برابری رابطه $i_{L2}(0) = -i_{L2}(\pi)$ را در نظر گرفت. با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر حداکثر و حداقل جریان ترانسفورماتور مطابق روابط (۳) و (۴) تعریف می شوند.

$$I_{Min12} = -\frac{(V_1 + V_2')\theta + (V_1 - V_2')(\pi - \theta)}{2L\omega} \quad (3)$$

$$I_{Max12} = \frac{(V_1 + V_2')\theta - (V_1 - V_2')(\pi - \theta)}{2L\omega} \quad (4)$$

با توجه به شکل (۵) و روابط (۱-۴) متوسط جریان ورودی مبدل مطابق با رابطه زیر به دست می آید:

$$\bar{i}_{12} = \frac{V_2'}{L\omega} \theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (5)$$

اگر از تلفات مبدل صرف نظر شود، توان خروجی آن برابر با توان ورودی تقریب زده می شود. بنابراین مقدار توان انتقالی توسط یک ماژول مبدل از سمت اولیه به سمت ثانویه مبدل از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2'}{L\omega} \theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) = \frac{nV_1 V_2}{L\omega} \theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (6)$$

در نهایت کل توان انتقالی توسط مبدل با تعداد N ماژول از رابطه (۷) به دست می آید:

متغیرهای حالت از مقادیر حالت دائمی به صورت $\delta = \Delta + d\delta$ می‌شوند. در این رابطه حروف بزرگ نشان‌دهنده حالت دائمی و حروف کوچک نشان‌دهنده سیگنال بزرگ متغیرها و حروف همراه با علامت d نشان‌دهنده سیگنال کوچک متغیرها می‌باشند. با توجه به تعریف متغیرهای حالت، ماتریس فضای حالت مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{O0} \\ i_{L1R} \\ i_{L1I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_L C_o} & \frac{-4N \sin \delta \pi}{\pi C_o} & \frac{-4N \cos \delta \pi}{\pi C_o} \\ \frac{2 \sin \delta \pi}{\pi L_t} & -\frac{R_t}{L_t} & \omega \\ \frac{2 \cos \delta \pi}{\pi L_t} & -\omega & -\frac{R_t}{L_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{O0} \\ i_{L1R} \\ i_{L1I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_o} \\ 0 & 0 \\ -\frac{2}{\pi n L_t} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{No} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{O0} + dv_{O0} \\ I_{L1R} + di_{L1R} \\ I_{L1I} + di_{L1I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_o} & \frac{-4N \sin(\Delta + d\delta)\pi}{\pi C_o} & \frac{-4N \cos(\Delta + d\delta)\pi}{\pi C_o} \\ \frac{2 \sin(\Delta + d\delta)\pi}{\pi L_t} & -\frac{R_t}{L_t} & \omega_s \\ \frac{2 \cos(\Delta + d\delta)\pi}{\pi L_t} & -\omega_s & -\frac{R_t}{L_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{O0} + dv_{O0} \\ I_{L1R} + di_{L1R} \\ I_{L1I} + di_{L1I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_o} \\ 0 & 0 \\ -\frac{2}{\pi n L_t} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ I_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

الکترونیک قدرت است. با کمک این تابع می‌توان به مطالعه پاسخ فرکانسی و پاسخ‌های حالت گذرا و حالت دائمی سیستم مورد نظر پرداخت. تابع تبدیل کنترل به خروجی مبدل ماژولار پیشنهادی از طریق رابطه (۱۴) حاصل می‌شود که به کمک آن می‌توان کنترل‌کننده مناسب برای آن طراحی نمود.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

$$x = \begin{bmatrix} dv_{O0} \\ di_{L1R} \\ di_{L1I} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_o} & \frac{-4N \sin(\Delta\pi)}{\pi C_o} & \frac{-4N \cos(\Delta\pi)}{\pi C_o} \\ \frac{2 \sin(\Delta\pi)}{\pi L_t} & -\frac{R_t}{L_t} & \omega_s \\ \frac{2 \cos(\Delta\pi)}{\pi L_t} & -\omega_s & -\frac{R_t}{L_t} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{4N}{C_o} (I_{L1I} \sin(\Delta\pi) - I_{L1R} \cos(\Delta\pi)) \\ \frac{2}{L_t} V_{O0} \cos(\Delta\pi) \\ -\frac{2}{L_t} V_{O0} \sin(\Delta\pi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$y = dv_{O0}, \quad C = [1 \ 0 \ 0], \quad D = [0], \quad u = d\delta$$

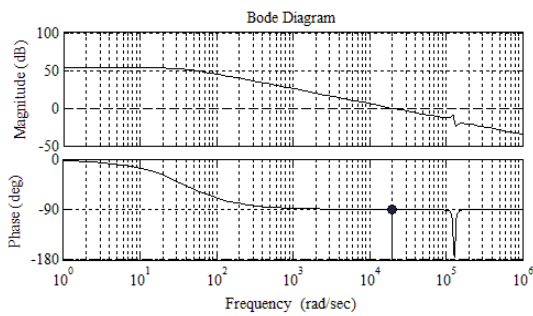
$$G_{vs}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = \frac{(I_{L1I} \sin(\Delta\pi) - I_{L1R} \cos(\Delta\pi)) \left(\frac{4}{C_o} s^2 + \frac{8R_t}{L_t C_o} s + \frac{4R_t^2}{C_o L_t^2} + \frac{4\omega_s^2}{C_o} \right) + \frac{8V_{O0}\omega_s}{L_t \pi C_o}}{s^3 + \left(\frac{2R_t}{L_t} + \frac{1}{RC_o} \right) s^2 + \left(\frac{R_t^2}{L_t^2} + \frac{2R_t}{RL_t C_o} + \omega_s^2 + \frac{8}{\pi^2 L_t C_o} \right) s + \frac{1}{RC_o} \left(\frac{R_t^2}{L_t^2} + \omega_s^2 \right) + \frac{8R_t}{\pi^2 L_t^2 C_o}} \quad (14)$$

مطابق با جدول (۱) نشان می‌دهند. حد فاز سیستم حلقه باز برابر ۹۰/۳ درجه است. واضح است که بهره فرکانس پایین تابع تبدیل

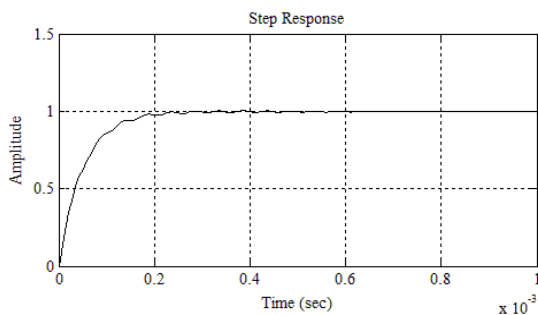
طراحی کنترل‌کننده نیاز به استخراج تابع تبدیل سیگنال کوچک کنترل به خروجی مبدل دارد. این تابع تبدیل پاسخ دینامیکی مبدل را در اثر اختلالات کوچک در سیگنال کنترلی نشان می‌دهد. در رابطه به دست آمده برای معادلات حالت زمانی که یک اختلال کوچک در سیگنال کنترلی مبدل یعنی δ پدید آید، متغیرهای حالت v_{O0} ، i_{L1R} و i_{L1I} از مقدار حالت دائمی خود منحرف می‌شوند. با فرض اینکه ولتاژ ورودی ثابت است، انحراف

در رابطه (۱۲) بخش‌های غیرخطی تقریب زده می‌شوند و روابط به دست آمده ساده‌سازی می‌شوند. سپس از طریق برابر سازی مقادیر DC دو طرف و صرف‌نظر از جملات کوچک، مدل سیگنال کوچک مبدل پیشنهادی در فرم فضای حالت مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید. تابع تبدیل کنترل به خروجی یک معیار سنجش برای مدل متوسط سیگنال کوچک مبدل‌های

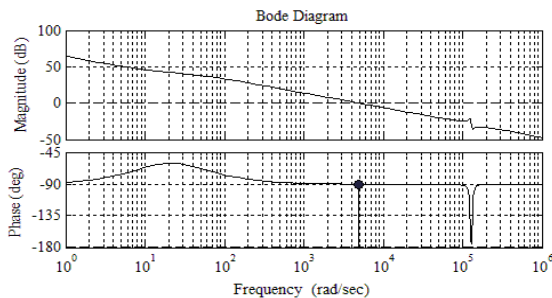
شکل (۷- الف) و شکل (۷- ب) دیگرام بد و پاسخ پله تابع تبدیل مورد نظر را برای پارامترهای مبدل ماژولار پیشنهادی



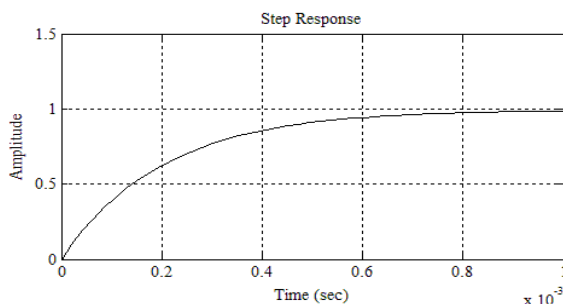
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷. (الف) دیاگرام بد، (ب) پاسخ پله سیستم جبران‌سازی نشده، (ج) دیاگرام بد، (د) پاسخ پله، سیستم جبران‌سازی شده

۲-۴. راهبرد مدیریت توان ریزش‌بکه DC در اتصال به

شبکه توزیع به هم پیوسته

ریزش‌بکه DC باید بتواند در شرایط مختلفی که در اثر تولید غیرقطعی منبع تولید توان PV و همچنین تغییرات مختلف بار پیش می‌آید با قابلیت اطمینان بالایی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

برای تنظیم ولتاژ DC مناسب نیست. بنابراین لازم است تا یک جبران‌ساز مناسب برای کنترل مبدل مازولار طراحی شود تا بتواند با پاسخ‌های مناسب حالت گذرا و حالت دائمی به صورت یک سیستم پایدار عمل بکند. یک کنترل‌کننده PI با تبدیل زیر طراحی و برای مبدل مازولار در نظر گرفته می‌شود.

$$G_{com}(s) = K_p \left(1 + \frac{I}{T_i s} \right) \quad (15)$$

لازم است پارامترهای جبران‌ساز PI، K_p و T_i ، به نحوی به دست آیند که سیستم حلقه بسته حداکثر اضافه جهش و زمان نشست مناسبی در پاسخ به ورودی پله داشته باشد. در این پژوهش ضرایب جبران‌ساز PI با استفاده از روش بهینه‌سازی محاسباتی به دست آمده است. هدف به دست آوردن ترکیبی از پارامترها به نحوی است که حداکثر اضافه جهش بین ۱۰ تا ۱۲ درصد و زمان نشست کمتر از ۳ میلی‌ثانیه در پاسخ به ورودی پله ظاهر شود. با شرایط هدف تعیین‌شده برای محاسبات، ضریب تناسبی جبران‌ساز برابر $K_p=0.03$ و ضریب مشتقی جبران‌ساز برابر $T_i=1.1 \times 10^{-3} \text{ sec}$ به دست می‌آیند.

شکل (۷-ج) دیاگرام بد تابع تبدیل حلقه باز سیستم جبران‌سازی شده را نشان می‌دهد. جبران‌ساز مورد استفاده بهره حلقه فرکانس پایین را افزایش می‌دهد که این موضوع منجر به تنظیم بهتر ولتاژ DC خروجی مبدل می‌شود و این در حالی است که حد فاز سیستم جبران‌سازی شده نسبت به حالت قبل از جبران‌سازی تغییری نداشته است.

شکل (۷-د) پاسخ پله تابع تبدیل حلقه بسته سیستم جبران‌سازی شده را نشان می‌دهد. زمان نشست به 0.085 ثانیه کاهش پیدا کرده است. همچنین نوسانات فرکانس بالا حذف شده است. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط پایداری، پاسخ حالت گذرا و پاسخ حالت دائمی سیستم جبران‌سازی شده، جبران‌ساز طراحی شده به‌طور مناسب عمل می‌کند.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مبدل مازولار شبیه‌سازی شده

تعداد مازول‌های مبدل	۲
توان خروجی	۲۵۰۰ وات
ولتاژ ثانویه	۲۰۰ ولت
ولتاژ اولیه	۱۰۰ ولت
فرکانس کلیدزنی	۲۰ کیلوهرتز
نسبت تبدیل ترانسفورماتورها ($n_1:n_2$)	۵۰:۱۰۰
اندوکتانس نشستی کل	۳۵ میکروهنری
مقاومت معادل کل	۱/۸۵ اهم
خازن فیلتر خروجی	۳۳۰ میکرو فاراد
خازن‌های استنایر	۱۵۰ پیکو فاراد

برای مصرف بارهای ریزشبه‌ها باشد ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای قرار می‌گیرد و مبدل DC-DC ماژولار به حالت غیرفعال در می‌آید. بر حسب شرایط مختلفی که ممکن است در ریزشبه‌ها DC پیش بیاید و بر حسب راهبرد مدیریت توان مطرح شده، مدهای عملکردی ریزشبه‌ها به شرح زیر تعریف می‌شوند.

در روابطی که در ادامه می‌آیند، P_{PV} نشان‌دهنده توان تولیدی منبع PV، P_{FC} نشان‌دهنده توان تولیدی منبع FC، P_{Batt} توان مربوط به شارژ یا دشارژ باتری، P_{Load} مربوط به توان مصرفی بار و P_{Conv} توان انتقالی از شبکه توزیع DC به ریزشبه‌ها DC توسط مبدل ماژولار پیشنهادی هستند.

مد اول: این مد عملکردی حالتی را نشان می‌دهد که مجموع توان تولیدی PV و FC بیش از توان مورد نیاز برای شارژ باتری و مصرف بارهای ریزشبه‌ها است بنابراین ماژولار DC تولیدی PV از طریق مبدل ماژولار DC-DC به شبکه توزیع DC منتقل می‌شود.

$$P_{PV} + P_{FC} > P_{Batt} + P_{Load} \\ P_{Conv} = (P_{Batt} + P_{Load}) - (P_{PV} + P_{FC}) < 0 \quad (16)$$

مد دوم: در این مد مجموع توان تولیدی PV و FC با مجموع توان مورد نیاز مصرف بار و شارژ باتری برابر است بنابراین توانی از ریزشبه‌ها به شبکه توزیع DC یا برعکس منتقل نمی‌شود و مبدل DC-DC ماژولار در حالت شناور قرار می‌گیرد.

$$P_{PV} + P_{FC} = P_{Batt} + P_{Load} \\ P_{Conv} = P_{PV} + P_{FC} - (P_{Batt} + P_{Load}) = 0 \quad (17)$$

مد سوم: این مد بیانگر حالتی است که مجموع توان تولیدی PV و FC کمتر از توان مورد نیاز مصرف بار و شارژ باتری است بنابراین لازم است مبدل ماژولار مقدار توان مورد نیاز ریزشبه‌ها را از شبکه توزیع DC جذب و به ریزشبه‌ها منتقل نماید.

$$P_{PV} + P_{FC} < P_{Batt} + P_{Load} \\ P_{Conv} = (P_{Batt} + P_{Load}) - (P_{PV} + P_{FC}) > 0 \quad (18)$$

مد چهارم: در شرایط بحرانی و زمانی که شبکه توزیع DC به دلیل قطعی بالادست از شبکه سراسری جدا شود در صورتی که تزریق توان به شین DC عمومی کمتر از جذب توان از آن باشد، ولتاژ شین به پایین‌تر از ولتاژ مرجع جزیره‌ای می‌رسد. در این حالت انتقال توان فقط از ریزشبه‌ها به شبکه توزیع DC میسر است. در این مد مجموع توان تولیدی PV، FC و ذخیره‌ساز انرژی بیش از توان مورد نیاز بار است بنابراین باتری شروع به دشارژ می‌کند و توان توسط مبدل DC-DC به شبکه توزیع DC منتقل می‌شود تا ولتاژ شین آن به مقدار نامی نزدیک شود.

بر حسب شرایط مختلف بار و توان تولیدی، ریزشبه‌ها وظیفه تولید توان مورد نیاز، ذخیره‌سازی توان مازاد و تغذیه بارهای مختلف شبکه را بر عهده دارد.

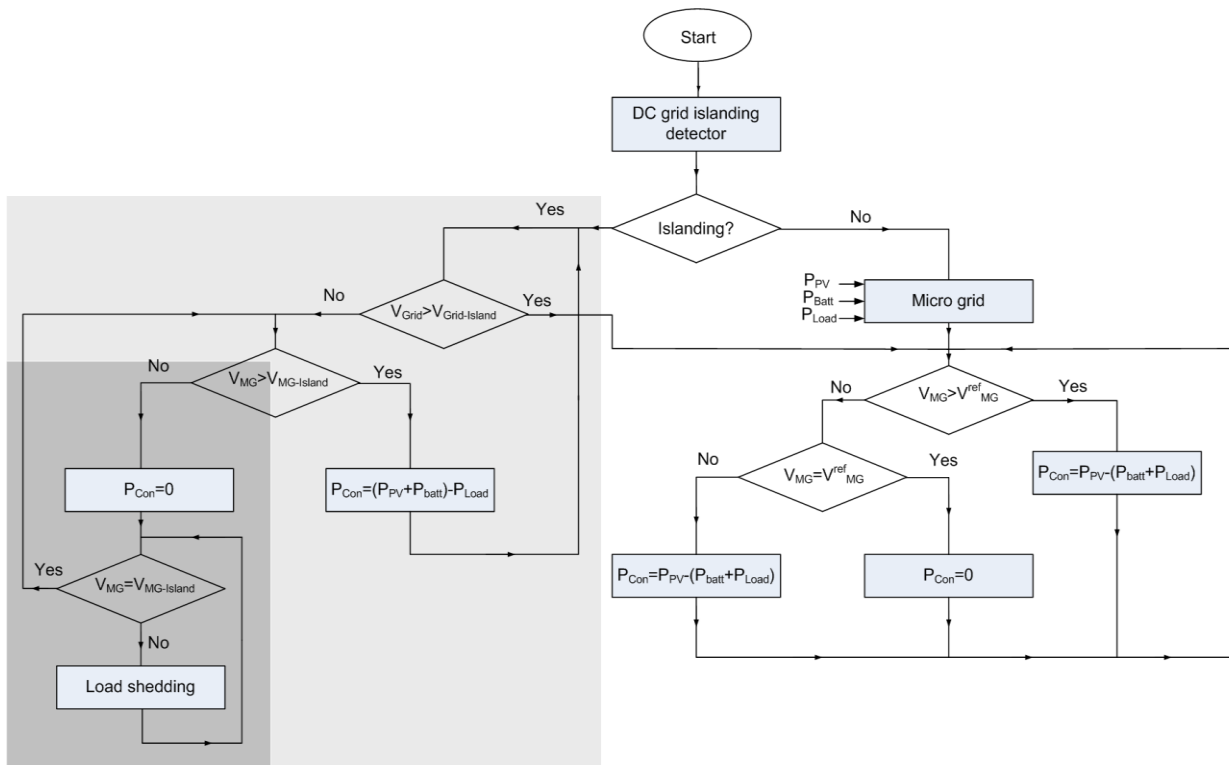
راهبرد مدیریت توان ریزشبه‌ها بر حسب وظایف تعیین شده برای هر یک از بخش‌های آن طراحی می‌شود. وظیفه تنظیم ولتاژ شین DC ریزشبه‌ها در زمان اتصال به شبکه توزیع DC بر عهده مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار است به طوری که این مبدل می‌تواند با استفاده از قابلیت انتقال دو طرفه توان کمبود توان ریزشبه‌ها را از شبکه توزیع DC جذب و مازاد توان تولیدی ریزشبه‌ها را به شبکه توزیع DC تزریق نماید. کنترل مبدل DC-DC افزایشنده متصل به پایانه منبع PV بر این اساس طراحی شده است که همیشه بیشینه مقدار توان PV به ریزشبه‌ها تزریق شود. مبدل DC-DC افزایشنده-کاهنده متصل به ترمینال ذخیره‌ساز انرژی در شرایطی که ریزشبه‌ها به شبکه توزیع DC متصل است وظیفه دارد مازاد توان تولیدی PV و FC که بعد از مصرف بارهای ریزشبه‌ها باقی می‌ماند جذب و صرف شارژ باتری نماید. توان تولیدی منبع PV که مازاد بر مصرف بار و شارژ ذخیره‌ساز انرژی است از طریق مبدل ماژولار به شبکه توزیع DC منتقل می‌شود تا ولتاژ شین DC عمومی ریزشبه‌ها در مقدار نامی تنظیم شود و دچار اضافه ولتاژ نشود. در صورتی که توان تولیدی منابع PV و FC کمتر از مجموع توان مورد نیاز مصرف بار و شارژ ذخیره‌ساز انرژی باشد مبدل ماژولار توان را از شبکه توزیع DC جذب و به ریزشبه‌ها تزریق می‌نماید تا شین DC ریزشبه‌ها در مقدار نامی تنظیم شود.

شبکه توزیع DC به شبکه سراسری متصل است و در حالت عادی می‌تواند از شبکه سراسری توان جذب نماید و یا مازاد توان ریزشبه‌های به هم پیوسته را به شبکه سراسری تزریق نماید. در شرایط بحرانی که شبکه سراسری دچار قطعی از بالادست می‌شود شبکه توزیع DC در حالت جزیره‌ای قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی هر یک از ریزشبه‌ها بر حسب شرایط منبع تولید توان، ذخیره‌ساز انرژی و بار می‌توانند در اتصال با شبکه توزیع باشند و یا به حالت جزیره‌ای درآیند که در این صورت مبدل DC-DC ذخیره‌ساز انرژی در حالت افزایشنده در حالت دشارژ ذخیره‌ساز انرژی کنترل می‌شود. اگر مجموع توان تولیدی منابع PV، FC و ذخیره‌ساز انرژی بیش از توان مصرفی بارها باشد، انرژی از ریزشبه‌ها به شبکه توزیع منتقل می‌شود که می‌تواند در ریزشبه‌هایی که نیاز به مصرف توان دارند جذب شود. زمانی که توان تولیدی منبع PV و ذخیره‌ساز انرژی کمتر از توان مورد نیاز

شبکه توزیع DC به ریزشبکه DC وجود ندارد فرآیند حذف بارهای غیرضروری ریزشبکه آغاز می‌شود تا ولتاژ شین DC ریزشبکه در حالت جزیره‌ای به مقدار نامی نزدیک شود.

$$\begin{aligned} P_{PV} + P_{FC} + P_{Batt} &\leq P_{Load} \\ P_{Conv} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

شکل (۸) روند نمای راهبرد پیاده‌سازی شده برای مدیریت توان ریزشبکه را در اتصال با ریزشبکه‌های دیگر نشان می‌دهد.



شکل ۸. روند نمای راهبرد مدیریت توان پیاده‌سازی شده برای ریزشبکه در اتصال با ریزشبکه‌های دیگر

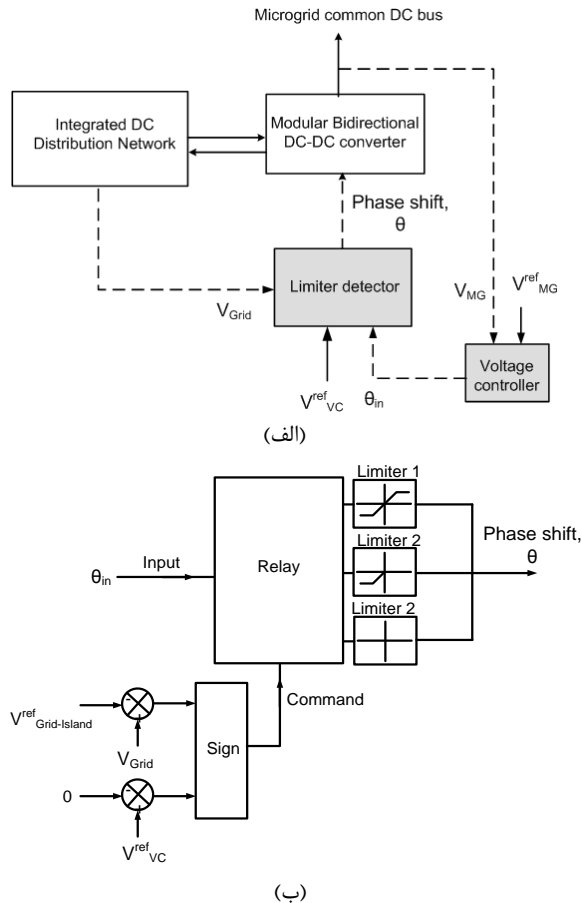
ولتاژ به کار گرفته شده است تا ولتاژ مرجع باتری V_{batt}^{ref} را با لحاظ کردن ولتاژ تنظیم باتری، V_{batt}^R ، و ولتاژ مرجع کنترل ولتاژ ریزشبکه، V_{VC}^{ref} ، کنترل نماید [۱۸]. کنترل کننده ولتاژ ریزشبکه، ولتاژ ریزشبکه را با ولتاژ مرجع حالت جزیره‌ای، $V_{MG-Island}^{ref}$ ، مقایسه می‌کند. ولتاژ $V_{MG-Island}^{ref}$ با توجه به وضعیت شارژ موجود باتری تعیین می‌کند. اگر ولتاژ باتری V_{batt} بیشتر از حداقل ولتاژ قابل قبول باتری V_{batt}^{min} باشد، رله موجود در مسیر ولتاژ V_{MG}^{ref} را برابر با V_{MG}^{ref} قرار می‌دهد و اگر ولتاژ باتری کمتر از حداقل ولتاژ قابل قبول باتری V_{batt}^{min} باشد یعنی باتری شارژ کافی برای تغذیه بار نداشته باشد، $V_{MG-Island}^{ref}$ توسط رله در مقدار ولتاژ مرجع حذف بار، V_{shed} ، قرار می‌گیرد تا از این طریق سیستم حذف بار فعال شود و بخشی از بارهای کم اهمیت ریزشبکه قطع

$$\begin{aligned} P_{PV} + P_{FC} + P_{Batt} &> P_{Load} \\ P_{Conv} &= P_{Load} - (P_{PV} + P_{FC} + P_{Batt}) < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

مد پنجم و ششم: این مد عملکرد حالت جزیره‌ای ریزشبکه را نشان می‌دهد. در این حالت مجموع توان PV، FC و باتری برای تغذیه بار کافی نیست. در صورتی که مجموع توان PV، FC و باتری با توان بار برابر باشد ریزشبکه در حالت ایزوله از شبکه توزیع DC تغذیه بار را دنبال می‌کند. اگر مجموع توان PV، FC و باتری کمتر از توان مورد نیاز بار باشد، چون امکان انتقال توان از

مبدل DC-DC ماژولار پیشنهادی به عنوان واسط انتقال توان بین ریزشبکه DC و شبکه توزیع DC وظیفه تثبیت ولتاژ شین DC ریزشبکه را در مقدار نامی آن بر عهده دارد. به دلیل وجود ترانسفورماتورهای فرکانس بالا بین دو پل ماژولار مبدل، ایزولاسیون الکتریکی بین ریزشبکه DC و شبکه توزیع DC فراهم می‌شود. مبدل ماژولار با استفاده از کنترل شیفت فاز بین $\pi/2$ تا $\pi/2$ توانایی کنترل جهت و مقدار توان را دارد. بلوک کنترل کننده ولتاژ شین DC ریزشبکه در شکل (۹) نشان داده شده است. ولتاژ شین DC ریزشبکه با مقدار ولتاژ مرجع آن، V_{MG}^{ref} ، مقایسه می‌شود و شیفت فاز لازم برای تعیین جهت و اندازه توان انتقالی مبدل DC-DC ماژولار جهت تثبیت ولتاژ ریزشبکه در مقدار نامی تعیین می‌شود. مطابق شکل (۱۰) یک حلقه خارجی کنترل

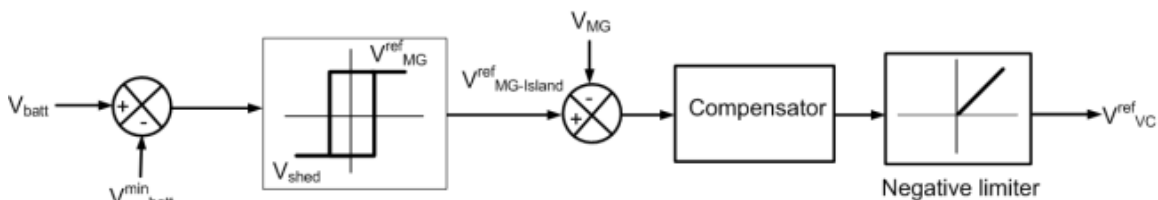
توان از ریزشبه‌ها به شبکه توزیع DC میسر می‌شود. حالت سوم زمانی رخ می‌دهد که هم ولتاژ شبکه توزیع DC از مقدار مرجع حالت جزیره‌ای‌اش کوچکتر باشد و هم ولتاژ ریزشبه‌ها از مقدار مرجع حالت جزیره‌ای‌اش کوچکتر باشد که در این صورت آشکارساز محدودکننده توان مبادله توان در هر دو مسیر را بلوکه می‌کند و زاویه شیفت فاز ورودی مبدل ماژولار برابر صفر می‌شود.



شکل ۹. (الف) بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ ریزشبه‌ها، (ب) بلوک دیاگرام آشکارساز محدودکننده زاویه شیفت فاز مبدل ماژولار

گردند. زمانی که توان تولیدی PV، FC و ذخیره ساز انرژی بیش از توان مورد نیاز بار باشد $V_{MG}^{ref} < V_{MG-Island}^{ref}$ خواهد بود و سیگنال تولیدشده توسط کنترل‌کننده ولتاژ ریزشبه‌ها توسط بلوک محدودکننده منفی صفر می‌شود. در این حالت $V_{batt}^{ref} = V_{batt}^R$ است و حلقه کنترل ولتاژ باتری با توجه به وضعیت ولتاژ شبکه توزیع DC فرآیند شارژ یا دشارژ را دنبال می‌کند. در حالت جزیره‌ای ریزشبه‌ها که توان تولیدی PV، FC و باتری کافی نیست، حلقه کنترل ولتاژ شبکه مثبت می‌شود و با تنظیم V_{batt}^{ref} ، V_{VC}^{ref} را کنترل می‌کند و با کنترل دشارژ باتری کمبود توان ریزشبه‌ها جبران می‌شود. ترکیب این دو حلقه کنترلی امکان برقراری تعادل توان و تنظیم ولتاژ شبکه را در حالت‌های مختلف بهره‌برداری فراهم می‌آورد.

قبل از اعمال زاویه شیفت فاز تعیین‌شده به کلیدهای مبدل، زاویه شیفت فاز مورد نظر وارد آشکارساز محدودکننده می‌شود. آشکارساز محدودکننده زاویه شیفت فاز بر حسب ولتاژ شین DC شبکه توزیع، V_{Grid} و اندازه ولتاژ مرجع کنترل ولتاژ ریزشبه‌ها جهت‌های ممکن برای انتقال توان را تعیین می‌کند. شکل (۹-ب) ارتباط بین خروجی کنترل‌کننده، آشکارساز محدودکننده^۱ زاویه شیفت فاز و زاویه شیفت فاز ورودی به مبدل را نشان می‌دهد. زمانی که ولتاژ شین DC شبکه توزیع بزرگ‌تر از مقدار مرجع ولتاژ جزیره‌ای آن، $V_{Grid-Island}^{ref}$ باشد رله آشکارساز محدودکننده شماره ۱ را فعال می‌کند که در این صورت مبادله دو طرفه توان از ریزشبه‌ها به شبکه توزیع DC و بالعکس در محدوده تعیین‌شده شیفت فاز میسر می‌شود. اگر ولتاژ شین DC شبکه توزیع کوچک‌تر از ولتاژ مرجع جزیره‌ای آن باشد ولی ولتاژ ریزشبه‌ها بزرگ‌تر از ولتاژ مرجع جزیره‌ای باشد، رله آشکارساز محدودکننده شماره ۲ را فعال می‌کند که در این صورت زاویه شیفت فاز فقط می‌تواند منفی باشد به عبارت دیگر فقط امکان انتقال یک طرفه



شکل ۱۰. بلوک دیاگرام کنترل‌کننده داخلی ولتاژ ریزشبه‌ها

^۱Limiter Detector

۳. نتایج و بحث

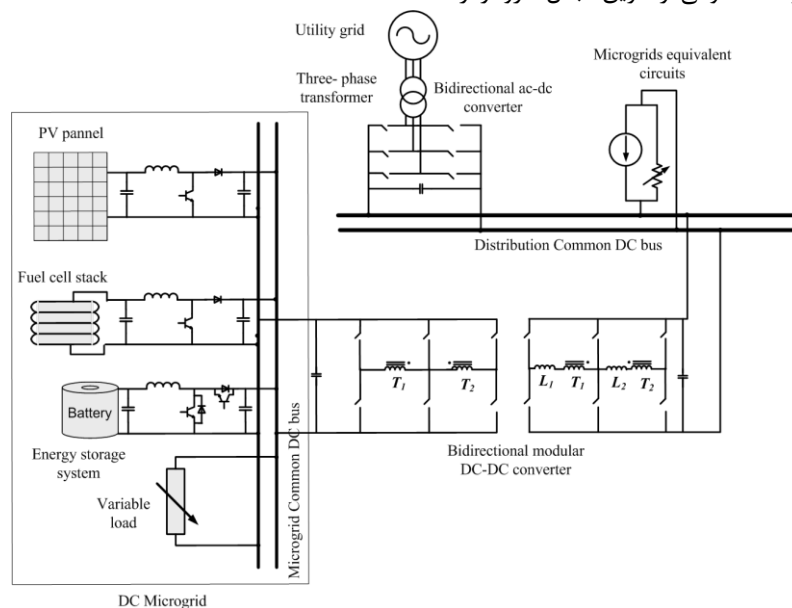
۳-۱. شبیه‌سازی رایانه

در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC به شبیه‌سازی عملکرد ریزشبه‌ساز DC در اتصال با شبکه توزیع DC در شرایط نرمال و در حالت بحرانی که شبکه توزیع DC از شبکه سراسری ایزوله شده باشد پرداخته می‌شود. ساختار شبکه شبیه‌سازی شده مطابق شکل (۱۱) است. تولید توان در ریزشبه‌ساز DC از طریق منابع PV و FC در نظر گرفته شده و از یک باتری که از طریق مبدل باک-بوست DC-DC دوطرفه به شین DC متصل می‌شود به عنوان ذخیره ساز انرژی استفاده شده است. تغییرات بار نیز به صورت پله‌ای در توان مصرفی لحاظ شده است. شبیه‌سازی بر اساس استراتژی مدیریت توان ذکر شده و نحوه عملکرد مبدل DC-DC به عنوان واسط انتقال توان بین ریزشبه‌ساز DC و شبکه توزیع DC انجام می‌شود. ولتاژ نامی شین DC شبکه توزیع ۲۰۰ ولت و ولتاژ نامی شین ریزشبه‌ساز ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شده است.

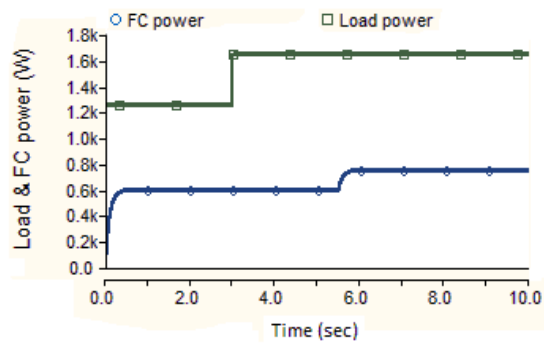
شکل (۱۲) نتایج شبیه‌سازی ریزشبه‌ساز DC را در سه بازه زمانی مختلف که هر یک نشان‌دهنده یکی از مدهای بهره‌برداری ریزشبه‌ساز است نشان می‌دهد. در بازه زمانی اول، $0 < t < 3 \text{ sec}$ ، توان تولیدی منبع PV و FC بیشتر از توان مورد نیاز تغذیه بارهای شبکه و شارژ باتری است بنابراین چون یکی از میانی عملکردی ریزشبه‌ساز استحصال حداکثر توان ممکن بر حسب شدت تابش نور خورشید و دمای محیط است مازاد توان تولیدی در ریزشبه‌ساز از طریق مبدل DC-DC ماژولار به شبکه توزیع DC منتقل می‌شود. توان تولیدی منبع PV ۱۶۰۰ وات، توان تولیدی منبع FC ۶۰۰ وات، توان مصرفی برای شارژ باتری ۵۵۰ وات و توان مصرفی بار ۱۲۵۰ وات است و توان مازاد ۴۰۰ وات از طریق مبدل ماژولار از

ریزشبه‌ساز به شبکه توزیع DC منتقل می‌شود. این حالت نشان‌دهنده مد اول عملکردی تعریف شده در قسمت قبل برای ریزشبه‌ساز است. در ثانیه ۳ شبیه‌سازی بار ریزشبه‌ساز از ۱۲۵۰ وات به ۱۶۵۰ وات افزایش می‌یابد در حالی که توان تولیدی منابع PV و FC همچنان در مقدار قبلی خود ثابت هستند. بنابراین برای حفظ ولتاژ ریزشبه‌ساز در مقدار نامی، توان انتقالی از ریزشبه‌ساز به شبکه توزیع DC به مقدار صفر کاهش می‌یابد. با توجه به نیاز باتری به شارژ بیشتر، در این مد ریزشبه‌ساز همچنان به شارژ باتری ادامه می‌دهد. عملکرد ریزشبه‌ساز در بازه زمانی دوم، $3 < t < 5 \text{ sec}$ ، نشان‌دهنده مد دوم بهره‌برداری آن است به طوری که توان تولیدی منبع PV فقط صرف توان مصرفی بار و شارژ باتری می‌شود.

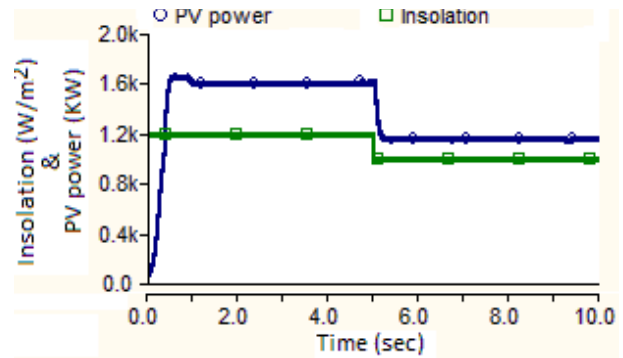
در ثانیه ۵ شبیه‌سازی کاهش در میزان شدت تابش نور خورشید باعث کاهش ۴۰۰ وات در مقدار حداکثر توان تولیدی منبع توان PV می‌شود. در این لحظه منبع توان FC به حداکثر ظرفیت ممکن خود یعنی ۷۵۰ وات افزایش داده می‌شود. با این حال ریزشبه‌ساز برای تأمین کمبود توان مورد نیاز بار و شارژ باتری نیاز به دریافت توان ۲۵۰ وات از شبکه توزیع DC دارد. در این مد مبدل DC-DC ماژولار ۲۵۰ وات توان از شبکه توزیع DC جذب و آن را به ریزشبه‌ساز انتقال می‌دهد تا توان مورد نیاز ریزشبه‌ساز تأمین شود. در بازه زمانی $5 < t < 10 \text{ sec}$ ، ریزشبه‌ساز در مد سوم مورد بهره‌برداری قرار دارد. مطابق شکل (۱۲-ب) در طول تغییرات توان مبادلاتی بین شبکه توزیع DC و ریزشبه‌ساز، شین DC ریزشبه‌ساز در مقدار نامی ۱۰۰ ولت تثبیت شده است که نشان از عملکرد مناسب کنترل‌کننده برای مبدل DC-DC ماژولار دارد.



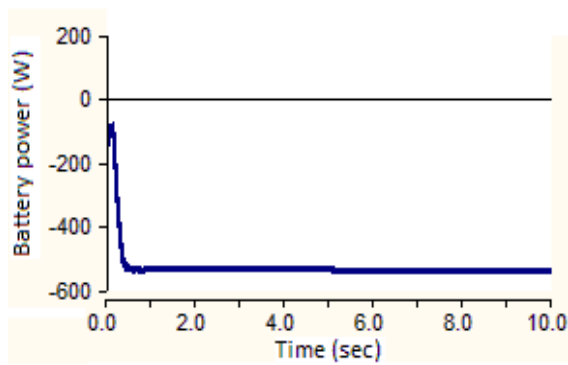
شکل ۱۱. ساختار شبیه‌سازی شده شبکه توزیع DC متشکل از اتصال ریزشبه‌سازهای به هم پیوسته



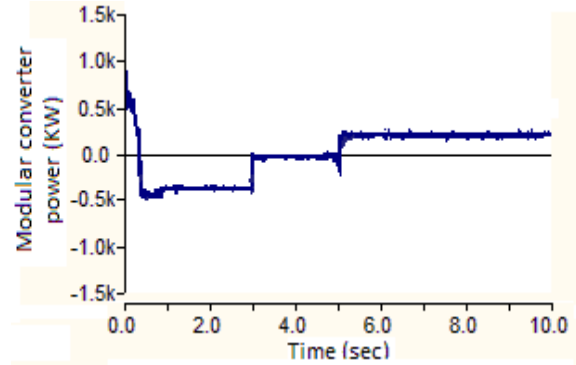
(ب)



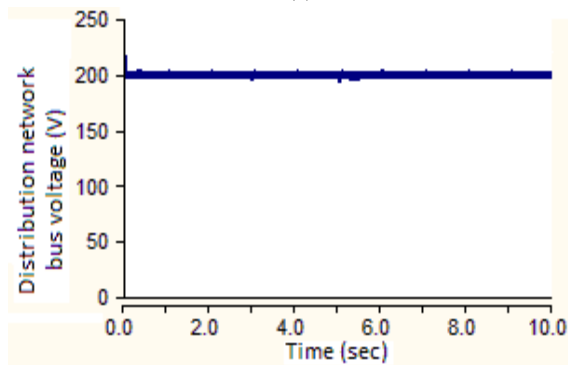
(ف)



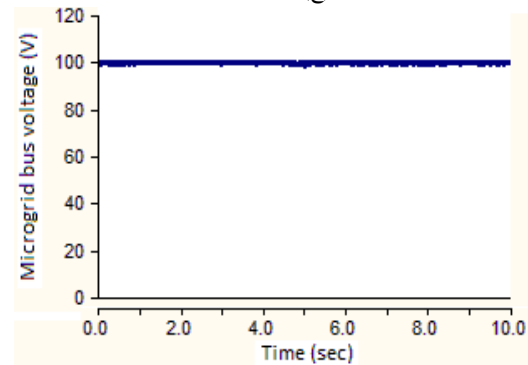
(د)



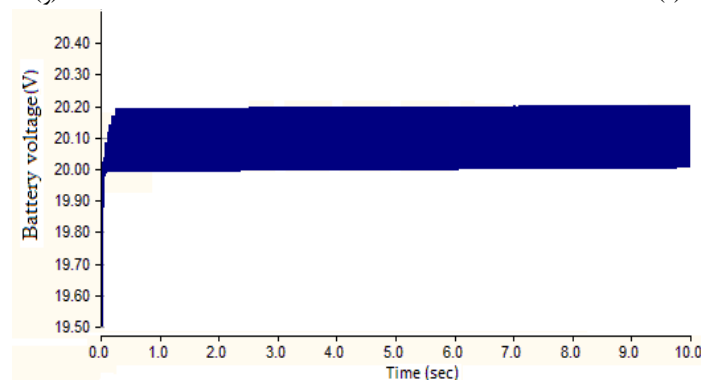
(ج)



(و)



(ه)

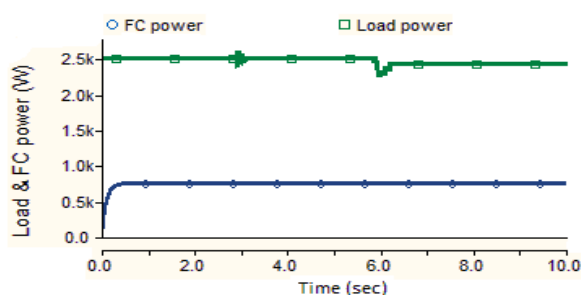


(ز)

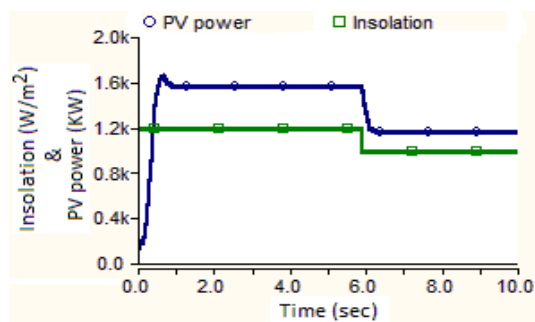
شکل ۱۲. شبیه‌سازی مدهای اول، دوم و سوم عملکردی ریزشبه DC، (الف) توان تولیدی منبع توان PV و شدت تابش نور خورشید، (ب) توان تولیدی منبع توان FC و تغییرات توان مصرفی بار ریزشبه، (ج) تغییرات توان انتقالی توسط مبدل DC-DC ماژولار، (د) تغییرات توان ذخیره ساز انرژی، (ه) ولتاژ شین DC ریزشبه، (و) ولتاژ شین DC شبکه توزیع DC و (ز) تغییرات ولتاژ باتری

و تغییرات ولتاژ ترمینال باتری را در طول عملکرد میدل در سه مد و لحظات گذار آن‌ها نشان می‌دهد. در بازه زمانی اول، $0 < t < 3 \text{ sec}$ ، توان 1600 وات تولیدی منبع PV و توان 750 واتی منبع FC برای تأمین توان بار 2500 وات کافی نیست بنابراین میدل ماژولار توان 150 وات را از شبکه توزیع DC به ریزشبه منتقل می‌کند.

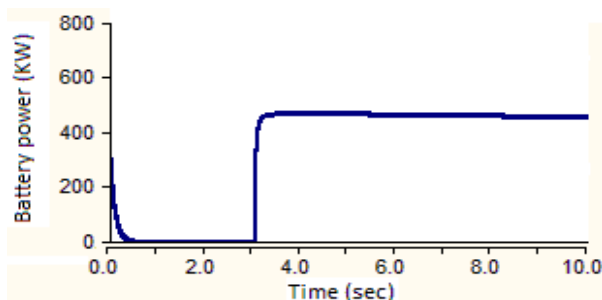
در قسمت دوم این بخش مطابق شکل (۱۳) به بررسی نتایج شبیه‌سازی عملکرد ریزشبه در طول مدهای بهره‌برداری چهارم، پنجم و ششم ریزشبه پرداخته می‌شود. در این شکل تغییرات توان تولیدی منابع PV و FC، تغییرات توان مصرفی بار، تغییرات توان شارژ ذخیره ساز انرژی، تغییرات توان انتقالی توسط میدل ماژولار، تغییرات ولتاژ شین‌های DC ریزشبه و شبکه توزیع DC



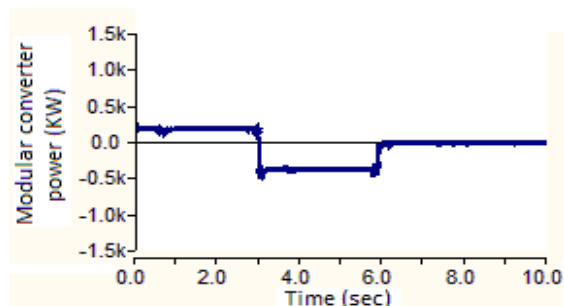
(ب)



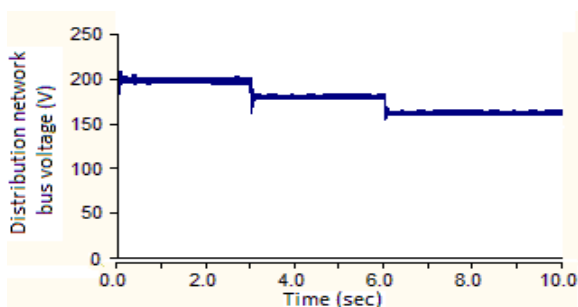
(الف)



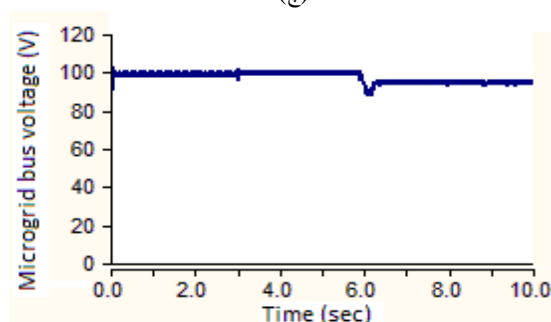
(د)



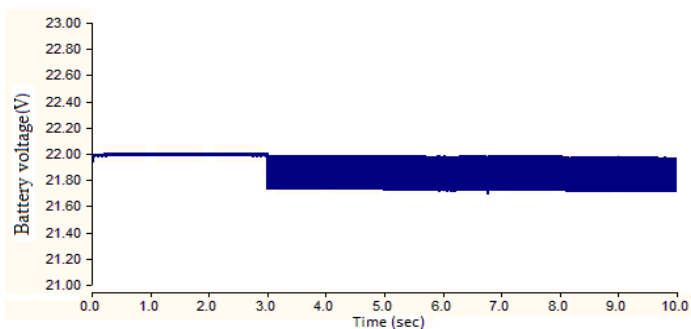
(ج)



(و)



(ه)



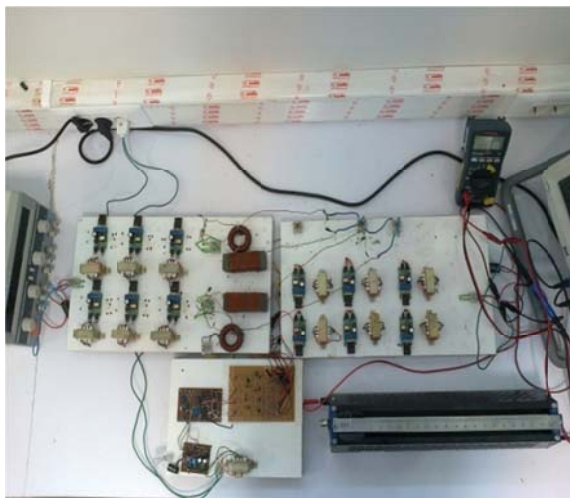
(ز)

شکل ۱۳. شبیه‌سازی مدهای چهارم، پنجم و ششم عملکردی ریزشبه DC، (الف) توان تولیدی منبع توان PV و شدت تابش نور خورشید، (ب) توان تولیدی منبع توان FC و تغییرات توان مصرفی بار ریزشبه، (ج) تغییرات توان انتقالی توسط میدل DC-DC ماژولار، (د) تغییرات توان ذخیره ساز انرژی، (ه) ولتاژ شین DC ریزشبه، (و) ولتاژ شین DC شبکه توزیع DC و (ز) تغییرات ولتاژ باتری

پیشنهادی در شکل (۱۴) و پارامترهای آن در جدول (۲) آمده است.

مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار پیشنهادی با دو ماژول برای توان ۱۰۰ وات پیاده‌سازی شده است و به این منظور زاویه شیفت فاز ۳۵ درجه بین دو پل ماژولار مبدل اعمال می‌شود. شکل (۱۵-الف) ولتاژهای موج مربعی اولیه و ثانویه یکی از ترانسفورماتورها را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، ولتاژ اولیه نسبت به ولتاژ ثانویه پیش‌فاز است و در این حالت توان از سمت اولیه مبدل به سمت ثانویه آن منتقل می‌شود. شکل (۱۵-ب) ولتاژ روی اندوکتانس کمکی خارجی مبدل و جریان عبوری از آن را نشان می‌دهد. همان طور که پیش‌تر اشاره شد اندوکتانس کمکی خارجی به همراه اندوکتانس نشستی ترانسفورماتورها به عنوان ذخیره کننده انرژی عمل می‌کنند و در واقع ولتاژ روی اندوکتانس‌ها اندازه جریان عبوری از یک سمت به سمت دیگر مبدل را تعیین می‌کند. برای ارزیابی عملکرد مبدل در انتقال دو طرفه توان ولتاژ اولیه نسبت به ولتاژ ثانویه به صورت پس‌فاز تنظیم می‌شود. شکل (۱۵-ج) پیش‌فازی ولتاژ مربعی ثانویه را نسبت به ولتاژ مربعی اولیه نشان می‌دهد بنابراین در این حالت توان از سمت ثانویه مبدل به سمت اولیه آن منتقل می‌شود. ولتاژ روی اندوکتانس کمکی خارجی و جریان عبوری از آن نیز در شکل (۱۵-د) نشان داده شده است.

نتایج اندازه‌گیری عملی توانایی مبدل DC-DC پیشنهادی را در انتقال دو طرفه توان از طریق تنظیم زاویه شیفت فاز نشان می‌دهد که این ویژگی مبدل، قابلیت آن را برای به کارگیری در نقش واسط انتقال توان بین ریزشبه DC و شبکه توزیع DC و تسهیل در پیاده‌سازی راهبرد مدیریت ریزشبه‌های به هم پیوسته نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. نمونه آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده مبدل ماژولار پیشنهادی

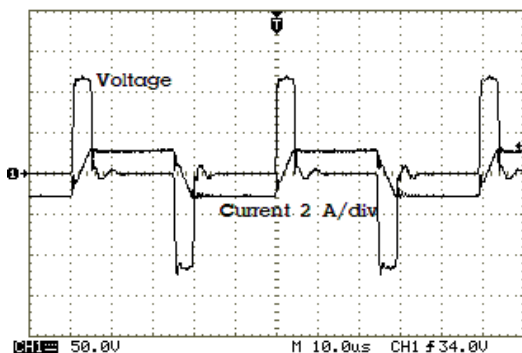
در این حالت باتری از قبل کاملاً شارژ شده و در حالت شناور قرار دارد. در ثانیه ۳ شبیه‌سازی در اثر رخ دادن شرایط اضطراری و قطعی بالادست، شبکه توزیع DC در حالت جزیره‌ای قرار می‌گیرد و ولتاژ شین DC آن با توجه به تزریق و جذب توان توسط ریزشبه‌ها به کمتر از مقدار ولتاژ مرجع جزیره‌ای کاهش می‌یابد. در حال حاضر توان تولیدی ریزشبه کمتر از توان مورد نیاز بار است چون شبکه توزیع در حالت ایزوله از شبکه سراسری قرار دارد و ولتاژ آن کمتر از مقدار مرجع حالت جزیره‌ای است، طبق راهبرد مدیریت توان ذکر شده، کمبود توان مورد نیاز بار از طریق دشارژ باتری تأمین می‌شود. در این حالت مازاد توان تولیدی منابع PV، FC و باتری در ریزشبه از طریق مبدل ماژولار به شبکه توزیع منتقل می‌شود تا از ذخیره توان ریزشبه مورد مطالعه برای مصرف در ریزشبه‌های متصل به شبکه توزیع DC استفاده شود و مانع از خاموشی بار آن‌ها شود.

کاهش ناگهانی در شدت تابش نور خورشید در ثانیه ۶ شبیه‌سازی باعث کاهش توان تولیدی منبع PV از ۱۶۰۰ وات به ۱۲۰۰ وات می‌شود. با مجموع توان منبع PV، منبع FC و دشارژ باتری همچنان توان مورد نیاز بار تأمین نمی‌شود و در نتیجه شین DC ریزشبه با افت ولتاژ روبرو می‌شود. ولتاژ کنترل ولتاژ ریزشبه، V_{VC}^{ref} ، بزرگ‌تر از صفر است و آشکارساز زاویه شیفت فاز مبدل این زاویه را برابر صفر قرار می‌دهد تا انتقال توانی بین ریزشبه و شبکه توزیع DC صورت نگیرد. با رخ دادن شرایط فوق طبق راهبرد مدیریت توان تعریف شده برای ریزشبه، ریزشبه شروع به حذف بارهای غیرضروری می‌کند تا زمانی که ولتاژ شین DC ریزشبه تا حد ممکن به مقدار نامی افزایش یابد. ولتاژ شین DC در هر یک از مدهای شبیه‌سازی ریزشبه چه در حالت متصل به شبکه توزیع DC و چه در حالت جزیره‌ای در مقدار مطلوب تنظیم شده است که این موضوع عملکرد مناسب سیستم کنترلی و راهبرد مدیریت توان را تأیید می‌کند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب مبدل پیشنهادی را به عنوان واسط مبادله توان بین ریزشبه DC و شبکه توزیع DC نشان می‌دهد. مبدل مورد نظر با توجه به قابلیت انتقال دو طرفه توان فقط با پس‌فاز یا پیش‌فاز کردن زاویه شیفت فاز راهبرد مدیریت توان در ریزشبه DC را تسهیل می‌کند و باعث می‌شود ریزشبه همیشه از منبع تولید توان PV و بدون توجه به ولتاژ شین DC ریزشبه حداکثر توان ممکن را جذب نماید.

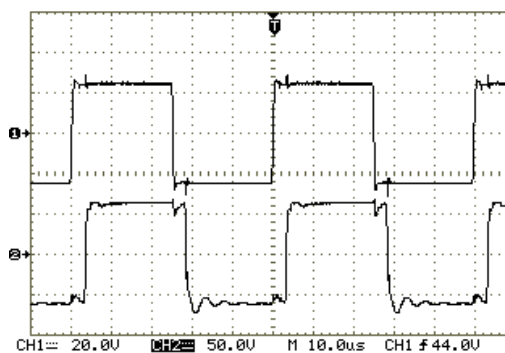
۳-۲. نتایج اندازه‌گیری عملی مبدل DC-DC پیشنهادی

به منظور بررسی اصول عملکرد مبدل DC-DC دو طرفه ماژولار پیشنهادی، یک نمونه آزمایشگاهی توان پایین مبدل پیاده‌سازی و مشخصات الکتریکی آن اندازه‌گیری می‌شود. پیکربندی مبدل

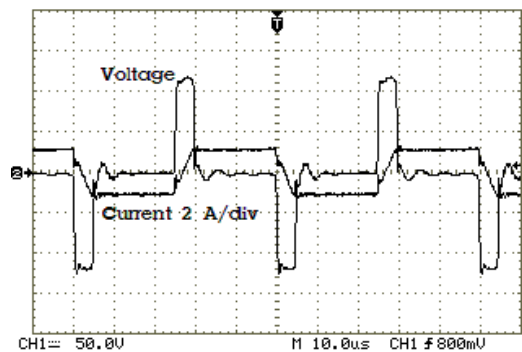
جدول ۲. مقادیر پارامترهای مبدل پیاده‌سازی شده	
۲	تعداد ماژول‌های مبدل
۱۰۰ وات	توان خروجی
۲۵ ولت	ولتاژ ثانویه
۶۰ ولت	ولتاژ اولیه
۲۰ کیلوهرتز	فرکانس کلیدزنی
۵۰:۱۲۰	نسبت تبدیل ترانسفورماتورها ($n_1:n_2$)
۳۵۵ میکروهمانری	اندوکتانس نشتی کل
۰/۱۸۵ اهم	مقاومت معادل کل
۲۲۰ میکرو فاراد	خازن فیلتر خروجی
۱۵۰ پیکو فاراد	خازن‌های اسنابر
IRFP250	کلیدهای پل‌های اولیه و ثانویه



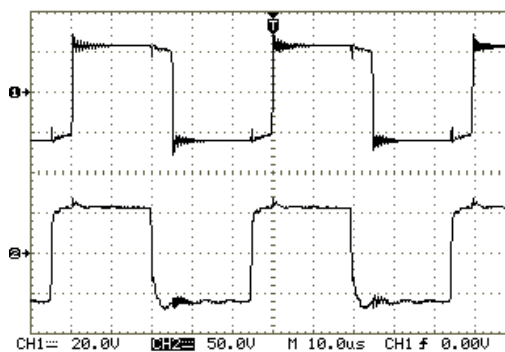
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۵. نتایج اندازه‌گیری عملی مبدل DC-DC ماژولار (محور عمودی ولتاژ بر حسب ولت، محور افقی زمان بر حسب میکروثانیه)، ولتاژ موج مربعی اولیه و ثانویه مبدل برای انتقال توان از اولیه به ثانویه مبدل، (ب) ولتاژ و جریان اندوکتانس کمکی خارجی برای انتقال توان از اولیه به ثانویه مبدل، (ج) ولتاژ موج مربعی اولیه و ثانویه مبدل برای انتقال توان از ثانویه به اولیه مبدل، (د) ولتاژ و جریان اندوکتانس کمکی خارجی برای انتقال توان از ثانویه به اولیه مبدل

خود بپردازند بلکه در شرایط اضطراری که تأمین توان از شبکه

۴. نتیجه‌گیری

سراسری میسر نیست از ظرفیت توان دیگر ریزشکبه‌ها برای تأمین توان بارهای خود بهره ببرند. یک مبدل DC-DC دو طرفه ایزوله ماژولار به عنوان واسط مبادله توان بین ریزشکبه DC و شبکه توزیع DC به کار گرفته شده و سپس نحوه مدیریت و کنترل توان ریزشکبه با هدف افزایش تداوم تغذیه بارهای

راهکاری که در این مقاله برای کمک به تأمین پدافند غیرعامل شبکه‌های توزیع نسل آینده بر پایه ریزشکبه‌ها ارائه شده است ایجاد یک شبکه توزیع متشکل از اتصال چند ریزشکبه به هم دیگر است تا نه تنها هر یک از ریزشکبه‌ها به تأمین توان بارهای

اندازه ولتاژ DC سمت ثانویه مبدل	V_2
ولتاژ DC سمت ثانویه منتقل شده به سمت اولیه	V'_2
ولتاژ باتری	V_{batt}
ولتاژ مرجع باتری	V_{batt}^{ref}
حداقل ولتاژ قابل قبول باتری	V_{batt}^{min}
ولتاژ تنظیم باتری	V_{batt}^R
ولتاژ شین DC شبکه توزیع	V_{Grid}
مقدار مرجع ولتاژ جزیره‌ای شبکه توزیع DC	V_{Grid}^{ref}
ولتاژ روی اندوکتانس معادل ترانسفورماتور	v_L
ریزشبکه با مقدار ولتاژ مرجع	V_{MG}^{ref}
ولتاژ مرجع حالت جزیره‌ای	$V_{MG-Island}^{ref}$
ولتاژ خازن خروجی	v_O
ولتاژ موج مربعی AC تولیدشده در سمت اولیه ترانسفورماتور	v_p
ولتاژ موج مربعی AC تولیدشده در ثانویه ترانسفورماتور	v_s
ولتاژ موج مربعی AC سمت ثانویه انتقال یافته به اولیه ترانسفورماتور	v'_s
ولتاژ مرجع کنترل ولتاژ ریزشبه	V_{VC}^{ref}
زاویه شیفت فاز عملی بین ولتاژ اولیه و ثانویه مبدل	θ
نسبت شیفت فاز برابر با θ/π	δ
تابع کلیدزنی پل مازولار اولیه ثانویه مبدل	$\eta_1(t)$
تابع کلیدزنی پل مازولار ثانویه مبدل	$\eta_2(t)$

۵. مراجع

- [1] Ranjbar, M. H.; Pirayesh, A. "A New Vulnerability Index of Power System due to Terrorist Threats"; *Advanced Defence Sci. & Tech.* 2016, 6, 289-297.
- [2] Tummuru, N. R.; Mishra, M. K.; Srinivas, S. "Multifunctional VSC Controlled Microgrid Using Instantaneous Symmetrical Components Theory"; *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2014, 5, 313-322.
- [3] Abdelaziz, M. A.; Farag, H. E.; El-Saadany, E. F. "Optimum Droop Parameter Settings of Islanded Microgrids with Renewable Energy Resources"; *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2014, 5, 434-445.
- [4] Wang, Z.; Chen, B.; Wang, J.; "Networked Microgrids for Self-Healing Power Systems"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2015, 7, 310-319.
- [5] Zhang, F.; Zhao, H.; Hong, M. "Operation of Networked Microgrids in a Distribution System"; *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 2015, 1, 12-21.
- [6] Sadeghi, H.; Abodollahi, A.; Mohammadian, M.; Rashidinejad, M. "Evaluating The Effects of Renewable Energy Resources from Passive Defense and Social Welfare Perspectives in the Context of Expansion Planning"; *Advanced Defence Sci. & Tech.* 2015, 6, 71-86.
- [7] Khanzadeh, M. "Decentralized Control of Electrical Energy for Sensitive Areas as Inverter-Based Islanded Microgrid without Frequency Change"; *Advanced Defence Sci. & Tech.* 2015, 6, 105-117.

ریزشبکه‌ها مطالعه شده است. (۴-۱) هر چند باید اذعان داشت که بروز مشکل در اینورتر مرکزی باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود ولی در صورت مجزا عمل کردن ریزشبه‌ها اگر تغذیه چند ریزشبه مجاور هم که از یک فیدر یا خط تغذیه استفاده می‌کنند قطع شود تمامی ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای قرار می‌گیرند. پیشنهاد این مقاله اتصال ریزشبه‌ها به هم دیگر است تا در چنین شرایطی از ظرفیت مازاد یکدیگر بهره ببرند. عملکرد یک ریزشبه DC بر پایه منبع تولید توان PV و FC در اتصال با شبکه توزیع DC شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از ریزشبه‌های به هم پیوسته و با بهره‌گیری از یک راهبرد مناسب مدیریت توان به افزایش امنیت ریزشبه‌ها در تأمین بارهای متصل به آن‌ها تحت شرایط اضطراری کمک کرد. در پایان به منظور بررسی اصول عملکرد مبدل DC-DC یک نمونه آزمایشگاهی از آن پیاده‌سازی شده است که نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری عملی مباحث نظریه مطرح شده برای مبدل را تأیید و قابلیت آن را برای به‌کارگیری به عنوان واسط انتقال توان بین یک ریزشبه DC و شبکه توزیع DC نشان می‌دهد.

علائم و اختصارات

FC	پیل سوختی
i_{12}	جریان عبوری از ترانسفورماتور و اندوکتانس معادل از سمت اولیه به سمت ثانویه
i_{21}	جریان عبوری از ترانسفورماتور و اندوکتانس معادل از سمت ثانویه به سمت اولیه
i_L	جریان ترانسفورماتور
K_p	ضریب تناسبی جبران ساز PI
L	اندوکتانس معادل ترانسفورماتور
n	نسبت تعداد دور سیم‌پیچ اولیه به سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور
N	تعداد مازول
P_{12}	توان انتقالی توسط یک مازول
PCC	نقطه اتصال مشترک
P_O	کل توان انتقالی مبدل مازولار
P_{Batt}	توان ذخیره ساز باتری
P_{Conv}	توان انتقالی توسط مبدل مازولار
P_{FC}	توان پیل سوختی
P_{Load}	توان بار ریزشبه
P_{PV}	توان منبع فتو ولتائیک
PV	منبع توان فتو ولتائیک
R_f	مقاومت معادل مازول
T_i	ضریب مشتقی جبران ساز PI
V_I	اندازه ولتاژ DC سمت اولیه مبدل

- [14] Xunwei, Y.; Xu, S.; Xijun, N.; Huang, Q. A. "System Integration and Hierarchical Power Management Strategy for a Solid-State Transformer Interfaced Microgrid System"; IEEE Trans. Power Electron. 2014, 29, 4414–4425.
- [15] Ye, Z.; Jain, P.; Sen, P. "Phasor-Domain Modeling of Resonant Inverters for High-Frequency AC Power Distribution Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2009, 24, 911–923.
- [16] Qin, H.; Kimball, J. W. "Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC–DC Converter"; IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 2078–2084.
- [17] Qin, H.; Kimball, J. W. "Closed-Loop Control of DC–DC Dual-Active-Bridge Converters Driving Single-Phase Inverters"; IEEE Trans. Power Electron. 2014, 29, 1006–1017.
- [18] Eghtedarpour, N.; Farjah, E. "Distributed Charge/Discharge Control of Energy Storages in a Renewable-Energy-Based DC Micro-Grid"; IET Renew. Power Gener. 2014, 8, 45–57.
- [8] Shahnia, F.; Chandrasena, R. P.; Rajakaruna, S.; Ghosh, A. "Autonomous operation of multiple interconnected microgrids with self-healing capability"; IEEE Power & Energy Society General Meeting 2013, 1–5.
- [9] Teixeira, A.; Paridari, K.; Sandberg, H.; Johansson, K. H. "Voltage Control for Interconnected Microgrids under Adversarial Actions"; IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA) 2015, 1–8.
- [10] Wang, Z.; Chen, B.; Wang, J.; Begovic, M. M. "Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems"; IEEE Trans. Smart Grid 2014, 6, 45–53.
- [11] Chen, Ch.; Duan, Sh. "Optimal Allocation of Distributed Generation and Energy Storage System in Microgrids"; IET Renew. Power Gener. 2014, 8, 581–589.
- [12] Bae, S.; Kwasinski, A. "Dynamic Modeling and Operation Strategy for a Microgrid with Wind and Photovoltaic Resources"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 1867–1876.
- [13] Xu, S.; Huang, A. Q.; Lukic, S.; Baran, M. "On Integration of Solid-State Transformer with Zonal DC Microgrid"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 975–985.