

# طراحی یک مبدل واسط چندسطحی خازن‌شناور برای ریزشبکه‌های هیبرید فشارمتوسط

مجتبی خدرزاده<sup>۱</sup>، دانشیار؛ میثم صادقی<sup>۲</sup>، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران - m\_khederzadeh@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران - Me\_sadeghi@sbu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک مبدل واسط بهبودیافته مبتنی بر مبدل چندسطحی مالتی‌سل خازن‌های شناور به منظور اتصال زیرشبکه‌های ac و dc یک ریزشبکه هیبرید فشارمتوسط، پیشنهاد شده است. ازجمله مهم‌ترین مزایای مبدل واسط پیشنهادی در مقایسه با مبدل‌های مرسوم می‌توان به افزایش در تعداد سطوح ولتاژ خروجی به همراه کاهش اندازه فیلتر، افزایش در تعداد حالت‌های دستیابی به سطوح ولتاژ مورد نظر، کاهش سطح ولتاژ و توان تجهیزات و خودتنظیمی طبیعی ولتاژ لینک dc و خازن‌های شناور اشاره نمود. مبدل چندسطحی پیشنهادی می‌تواند محدودیت‌های تبادل توان بین زیرشبکه‌های ac و dc را حداقل نماید. در این صورت پیچیدگی‌های کنترلی سیستم هیبرید به صورت قابل توجهی کاهش خواهد یافت. مبدل واسط براساس جهت تبادل توان هر دو نقش اینورتری و یکسوکنندگی را در سیستم هیبرید ایفا می‌نماید و می‌تواند کیفیت توان سیستم را به‌ویژه در حالت جزیره‌ای بهبود بخشد. همچنین قابلیت جالب توجه مبدل واسط در تثبیت ولتاژ لینک و باس dc زیرشبکه dc در عین حفظ کیفیت شکل‌موج‌های خروجی در بخش ac، ازجمله ویژگی‌های جالب توجه ساختار پیشنهادی می‌باشد. برای دستیابی به مزایای اشاره شده یک سیستم کنترلی بهبودیافته نیز برای مبدل واسط پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی جهت تأیید عملکرد و مزایای ساختار پیشنهادی ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تولیدپراکنده، مبدل مالتی‌سل خازن‌شناور، ریزشبکه هیبرید AC/DC، مبدل واسط، ولتاژ فشارمتوسط.

## Designing of a FCM Multilevel Interlinking Converter for Medium Voltage Hybrid Microgrids

Mojtaba Khederzadeh<sup>1</sup>, Associate Professor; Meisam Sadeghi<sup>2</sup>, PhD student

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, 16765-1719, Tehran, Iran, Email: m\_khederzadeh@sbu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, 16765-1719, Tehran, Iran, Email: Me\_sadeghi@sbu.ac.ir

**Abstract:** This paper presents an improved Flying Capacitor based multilevel converter to link ac and dc subgrids of a hybrid Medium Voltage (MV) microgrid. Increase in the number of output voltage levels with lower size of filters, increase in the number of combinations to obtain a desired voltage level (redundancy), lower voltage and power rating of components and natural self-balancing of flying capacitors and dc link voltage compared to other conventional converters are the main properties of proposed interlinking converter. The proposed multilevel converter can decrease the limitations on power transfer between ac and dc subgrids, which can significantly complicate the power management and control of hybrid systems. The interlinking converter plays both inverter-based and rectifier-based roles in hybrid system, depending on the power transfer direction. Multilevel based interlinking converters can improve the power quality of hybrid system especially during islanded modes. Furthermore, a modified control strategy has been presented for the interlinking converter. The proposed structure is simulated using PSCAD/EMTDC software and simulation results are presented to validate the effectiveness and advantages of the proposed configuration.

**Keywords:** Distributed generators (DGs), flying capacitor multicell (FCM) converter, hybrid ac/dc microgrid (MG), interlinking converter, medium voltage.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵ و ۱۳۹۶/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹

نام نویسنده مسئول: مجتبی خدرزاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها بخش اصلی از یک شبکه هوشمند می‌باشند که به انواع ac، dc و هیبرید طبقه‌بندی می‌شوند. ریزشبکه‌های ac و dc برای کاربردهای مختلف پیشنهاد شده است [۱-۲]. حضور و پیدایش ریزشبکه‌های ac و dc در کنار هم در سیستم‌های توزیع برق پیشرفته (مدرن) در سال‌های آتی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد که ریزشبکه‌ها را به نمونه‌های هیبرید توسعه داده است [۳]. بنابراین نیاز به یک سیستم ریزشبکه هیبرید ac/dc که به صورت هوشمند و قابل انعطاف عمل نماید در حال افزایش می‌باشد.

ساختارهای متنوعی برای ریزشبکه‌ها در عملکردهای متصل به شبکه و جزیره‌ای، با حضور پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها و ابرخازن‌ها در باس‌های ac و dc با رویکردهای کنترلی مختلف پیشنهاد شده است [۴-۵]. در دهه‌های اخیر، توجه به ریزشبکه هیبرید ac/dc افزایش یافته است. باین حال، اکثر مقالات منتشرشده به روش‌های کنترلی متناسب با این ریزشبکه‌ها به منظور مدیریت مناسب انرژی و در نتیجه کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان تمرکز نموده‌است. در مراجع [۵-۶] از کنترل دروپ برای کنترل مبدل‌ها در ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای استفاده شده است. در مراجع [۷-۹] تمرکز بر تبادل توان مناسب و ارتقاء عملکرد مبدل واسط با استفاده از پیشنهاد سیستم‌های کنترلی مناسب از جمله کنترل سلسله مراتبی بوده است. در مرجع [۱۰] به نقش مبدل در ایجاد یک تعادل بین اغتشاشات تولیدی در سمت ac و کنترل نوسانات سمت ac اشاره شده است و انواع مدهای کنترلی مبدل و تأثیر آن در ایجاد این تعادل اشاره شده است ولی به نقش توپولوژی مبدل اشاره‌ای نگردیده است. در مرجع [۱۱] نیز از مبدل واسط برای ارتقاء کیفیت توان ریزشبکه هیبرید به عنوان یک فیلتر اکتیو استفاده شده است. در مرجع [۱۲]، ساختار دو مبدل پشت‌به‌پشت با توپولوژی اینورتری و یکسکونددگی ساده پل سه فاز جهت اتصال دو ریزشبکه ac و ac به یکدیگر استفاده شده و امکان اتصال نمودن یک ریزشبکه dc نیز به بخش dc بررسی شده است.

با گسترش و نفوذ انواع منابع و بارهای ac و dc در ریزشبکه‌ها، به کارگیری شبکه‌های فشارمتوسط توان بالای هیبرید، که از ترکیب چندین ریزشبکه‌های ac و dc فشارضعیف به وسیله مبدل‌های دوجبهته به وجود آمده‌اند، در حال رشد می‌باشند. این روند یک فرصت مناسب برای به کارگیری فیدرهای فشارمتوسط در اتصال ریزشبکه‌ها ایجاد می‌کند [۱۳-۱۵]. با در نظر گرفتن زیربخش‌های ac و dc در ریزشبکه‌های مقیاس بزرگ، این ریزشبکه‌ها بایستی از طریق یک سیستم واسط توان بالا و ولتاژ فشارمتوسط به هم متصل شوند. در نتیجه با افزایش استفاده از سطوح فشارمتوسط برای سیستم‌های توزیع آینده و همچنین نقش اصلی ریزشبکه‌ها در این حوزه جدید، ریزشبکه‌های فشارمتوسط ac/dc بایستی با تجهیزات سازگار، با قابلیت اطمینان بالا و سیستم کنترل پیشرفته مجهز شوند.

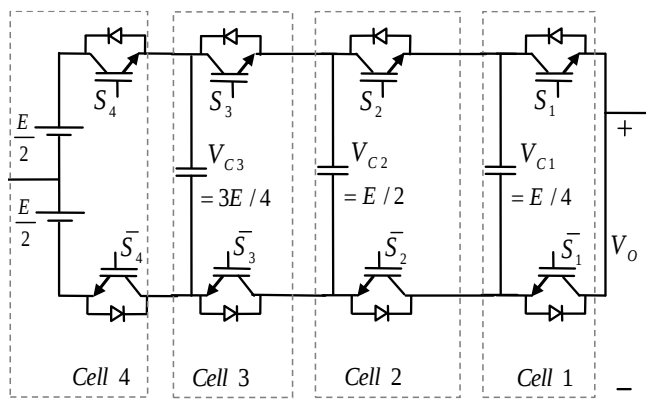
در میان این تجهیزات، مبدل واسط نقش بسیار مهمی را به عنوان یک درگاه برای امکان‌پذیر نمودن ارتباط و تعامل بین زیرشبکه‌های ac و dc ایفا می‌کند. با در نظر گرفتن میزان توان تبادل شده به وسیله این مبدل و سطوح ولتاژ آن، ساختار چندسطحی می‌تواند یک گزینه مناسب برای مبدل‌های واسط باشد. مبدل‌های چندسطحی یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربردهای توان بالا و فشارمتوسط می‌باشد [۱۵]. اخیراً این مبدل‌ها برای دستیابی به کاربردهای با توان و سطوح ولتاژ بالاتر در حال توسعه می‌باشند. مهم‌ترین مزایای مبدل‌های چندسطحی در مقایسه با مبدل‌های منبع ولتاژ مرسوم، شکل موج‌های با کیفیت توان بالا و ولتاژ شکست پایین تجهیزات کلیدزنی می‌باشد [۱۶]. این مبدل‌ها براساس ساختارشان به سه دسته اصلی: مبدل‌های دیود کلمپ یا (NPC)، مبدل‌های مالتی‌سل خازن شناور (FCM) و مبدل‌های پل H سری با ورودی‌های dc مستقل تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۷].

مبدل‌های خازن شناور مزایای جالب توجهی برای کاربردهای فشارمتوسط دارند. از این جمله می‌توان به قابلیت تنظیم ولتاژ خازن‌های شناور در مقادیر نامی به صورت خودکار و طبیعی اشاره نمود. این قابلیت مهم تحت عنوان خودتنظیمی شناخته شده و اجازه ساخت چنین مبدل‌هایی را با سطوح ولتاژ زیاد فراهم می‌نماید [۱۷]. با این وجود مبدل‌های چندسطحی دارای برخی معایب می‌باشند که از این جمله می‌توان به تعداد زیاد کلیدهای قدرت نیمه‌هادی اشاره نمود. اگرچه می‌توان از کلیدهای با ولتاژ نامی پایین برای ساخت مبدل‌های چندسطحی استفاده نمود ولی هر کلید نیاز به یک راه‌انداز و مدار حفاظتی خواهد داشت که این امر می‌تواند منجر به پیچیده شدن و گرانی سیستم گردد [۱۸].

اکثر قریب به اتفاق مقالات منتشرشده در حوزه کاربرد مبدل‌های واسط در ریزشبکه‌های هیبرید ac/dc مبتنی بر اینورترهای دو یا سه سطحی می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش توان نامی مبدل‌ها، تجهیزات کلیدزنی با ولتاژ نامی بالاتر بایستی به کار گرفته شوند تا بتوانند جریان نامی مبدل را کاهش دهند. این تجهیزات معمولاً قابلیت کلیدزنی در فرکانس‌های بالا را نداشته و از طرف دیگر در مقایسه با کلیدهای ولتاژ متوسط و پایین مشابه، گران‌قیمت‌تر می‌باشند.

لازم به ذکر است که مبدل‌های چندسطحی فقط به عنوان مبدل رابط منابع تولید پراکنده، منابع تجدیدپذیر و یا تجهیزات جبران‌ساز معرفی شده‌اند. در این حالت، کنترل تبادل توان معطوف به یک طرف بوده و با تمرکز سیستم کنترلی بر خروجی مبدل، عملکرد آن به صورت اینورتری و یا به صورت یکسکونکنده مورد ارزیابی و توجه قرار گرفته است. ساختار مبدل واسط ریزشبکه‌های هیبرید فشارمتوسط مبتنی بر مبدل FCM تاکنون معرفی نگردیده است. علاوه بر این در این کاربرد مبدل چندسطحی بایستی با یک کنترل توان دوجبهته مورد بررسی قرار گیرد. این کنترل بایستی به طور هم زمان کیفیت شکل موج‌ها و پایداری شبکه را در هر دو سمت ac و dc مورد توجه قرار دهد.

تعداد حالات مورد نیاز برای تولید سطوح ولتاژ، کاهش ولتاژ نامی خازن‌ها و انرژی ذخیره‌شده در آن‌ها و همچنین کاهش تلفات کلیدزنی می‌باشد [۱۷]. با توجه به مزایای اشاره شده یک مبدل سه‌فاز FCM هفت‌سطحه مشابه شکل ۳ به‌عنوان یک مبدل واسط در ریزشبه هیبرید فشارمتوسط طراحی گردیده است.



شکل ۲: ساختار مبدل FCM تک‌فاز ۴-سل ۵ سطحه

مطابق شکل ۲ هر مبدل FCM تک‌فاز دارای دو خازن در لینک dc می‌باشند. در نتیجه برای مبدل FCM سه‌فاز شش خازن dc مورد نیاز خواهد بود. با این حال در ساختار پیشنهادی (مطابق شکل ۳) تنها یک لینک dc برای مبدل FCM سه‌فاز استفاده شده است. همچنین تعداد سطوح ولتاژ خروجی نیز دو برابر گردیده است. در نتیجه علاوه بر کاهش تعداد لینک dcها از شش به یک در مقایسه با سایر مبدل‌های چندسطحی می‌توان با یک مبدل boost زیرشبه dc را به لینک dc متصل نمود.

### ۳- سیستم کنترلی پیشنهادی ریزشبه هیبرید AC/DC

تمامی مبدل‌های متصل شده بایستی طوری به‌صورت هماهنگ با یکدیگر و با شبکه کنترل شوند که بتوان یک توان با کیفیت و بهره‌وری بالا را بدون وقفه برای بارهای ac و dc تحت شرایط مختلف تولید منابع پراکنده در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه را فراهم نمود. لذا در ادامه سیستم کنترل پیشنهادی در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای ارائه می‌گردد.

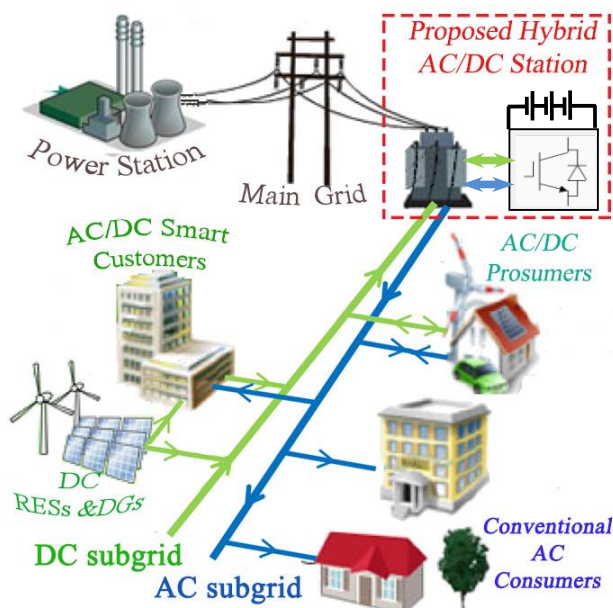
#### ۳-۱- حالت متصل به شبکه

در این حالت، ارتقا کیفیت شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ و تأمین توان راکتیو مورد نیاز باس ac توسط مبدل واسط اصلی فراهم می‌شود. در سمت dc نیز، مبدل واسط بایستی ولتاژ باس dc را به‌صورت پایدار برای زیرشبه dc فراهم نموده و به‌صورت مناسب تبادل توان بین باس‌های dc و ac را انجام دهد. مبدل‌های رابط DGها نیز طوری کنترل می‌شوند که با شبکه ac سنکرون بوده و حداکثر توان تولید (MPPT) را برای منابع تجدیدپذیر و تولید پراکنده دنبال کنند [۱۱].

با توجه به موارد اشاره‌شده در این مقاله یک ریزشبه فشارمتوسط هیبرید ac/dc مبتنی بر یک مبدل واسط FCM سه‌فاز تمام پل ۴ سل ۹ سطحی معرفی شده است. در این مقاله محدودیت‌های ناشی از اندازه تبادل توان مابین زیرشبه‌های ac و dc که می‌تواند کنترل و مدیریت توان شبکه هیبرید را بسیار پیچیده نماید حداقل شده است. از طرف دیگر کیفیت ولتاژ و جریان هر دو سمت سیستم واسط با کاهش رپیل‌ها، هارمونیک‌های تزریقی و THD با توجه به کاربرد مبدل FCM ارتقا پیدا کرده است. یک سیستم کنترلی بهبود یافته نیز به‌منظور تسهیم توان مابین زیرشبه‌های ac و dc برای این سیستم پیشنهاد شده است.

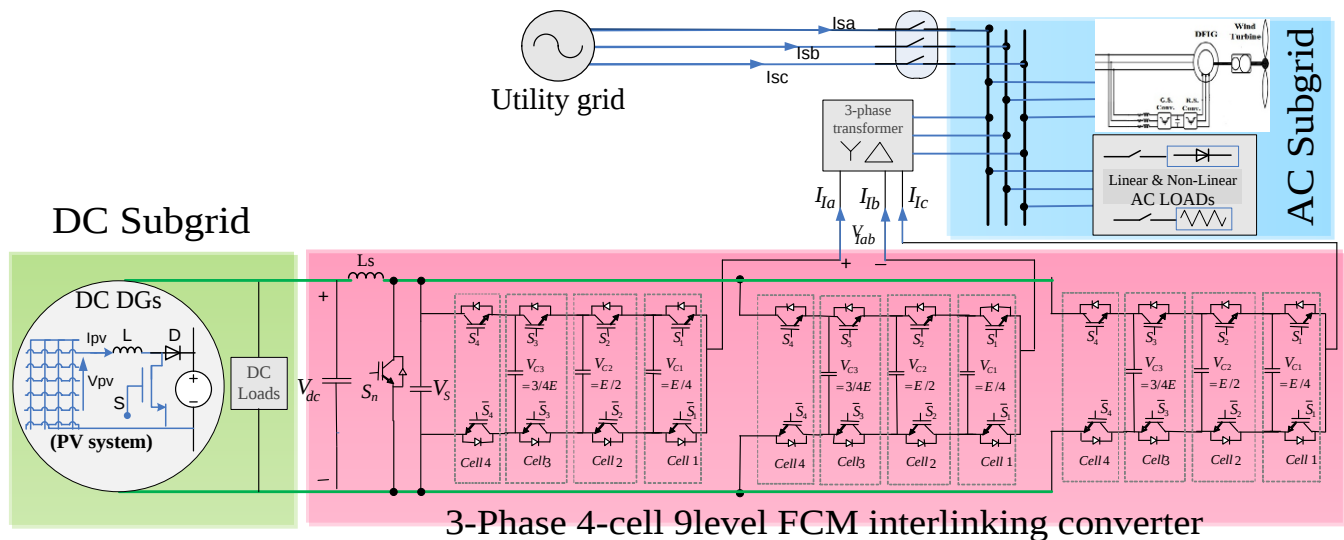
### ۲- ریزشبه هیبرید AC/DC مبتنی بر مبدل واسط FCM

شکل ۱ ساختار یک ریزشبه فشارمتوسط هیبرید ac/dc را که فیدرهای ac و dc آن از یکدیگر تفکیک شده‌اند نشان می‌دهد. در این شبکه فیدر توزیع سه‌فاز مرسوم به‌عنوان زیرشبه ac به کار گرفته شده است. یک فیدر مجزا به‌عنوان زیرشبه dc نیز به سیستم اضافه گردیده است که منابع و بارهای dc را به یکدیگر متصل می‌کند. نهایتاً، یک پست هیبرید ac/dc نیز کنترل و تبادل انرژی ac و dc را که از بخش شبکه و تولیدات پراکنده تولید شده و توسط بارهای ac و dc مصرف می‌شود را به‌عهده دارد.



شکل ۱: ساختار پیشنهادی ریزشبه فشارمتوسط هیبرید ac/dc با تولید و مصرف مجزای ac و dc

با عنایت به نقش اصلی مبدل‌های واسط در ریزشبه‌های هیبرید برای مدیریت تبادل توان، یک ساختار جدید برای مبدل واسط سه‌فاز براساس مبدل FCM پیشنهاد می‌شود. یک مبدل FCM تک‌فاز ۴-سل ۵-سطحه در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۷]. ازجمله مزایای این مبدل قابلیت خودتنظیمی ولتاژ خازن‌های شناور و لینک dc، افزایش در



شکل ۳: ساختار پیشنهادی مبدل واسط FCM برای ریزشبه فشارمتوسط هیبرید ac/dc

$P_s$ : توان تزریقی از شبکه به زیرشبه هیبرید ac/dc  
 $P_{conv}$ : توان تبادل شده از طریق مبدل واسط بین زیرشبه ac و dc (از سمت dc به ac)  
 $P_b$ : توان تزریق شده به باتری

به منظور کنترل مبدل واسط، جریان‌های مرجع مبدل براساس تعیین مقادیر لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو با استفاده از تئوری کنترل p-q یا کنترل توان راکتیو لحظه‌ای (IRP) استخراج می‌شود. لذا، جریان و ولتاژهای بخش ac مطابق تبدیل کلارک به فرم  $\alpha\beta 0$  تبدیل شده و توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای مطابق روابط زیر تعریف می‌گردد [۱۸]:

$$\begin{aligned} P &= v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ Q &= v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

که  $v_{\alpha}$ ,  $i_{\alpha}$ ,  $v_{\beta}$ ,  $i_{\beta}$ ، ولتاژها و جریان‌های سه فاز ac در فرم  $\alpha\beta 0$  می‌باشند.

با توجه به اینکه مبدل واسط وظیفه تبادل توان بین زیرشبه‌های ac و dc را به عهده دارد، برای تزریق توان زیرشبه dc نیز، یک پارامتر dc اضافی تحت عنوان  $(P_{dc DGs})$  نیز بایستی در نظر گرفته شود. همچنین پارامتر دیگری تحت عنوان  $(P_{dc cap})$  بایستی به صورت منفی در نظر گرفته شود تا توان لازم را برای تنظیم ولتاژ خازن، شارژ باتری و تغذیه بارهای dc تأمین نماید. در نتیجه جریان‌های مرجع براساس مقادیر توان با توجه به رابطه (۴) استخراج می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,ref} \\ i_{\beta,ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P + P_{dc DGs} - P_{dc cap} \\ Q \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$(P_{dc cap} = P_{v dclink} + P_{dc, loads} + P_b)$$

$$v_{\alpha\beta}^2 = v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 \quad \text{که}$$

اگر توان خروجی منابع dc از بارهای dc بزرگ‌تر باشد، مبدل واسط به عنوان یک اینورتر عمل کرده و توان را از زیرشبه dc به ac تزریق می‌کند. در صورتی که مجموع توان تولیدی از مجموع بار dc کم‌تر باشد، مبدل واسط توان را از زیرشبه ac به dc تزریق می‌کند و اگر کل مجموع توان تولیدی از مجموع بار dc شبکه هیبرید بزرگ‌تر باشد، توان تولیدی اضافی به شبکه برق تزریق خواهد شد. در غیر این صورت، ریزشبه هیبرید، توان از شبکه دریافت خواهد کرد.

با در نظر گرفتن عملکرد دوطرفه مبدل واسط در ترکیب ویژگی‌های زیرشبه ac و dc به صورت یکپارچه، ملزومات کنترلی مبدل شامل موارد زیر خواهد بود:

- تخمین مناسب میزان تبادل توان بین زیرشبه‌های ac و dc
  - استخراج مناسب سیگنال‌های مرجع هر دو زیرشبه به صورت هماهنگ برای مبدل واسط
  - تأمین ملزومات کنترلی مبدل واسط FCM برای حفظ ویژگی‌ها و مزایای آن
  - تأمین ملزومات کنترلی MPPT برای تزریق حداکثر توان واحدهای تولیدپراکنده ac و dc
- معادلات تبادل توان زیرشبه‌های ac و dc به صورت روابط (۱) و (۲) می‌باشد.

$$P_s + P_{ac DGs} + P_{conv} = P_{ac loads} \quad (1)$$

$$P_{dc DGs} = P_{conv} + P_{dc loads} \quad (2)$$

که در آن‌ها:

$P_{ac DGs}$ : توان تولیدی منابع پراکنده ac

$P_{dc DGs}$ : توان تولیدی منابع پراکنده dc

$P_{ac loads}$ : بار متصل به شبکه ac

$P_{dc loads}$ : بار متصل به شبکه dc

$\rho$ : چگالی هوا

$A$ : مساحت دورانی روتور

$C(\lambda, \beta)$ : ضریب توان توربین که به صورت تابعی از:  $\lambda$  (نسبت سرعت نوک پره) و  $\beta$  (زاویه پره و پیچ) می باشد.

$V_w$ : سرعت باد

حال با در نظر گرفتن مدل دینامیکی یک ژنراتور القایی و براساس معادلات ولتاژ و گشتاور الکترومکانیکی برحسب جریان روتور و استاتور در محور  $d-q$  مبدل ac/dc/ac پشت به پشت سیستم DFIG بایستی به نحوی در حالت متصل به شبکه کنترل شود که ضمن سنکرون نمودن ولتاژ خروجی سیستم بادی با شبکه بالادست، امکان دستیابی به استحصال توان بیشینه (MPPT) را نیز در این حالت فراهم نماید.

کنترل DFIG بایستی با هماهنگی کنترل مبدل های سمت شبکه و مبدل سمت روتور، ولتاژ لینک DC مبدل پشت به پشت را تأمین نماید. در نتیجه مبدل سمت شبکه بایستی ضمن تنظیم ولتاژ لینک DC، ولتاژ خروجی مبدل را نیز با ولتاژ شبکه سنکرون نماید. از طرف دیگر، مبدل سمت روتور نیز بایستی ضمن استحصال توان بیشینه، توان راکتیو استاتور را نیز مدیریت نماید که این کنترل، با تنظیم جریان روتور قابل دستیابی می باشد. روش های کنترلی متفاوتی برای سیستم بادی DFIG پیشنهاد شده است [۱۹]. در این مقاله از روش کنترل مستقیم گشتاور (Direct torque control (DTC)) برای کنترل مبدل سمت روتور سیستم بادی استفاده می شود.

در مرحله اول، سرعت زاویه ای روتور ( $\omega_r$ )، با توجه به الگوریتم استحصال توان بیشینه (MPPT) مورد استفاده براساس مشخصات توان و سرعت باد توربین بادی (سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه برای توان ماکزیم نامی توربین) استخراج می شود [۲۰]. سپس اندازه گشتاور الکترومکانیکی مرجع  $T_{em}^*$ ، به کمک توان مکانیکی ژنراتور  $P_m$  و سرعت زاویه ای ( $\omega_r$ )، محاسبه می شود. در مرحله بعد، با توجه به معادلات دینامیکی ژنراتور القایی، اندازه جریان مرجع روتور در محور  $d$  - ( $i_{dr}^*$ )، با تخمین شار استاتور و در نظر گرفتن مشخصات ژنراتور محاسبه می گردد [۴]. حال برای استخراج کلیدزنی مبدل، با مقایسه جریان های مرجع با جریان های تخمین زده شده براساس ولتاژ و جریان های اندازه گیری شده، ولتاژ های مرجع تولیدی مورد نیاز به کمک یک کنترل کننده PI، به دست می آید.

در نهایت به کمک روش PWM، بازه های کلیدزنی مبدل سمت روتور با سیگنال های ولتاژ مرجع تولیدی محاسبه می شود. در صورتی که بخواهیم سیستم بادی توان راکتیو نیز تزریق نماید، براساس تغییرات توان راکتیو و مقایسه آن با تخمین شار می توان میزان تزریق توان راکتیو را نیز با توجه به معادلات دینامیکی ژنراتور در محور  $q$ ، کنترل نمود. بلوک دیاگرام کلی کنترل سیستم بادی پیشنهادی در شکل ۴-ج نشان داده شده است.

نهایتاً با معکوس کردن تبدیل کلارک جریان های مرجع مبدل واسط در فرم  $abc$  به دست می آید. در مرحله بعدی با استفاده از کنترل پیش بینی جریان، ولتاژ های مرجع به فرم گسسته استخراج خواهد شد. نهایتاً با استفاده از قانون کیرشهف برای جریان ها در نقطه اتصال مشترک ولتاژ مرجع مطابقه رابطه (۵) به دست می آید [۱۱]:

$$v_{conv}^*(n+1) = v_s(n) + L_t \left( \frac{i_s(n) - i_s^*(n)}{T_s} \right) \quad (5)$$

به منظور تأمین شرایط مبدل FCM روش کنترل مدولاسیون پهنای باند شیفت فاز (PS-PWM) استفاده می شود. شرط اصلی برای خودتنظیمی مبدل این است که متوسط جریان های خازن های شناور صفر گردد. در نتیجه هر یک از سل ها بایستی با یک بازه زمانی مشخص طوری کلیدزنی گردند که اختلاف فاز بین کریرهای هر سل از رابطه (۶) حاصل گردد [۱۸].

$$\theta = \frac{2\pi}{n} \quad (6)$$

که  $n$  تعداد سل ها می باشد. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی اصلی پیشنهاد شده برای مبدل واسط FCM مطابق شکل ۴-الف می باشد. در حالت متصل به شبکه، مبدل های متصل به PV ها و توربین های بادی بایستی در مد MPPT عمل نمایند. لذا در ادامه یک سیستم خورشیدی متصل به زیر شبکه dc و یک سیستم بادی DFIG متصل به زیر شبکه ac بررسی و سیستم کنترلی مناسبی نیز در این حالت برای آن ها پیشنهاد می گردد.

برای یک سیستم فتوولتائیک، جهت استحصال توان بیشینه بایستی مقدار بهینه ولتاژ خروجی پنل خورشیدی را جهت تزریق حداکثر توان دنبال نمود. همان طور که می دانیم شیب منحنی توان-ولتاژ PV در MPPT برابر صفر می گردد. در نتیجه می توان از یک کنترل کننده تناسبی انتگرالی (PI) برای تنظیم  $\frac{dP}{dV}$  به مقدار صفر استفاده نمود. سپس خروجی کنترل کننده PI به منظور تعیین بازه کلیدزنی مبدل Boost ( $S_{pv}$ ) استفاده می شود [۱۸]. با در نظر گرفتن ملزومات کنترلی اشاره شده، بلوک دیاگرام کنترلی سیستم فتوولتائیک در حالت متصل به شبکه در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

در ادامه مدل یک سیستم بادی شامل یک ژنراتور توربین بادی با DFIG (Doubly Fed Induction Generator) که به زیر شبکه ac متصل می باشد، مورد بررسی قرار می گیرد. توان خروجی تولیدی ژنراتور توربین بادی برحسب سرعت باد از رابطه زیر استخراج می گردد:

$$P_w = \frac{\rho \times A \times C(\lambda, \beta)}{2} V_w^3 \quad (7)$$

که در آن:

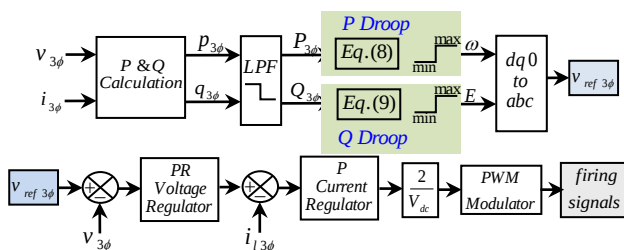
با استفاده از معادلات کنترل دروپ، فرکانس مرجع مبدل منبع (ω) و دامنه ولتاژ (E) می‌تواند به‌ترتیب از اندازه‌گیری توان اکتیو (P) و راکتیو (Q) حاصل شود. این معادلات در ۸ و ۹ بیان شده‌اند.

$$\varphi = \varphi^* - mP \quad (\wedge)$$

$$E = E^* - nO \quad (9)$$

که در آن  $\omega^*$  و  $E^*$  فرکانس مرجع و دامنه ولتاژ در بی‌باری هستند و  $n$  و  $m$  ضرایب دروپ می‌باشند.

با در نظر گرفتن روابط (۸) و (۹)، ولتاژ مرجع مطابق بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۵، براساس مقادیر ولتاژ و جریان اندازه گیری شده محاسبه می گردد. سپس، ولتاژ مرجع حاصل شده در مرحله بعد وارد یک تنظیم کننده ولتاژ دو حلقه ای می شود که در شکل ۵ نشان داده شده است و شامل یک حلقه جریان داخلی تناسبی و یک حلقه ولتاژ رزونانسی (PR) می باشد.

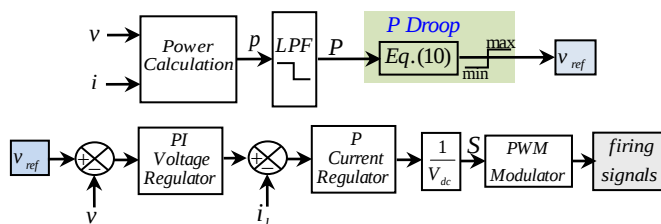


شکل ۵: سیستم کنترلی برای منابع تولید پراکنده ac

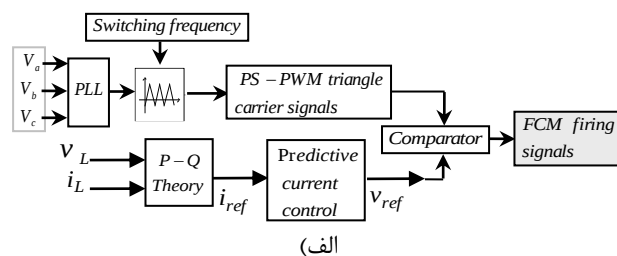
کنترل زیرشبکه dc از کنترل زیرشبکه ac به دلیل نبود فرکانس و توان راکتیو ساده تر بوده و تنها پارامتر و قابل کنترل دامنه ولتاژ می باشد. بنابراین تسهیم توان اکتیو (P) مابین منابع dc, DG می تواند به وسیله کنترل دروپ ولتاژ مطابق رابطه (۱۰) تنظیم شود [۱۴ و ۲۱].

$$V = V^* - qP \quad (10)$$

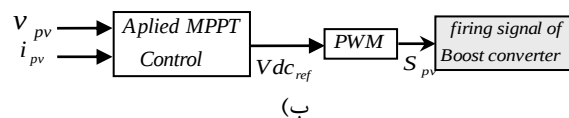
که در آن  $V^*$  ولتاژ خروجی بی‌باری منابع dc،  $a$  ضریب دروپ می‌باشد. بلوک دیاگرام کنترلی dc در شکل ۶ نشان داده شده است. بر این اساس ولتاژ مرجع به‌دست آمده از رابطه (۱۰) وارد تنظیم‌کننده ولتاژ PI می‌گردد. نهایتاً خروجی کنترل ولتاژ خروجی و کنترل جریان تناسبی داخلی، می‌تواند بازه کلیدزنی، مبدل Boost را فراهم نماید [۸].



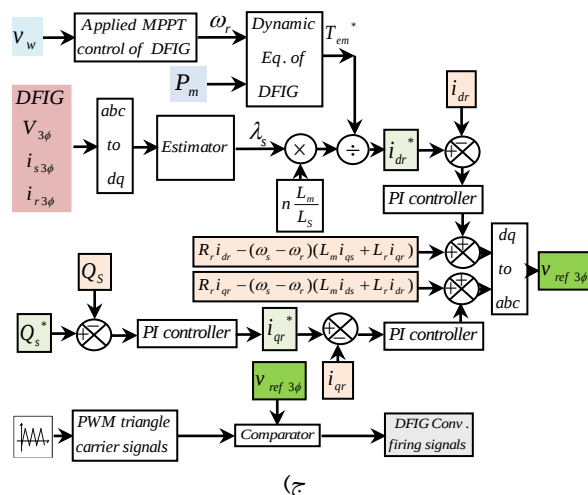
شکل ۶: سیستم کنترلی برای منابع تولیدیراکنده dc



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: سیستم کنترلی پیشنهادی برای (الف) مبدل واسط، (ب) سیستم فتوولتائیک و (ج) سیستم بادی DFIG در حالت متصل به شبکه

### ۲-۳- حالت جزیره‌ای

با در نظر گرفتن عملکرد جزیره‌ای به‌صورت مستقل در یک ریزشبهه، از کنترل دروپ می‌توان برای تسهیم توان بین منابع استفاده نمود. تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص این تئوری صورت گرفته است با این وجود بسیاری از این مطالعات به ریزشبهه‌های ac محدود می‌شوند. هرچند کنترل دروپ ریزشبهه‌های dc نیز در دو دهه اخیر مطالعه شده‌اند. با در نظر گرفتن یک ریزشبهه هیبرید ac/dc و سه حالت مختلف آن، این کنترل می‌تواند در سه حالت مختلف جدا از هم، اما تقریباً مرتبط به هم شامل موارد زیر باشد [۲۱-۲۳]:

- کنترل دروپ زیر شبکه AC
- کنترل دروپ زیر شبکه DC
- کنترل دروپ هماهنگ مدیا واسط

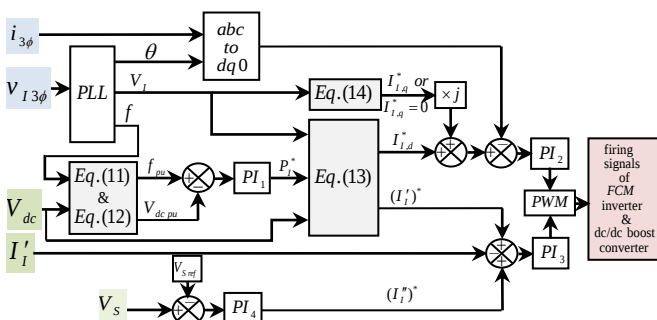
برای کنترل تولید منابع با توجه به اینکه کنترل دروپ در هر دو زیر شبکه مربوط به ریز شبکه هیبرید پیشنهادی مفاهیم اصلی این کنترل و روش کنترل پیشنهادی مبتنی بر آن در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کنترل دروپ، برای حداقل دو منبع موازی در زیر شبکه ac، به صورت گسترده‌ای در مراجع متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱-۳] و [۱۶].

که در آن  $n$  ضریب دروپ تسهیم توان راکتیو می‌باشد.

نهایتاً برای استخراج مقدار مرجع توان تبادل شده  $(P_I^*)$ ، مقدار  $I_{I,q}^*$  برای تبادل مثبت توان بایستی غیرصفر بوده و برای تبادل منفی توان بایستی برابر صفر شود تا مبدل در ضریب قدرت برابر یک عمل نماید. سپس مقادیر مرجع به‌دست‌آمده شامل  $(I_{I,d}^* + j I_{I,q}^*)$  و  $(I_I')^*$  به‌ترتیب با دو کنترل‌کننده  $PI_2$  و  $PI_3$  دنبال می‌گردند. نهایتاً با تبدیل مقادیر مرجع به دست آمده از فرم  $d-q$  به فرم سه‌فاز  $abc$  جریان‌های مرجع استخراج می‌گردد.

مبدل واسط FCM پیشنهادی برای ریزشبه هیبرید در حالت جزیره‌ای با اتصال یک مبدل dc-dc افزاینده استاندارد مطابق شکل ۳ بایستی همراه گردد. این ساختار پیشنهادی امکان انتخاب سطوح ولتاژ دلخواه را برای دو زیرشبه ac و dc به‌صورت قابل انعطاف فراهم می‌نماید. این در حالتی است که تبادل توان اکتیو هم‌چنان به‌صورت دوطرفه امکان‌پذیر می‌باشد. اگر یک لینک dc خازنی در بخش لینک dc مشترک مورد استفاده قرار گیرد یک کنترل‌کننده  $PI_4$  نیز بایستی به سیستم کنترلی اضافه گردد تا تلفات مرتبط با خازن را جبران نماید [۲۰]. در نتیجه با تولید یک جریان اکتیو کوچک  $(I_I'')$  می‌توان ولتاژ لینک dc را نیز ثابت نگه داشت. این مقدار مرجع به مقدار جریان dc فعال  $(I_I')^*$  اضافه شده و توسط مبدل dc-dc کنترل می‌گردد. نهایتاً مقادیر مرجع جریان dc و ac بهبودیافته به‌ترتیب به‌صورت  $I_{I,d}^* + j I_{I,q}^*$  و  $(I_I')^* + (I_I'')^*$  تولید می‌شود [۲۲-۲۳]. با در نظر گرفتن ملزومات کنترلی اشاره‌شده و معادلات استخراج‌شده طرح کلی سیستم کنترلی هیبرید پیشنهادی برای مبدل واسط FCM مطابق شکل ۷ پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۷: سیستم کنترلی پیشنهادی برای مبدل واسط

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد ریزشبه هیبرید ac/dc فشارمتوسط براساس مبدل واسط چندسطحی FCM پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌گردد. به‌منظور تأیید عملکرد و بررسی الگوریتم کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها در شرایط مختلف تولید و مصرف بخش ac و dc در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه انجام می‌گیرد. ساختار اصلی سیستم قدرت شبیه‌سازی‌شده مطابق شکل

در ادامه روش کنترلی مبدل واسط FCM در حالت جزیره‌ای ارائه می‌گردد. مهم‌ترین مسئله که در کنترل مبدل واسط با آن مواجه خواهیم بود متغیرهای دروپ متفاوت استفاده‌شده توسط دو زیرشبه ادغام‌شده می‌باشد. این متغیرها فرکانس زیرشبه ac و ولتاژ ترمینال زیرشبه dc می‌باشد. در نتیجه ابتدا بایستی این متغیرها در یک بازه مشخص (مثلاً از ۱- الی ۱) به‌صورت پریونیتی نرمالیزه گردند. بدین منظور روابط (۱۱) و (۱۲) به‌صورت ذیل پیشنهاد می‌گردد [۲۲]:

$$f_{pu} = \frac{f - 0.5(f_{\max} + f_{\min})}{0.5(f_{\max} - f_{\min})} \quad (11)$$

$$V_{dc,pu} = \frac{V_I - 0.5(V_{dc,max} + V_{dc,min})}{0.5(V_{dc,max} - V_{dc,min})} \quad (12)$$

که زیرنویس‌های ماکسیمم و مینیمم برای متغیرها، حداکثر و حداقل محدوده متغیرها را مشخص می‌نماید.

در مرحله بعد، تفاضل مقادیر نرمالیزه‌شده به‌دست آمده این دو متغیر  $(f_{pu} - V_{dc,pu})$  وارد یک کنترل‌کننده  $PI$  ( $PI_1$  در شکل ۷) می‌گردد. با در نظر گرفتن این واقعیت که دو متغیر نرمال‌سازی‌شده در حالت دائم با یکدیگر برابر می‌باشند، ورودی کنترل‌کننده  $PI_1$  نیز بایستی صفر گردد. این حالت دقیقاً مشابه وضعیتی است که شبکه ac اصلی به‌صورت طبیعی در حالت متصل به شبکه در زیرشبه ac انجام می‌دهد. با تبادل توان اکتیو به‌صورت متناسب بین دو زیرشبه، می‌توان بدون درنظر گرفتن محل تغییرات بار، تعادل توان در شبکه را انجام داد. همچنین هر یک از منابع dc یا ac موجود در زیرشبه‌ها توان اکتیو را به‌صورت متناسب با در نظر گرفتن کنترل دروپ مرتبط dc یا ac تقسیم می‌کنند. مقدار مورد نیاز  $P_I^*$  که توسط خروجی کنترل‌کننده  $PI_1$  تعیین می‌شود، برای تبادل توان dc به ac مثبت و برای تبادل توان ac به dc منفی خواهد بود. سپس مقدار مرجع  $P_I^*$  می‌تواند با استفاده از رابطه (۱۳) به یک اندازه جریان فعال  $I_{I,d}^*$  مورد استفاده در ریزشبه ac و یک جریان دیگر  $(I_I')^*$  مورد استفاده در ریزشبه dc، تبدیل می‌شود که از رابطه (۱۳) قابل استخراج می‌باشد.

$$I_{I,d}^* = \frac{2P_I^*}{3V_I} ; (I_I')^* = -\frac{P_I^*}{V_{dc}} \quad (13)$$

که در آن  $V_I$  و  $V_{dc}$  به‌ترتیب دامنه ولتاژ اندازه‌گیری‌شده در ترمینال‌های ac و dc مبدل واسط می‌باشد. یک مقدار جریان راکتیو  $I_{I,q}^*$  نیز با استفاده از مقدار  $Q_I^*$  مطابق رابطه (۱۴) قابل استخراج می‌باشد.

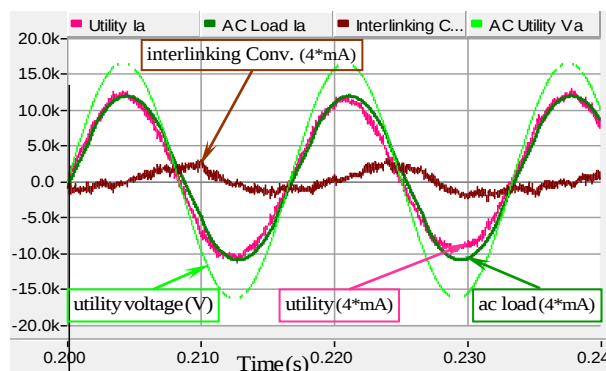
$$Q_I^* = \frac{V_I - V_{I,max}}{n} ; I_{I,q}^* = \frac{-2Q_I^*}{3V_I} \quad (14)$$

### شکل ۸: الف) توان اکتیو و ب) توان راکتیو تبادل شده در ریزشبه هیبرید dc/ac

با توجه به تغییرات تولید توان در DGها و بارهای سمت dc و ac سه حالت گذرا برای سیستم هیبرید dc/ac معرفی شده است. این حالات گذرا در زمان‌های  $t=0.5s$ ،  $t=0.8s$ ، و  $t=1s$  رخ می‌دهد. در نتیجه چهار مد عملکردی متفاوت قابل مطالعه خواهد بود. بر این اساس، تغییرات توان اکتیو و راکتیو تزریقی توسط شبکه اصلی (به همراه DGهای ac)، توان تزریقی مبدل واسط به شبکه ac و توان تولیدی DGهای dc در شکل ۸ نشان داده شده است. در ادامه این چهار مد عملکردی ناشی از گذراهای رخ داده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱-۴-۱ مد ۱: قبل از گذرای اول، $0.5s < t < 0.8s$

در این مد، زیرشبکه ac توان اکتیو  $95 \text{ kW}$  را تولید می‌کند که متشکل از توان تزریقی شبکه اصلی به اندازه  $40 \text{ kW}$  و توان تولیدی DGهای ac (سیستم بادی DFIG) به مقدار  $55 \text{ kW}$  می‌باشد. کل بار زیرشبکه ac نیز، برابر  $95 \text{ kW} + 15 \text{ kVar}$  است که شامل یک بار اهمی خالص خطی با توان اکتیو  $20 \text{ kW}$  و یک بار غیرخطی اهمی-سلفی با توان  $70 \text{ kW}$  و  $15 \text{ kVar}$  THD و تولیدی  $3.5\%$  درصد می‌باشد. تولیدات پراکنده زیرشبکه dc نیز توانی معادل  $55 \text{ kW}$  در وضعیت MPPT تولید می‌کنند که این توان به وسیله یک بار  $50 \text{ kW}$  و مبدل واسط مصرف می‌گردد. لذا در این مد، متوسط توان اکتیو تبادل شده توسط مبدل واسط تقریباً نزدیک صفر است. هرچند توان راکتیو مورد نیاز بارهای ac توسط مبدل واسط تأمین می‌شود. در نتیجه شبکه اصلی هیچ توان راکتیوی به زیرشبکه ac تزریق نمی‌نماید (شکل ۸ ب).



شکل ۹: ولتاژ و جریان تزریقی شبکه به ریزشبه، جریان بار زیرشبکه ac و جریان تولیدی مبدل واسط FCM در مد ۱ برای فاز a

با عنایت به عدم تبادل توان اکتیو بین دو زیرشبکه در این مد، نقش اصلی مبدل واسط FCM در کنار کنترل ولتاژ لینک dc، بهبود کیفیت توان زیرشبکه ac نیز خواهد بود. در این صورت مبدل واسط می‌تواند مانند یک DSTATCOM برای جبران توان راکتیو مطابق شکل ۸ ب عمل نماید. عملکرد مبدل واسط با توجه به شکل موج‌های جریان و ولتاژ زیر شبکه ac برای یک فاز در شکل ۹ نمایش داده شده است.

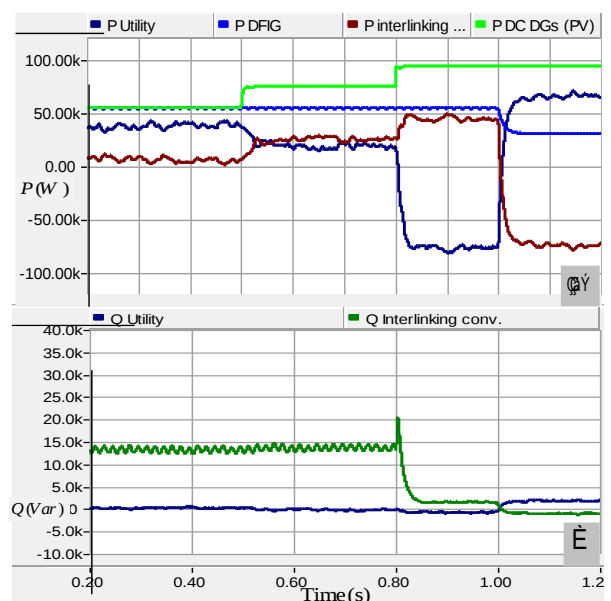
۳ بوده و مقادیر پارامترهای اصلی شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای اصلی سیستم شبیه‌سازی شده

| پارامتر                                         | مقدار                                              |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| AC subgrid frequency ( $f$ )                    | ۶۰ Hz                                              |
| Utility and AC subgrid voltage ( $V_{ab}$ )     | ۲۰ kV                                              |
| AC DFIG wind systm rated power ( $S_{ac, DG}$ ) | ۱۵۰ kVA                                            |
| DFIG rotor impedance                            | $0.005 + j0.15 \text{ p.u.}$                       |
| DFIG stator impedance                           | $0.0057 + j0.17 \text{ p.u.}$                      |
| resistive-inductive AC load ( $P_1 + jQ_1$ )    | $75 \text{ kW} + j15 \text{ kVar.}$                |
| Linear AC Load ( $P_2$ )                        | ۲۰ kW                                              |
| Transformer inductance                          | ۴ mH                                               |
| DC subgrid voltage ( $V_{dc}$ )                 | ۲۰ kV                                              |
| DC DG (PV SYSTEM) rated power ( $S_{dc, DG}$ )  | ۱۰۰ kVA                                            |
| DC Load ( $P_{dc}$ )                            | ۱۲۵ kW                                             |
| flying capacitors ( $C_i$ )                     | ۰.۴ mF                                             |
| Boost converter frequency ( $f_{switching}$ )   | ۳.۵ kHz                                            |
| Boost converter inductance                      | ۳۰ mH                                              |
| Transformer inductance                          | ۴ mH                                               |
| FCM Switching frequency ( $f_{switching}$ )     | ۱۰ kHz                                             |
| Output RLC filters                              | $20 \Omega$ ; $0.1 \text{ mH}$ ; $2.7 \mu\text{F}$ |
| dc link capacitor ( $C_s$ )                     | ۱ mF                                               |

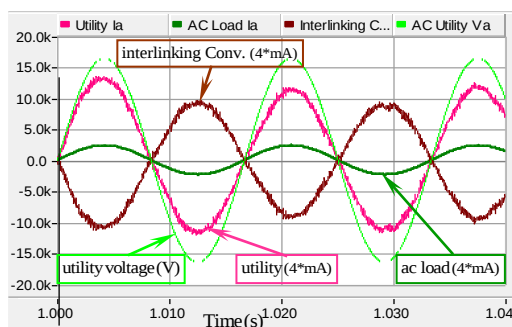
#### ۱-۴-۲ حالت متصل به شبکه

در این حالت تمامی مبدل‌های منابع تولید پراکنده dc و ac در وضعیت MPPT عمل نموده و مبدل واسط ریزشبه هیبرید نیز در حالت کنترلی P-Q کار می‌کند. فرکانس و ولتاژ سمت ac توسط شبکه اصلی کنترل می‌شود، باین حال، اولویت تأمین بار به DGهای ریزشبه هیبرید اختصاص یافته است. باتری‌های متصل به ریزشبه نیز به صورت شارژ کامل در نظر گرفته شده و در نتیجه در این مد عملکرد خاصی ندارد. ولتاژ لینک dc نیز توسط مبدل واسط تثبیت می‌گردد.



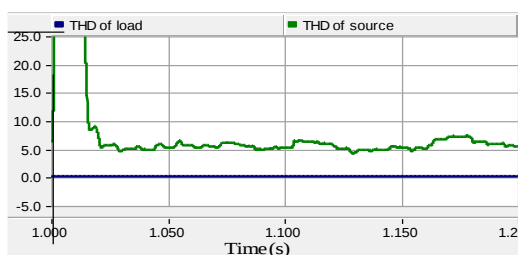
#### ۴-۱-۴-۴: مد ۴: بعد از گذرای سوم، $1s < t < 1.2s$

برای بررسی حالت یکسوکندگی مبدل واسط، در مد ۴، یک بار dc به اندازه ۱۲۵kW در مقایسه با مد ۳ به زیرشبکه dc متصل می‌گردد. لذا، مصرف توان از تولید آن در بخش dc بیش‌تر می‌شود. از طرف دیگر، میزان تولید سیستم بادی نیز از ۵۵kW به ۳۵kW کاهش می‌یابد. مبدل واسط با عملکرد یکسوکندگی، توان مورد نیاز را از زیرشبکه ac به زیرشبکه dc منتقل می‌کند (شکل ۸الف). شکل موج جریان و ولتاژ سمت ac نیز برای این مد در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

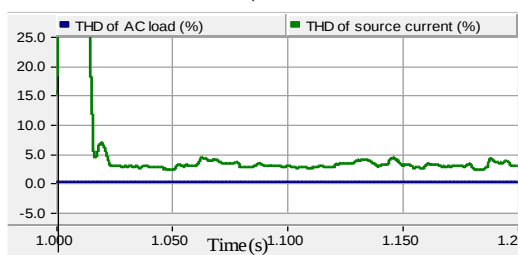


شکل ۱۲: ولتاژ و جریان تزریقی شبکه به ریزشبکه، جریان بار زیرشبکه ac و جریان تولیدی مبدل واسط FCM در مد ۴ برای فاز a

علاوه‌براین، به‌منظور بررسی عملکرد مناسب این مبدل در مقایسه با مبدل‌های مرسوم، مطابق شکل ۱۳، میزان هارمونیک جذب‌شده توسط مبدل پیشنهادی FCM و یک مبدل پل سه‌فاز مرسوم در حالت یکسوکندگی نشان داده شده است. لذا، با مقایسه دو منحنی می‌توان نتیجه گرفت که مبدل واسط پیشنهادی و کنترل آن، هارمونیک‌های جذب‌شده زیرشبکه dc را کاهش داده است. به‌طوری‌که THD جریان از نزدیک ۷ درصد به کم‌تر از ۳/۵ درصد کاهش یافته است.



(الف)

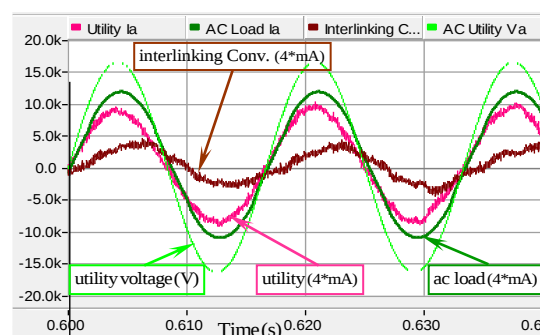


(ب)

شکل ۱۳: THD جریان تزریقی مبدل واسط: (الف) مرسوم پل سه‌فاز و (ب) پیشنهادی FCM به زیرشبکه ac

#### ۴-۱-۴-۲: مد ۲: بعد از گذرای اول، $0.8s < t < 0.9s$

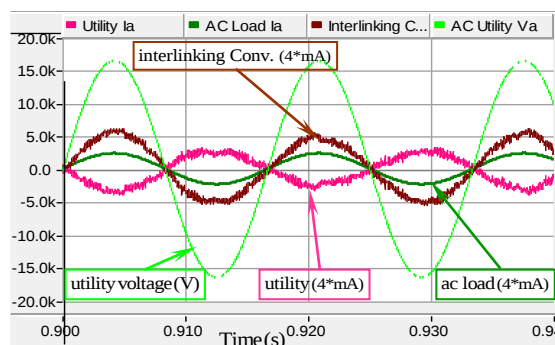
در این مد، توان تولیدی DGهای زیر شبکه dc (که شامل یک سیستم فتوولتائیک می‌باشد) مطابق کنترل MPPT، از ۵۵kW به ۷۵kW افزایش می‌یابد. با توجه به عدم تغییر سایر مشخصات شبکه بایستی ۲۰kW از زیرشبکه dc به زیرشبکه ac تزریق گردد. در نتیجه با توجه به ثابت بودن توان تولیدی سیستم بادی DFIG در مقدار ۵۵kW، توان تزریقی شبکه اصلی به ۲۰kW کاهش می‌یابد (شکل ۸الف). در این مد، متوسط توان راکتیو تبادل‌شده توسط مبدل واسط نیز مشابه مد قبلی می‌باشد. شکل موج‌های جریان و ولتاژ زیرشبکه ac برای یک فاز در این مد نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: ولتاژ و جریان تزریقی شبکه به ریزشبکه، جریان بار زیرشبکه ac و جریان تولیدی مبدل واسط FCM در مد ۲ برای فاز a

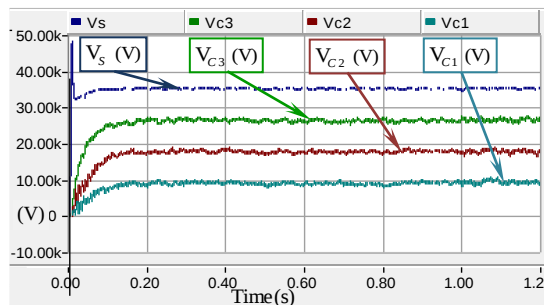
#### ۴-۱-۴-۳: مد ۳: بعد از گذرای دوم، $1s < t < 1.1s$

با توجه به کنترل MPPT برای منابع، توان تولیدی سیستم فتوولتائیک به ۹۵kW افزایش می‌یابد. همچنین بار اهمی-سلفی زیرشبکه ac نیز در این مد از مدار خارج می‌شود. در نتیجه تولید توان از مصرف توان در هر دو زیرشبکه ac و dc ریز شبکه هیبرید بیش‌تر شده و اضافه توان تولیدی معادل ۷۵kW به شبکه اصلی تزریق می‌شود (شکل ۸الف). این توان شامل ۴۰kW توان اضافی در زیرشبکه dc ناشی از تولید PV و ۲۵kW اضافی ناشی از سیستم بادی DFIG می‌باشد. اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ما بین شکل موج جریان و ولتاژ شبکه اصلی در شکل ۱۱، تزریق توان به شبکه اصلی را تأیید می‌کند.



شکل ۱۱: ولتاژ و جریان تزریقی شبکه به ریزشبکه، جریان بار زیرشبکه ac و جریان تولیدی مبدل واسط FCM در مد ۳ برای فاز a

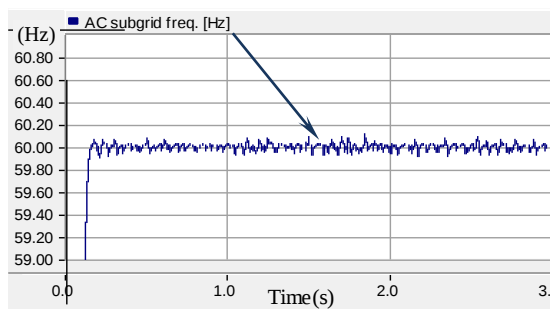
شکل ۱۶ نیز ولتاژ لینک dc و خازن‌های شناور مبدل FCM را نشان می‌دهد که عملکرد مناسب مبدل FCM را در خودتنظیمی طبیعی ولتاژ خازن‌ها تأیید می‌نماید.



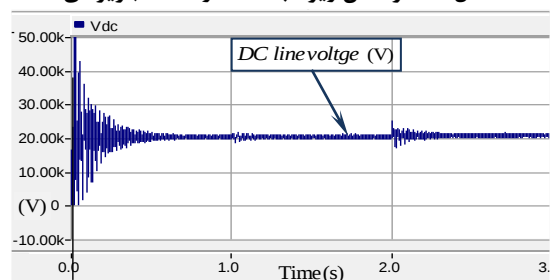
شکل ۱۶: ولتاژ خازن‌های شناور و لینک dc مبدل واسط FCM

#### ۴-۲- حالت جزیره‌ای

در حالت جزیره‌ای، کلیه منابع تولیدپراکنده ac و dc در مد کنترلی دروپ عمل می‌کنند. برای کنترل ریزشبه هیبرید نیز، مبدل واسط از کنترل دروپ ترکیبی ac/dc استفاده می‌نماید. در این بخش از شبیه‌سازی بار اهمی-سلفی پایه ac برابر ۴۰۰ kW و ۵۰ kVar و بار dc نیز برابر ۲۰۰ kW می‌باشد. سپس یک حالت گذرا در  $t=1s$  رخ داده و یک بار اهمی-سلفی ac به اندازه ۱۰۰ kW و ۲۰ kVar از ریزشبه جدا می‌شود. همچنین گذرای دیگری نیز در  $t=2s$  رخ داده و یک بار ۲۰۰ kW به زیرشبه dc اضافه می‌شود. با در نظر گرفتن عملکرد هماهنگ مبدل واسط با سایر منابع تولید پراکنده، نتایج شبیه‌سازی فرکانس زیرشبه ac و ولتاژ باس dc زیرشبه در به‌ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمایش داده‌شده است. پایداری و تثبیت ولتاژ و فرکانس نمایش داده‌شده در شکل‌های مذکور عملکرد کنترل پیشنهادی را در ریزشبه هیبرید ac/dc تأیید می‌کند.

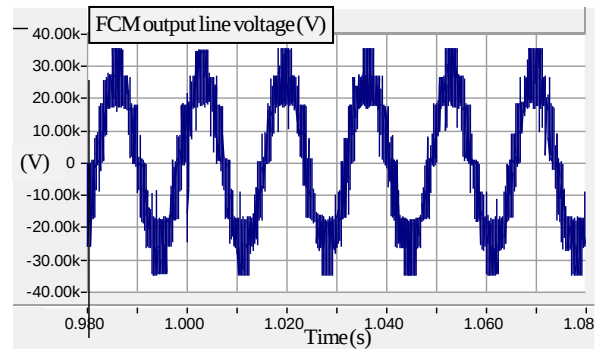


شکل ۱۷: فرکانس زیرشبه ac در حالت جزیره‌ای



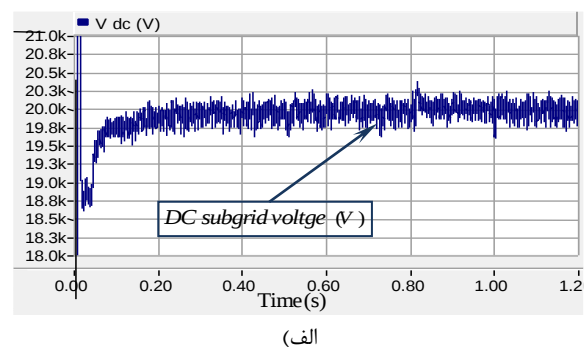
شکل ۱۸: ولتاژ باس dc در زیرشبه dc در حالت جزیره‌ای

ولتاژ تولیدی مبدل واسط چندسطحی FCM، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، ولتاژ خط ac خروجی مبدل واسط FCM سه‌فاز چهار سل پیشنهادی، ۹ سطحه بوده و در نتیجه امکان کاهش اندازه فیلتر خروجی و کاهش هارمونیک‌های تزریقی به زیرشبه ac را میسر می‌کند.

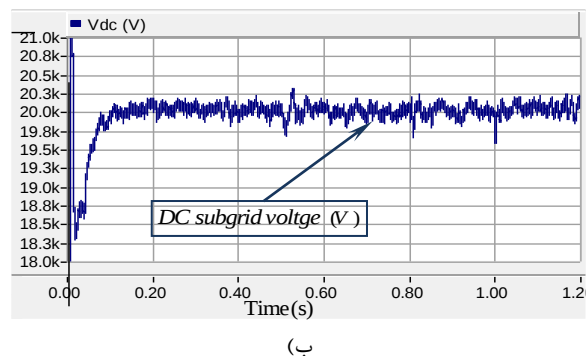


شکل ۱۴: ولتاژ خط خروجی مبدل واسط FCM سه‌فاز ۴ سل

برای مقایسه نوسانات ولتاژ زیرشبه dc در شرایط مختلف دائم و گذرا، شکل موج‌های ولتاژ لینک dc با استفاده از یک مبدل مرسوم پل سه‌فاز و مبدل پیشنهادی FCM به‌ترتیب در شکل‌های ۱۵-الف و ۱۵-ب نشان داده شده است. نتایج حاکی از تثبیت مناسب ولتاژ باس dc با توجه به ساختار پیشنهادی مبدل FCM و کنترل متناسب اعمالی، به‌ویژه با قابلیت خودتنظیمی مبدل در مقایسه با مبدل مرسوم پل سه‌فاز می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵: ولتاژ باس dc با مبدل (الف) مرسوم پل سه‌فاز و

(ب) پیشنهادی FCM به زیرشبه ac

## ۵- نتیجه

یک مبدل واسط مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مالتی‌سل خازن شناور برای ایجاد یک ریزشبکه هیبرید ac/dc در این مقاله پیشنهاد شده است تا عملکرد و قابلیت‌های مبدل واسط را به‌ویژه در کاربردهای توان بالا و ولتاژ متوسط ارتقاء بخشد. قابلیت خودتنظیمی ولتاژ خازن‌های شناور مبدل، کاهش ولتاژ کاری کلیدهای الکترونیک قدرت و انرژی ذخیره‌شده در خازن‌های شناور ازجمله مهم‌ترین ویژگی‌های ساختار مبدل پیشنهادی می‌باشد. کنترل و ساختار پیشنهادی برای مبدل واسط ریزشبکه هیبرید که براساس توجه به ملزومات کنترلی توان و کیفیت شکل‌موج‌ها در هر دو طرف مبدل واسط می‌باشد، امکان افزایش کیفیت شکل‌موج‌های خروجی مبدل واسط در بخش ac همراه با حفظ تغییرات دامنه ولتاژ باس dc در محدوده مورد نظر را فراهم نموده و از مزایای دیگر ساختار پیشنهادی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب مبدل FCM پیشنهادی را در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای به‌منظور تبادل توان مابین زیرشبکه‌های ac و dc به هنگام تغییرات شرایط بار و تولید منابع پراکنده در هر دو طرف مبدل واسط پیشنهادی، تأیید می‌کند.

## مراجع

- [8] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid," IEEE Trans. Smart Grid, to be published.
- [9] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, J. C. Vasquez, and L. Huang, "Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 683–692, 2014.
- [10] A. J. Roscoe, S. J. Finney, and G. M. Burt, "Tradeoffs between AC power quality and DC bus ripple for 3-phase 3-wire inverter-connected devices within microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 3, pp. 674–688, Mar. 2011.
- [11] M. Khederzadeh, M. Saedghi, "Virtual active power filter: A notable feature for hybrid AC/DC microgrids," IET Gen., Trans. and Dis., (GTD), vol. 10, no. 10, 2016, to be published.
- [12] R. Majumder, "A hybrid microgrid with DC connection at Back to Back converters," IEEE Trans. Smart Grid, to be published.
- [13] A. Kahrobaei and Y.A.-R. I. Mohamed, "Stability analysis and control of medium-voltage micro-grids with dynamic loads," in Proc. IEEE PES conference, 2013, pp. 1–5.
- [14] H. Li, W. Li, M. Luo, A. Monti, and F. Ponci, "Design of smart MVDC power grid protection," IEEE Trans. Instrum. Measur., vol. 60, no. 9, pp. 3035–3046, Sep. 2011.
- [15] M. Sadeghi, A. Nazarloo, S. H. Hosseini, E. Babaei, "A new DSTATCOM topology base on Stacked Multicell converter," 2nd PEDSTC conference, Tehran, 2011 pp.205-211.
- [16] M. Hamzeh, A. Ghazanfari, H. Mokhtari, and H. Karimi, "Integrating hybrid power source into an islanded MV microgrid using CHB multilevel inverter under unbalanced and nonlinear load conditions," IEEE Trans. Energ. Convers., vol. 28, no. 3, pp. 643–651, Sep. 2013.
- [17] M. Sadeghi, S.H. Hosseini, R. Alizadeh, M. H. Banaei, "A new mixed Stacked Multicell converter with interesting advantages," IET power elect. Syst., (PEL), vol. 5, no. 8, pp. 1298–1304, 2012.
- [18] M. Agha Shafiyi, M. Khederzadeh, M. Sadeghi, "A Grid-connected PV Power Supply based on Flying Capacitor multicell converter with modified MPPT based Control for Active Power Filtering," in Proc. 2nd International ICREDG conference, Tehran, Iran, , pp. 504-509, 2012.
- [19] محسن رحیمی و محمدرضا اسماعیلی، «طراحی کنترل‌کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی DFIG-710kW نصب شده در سایت بینالود»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۶۴، شماره ۶، زمستان ۹۵.
- [20] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 2, pp. 486–494, Apr. 2006.
- [21] P. C. Loh, D. Li, Y. Chai, and F. Blaabjerg, "Autonomous operation of hybrid microgrid with ac and dc subgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 5, pp. 2214–2223, 2013.
- [22] P. C. Loh, D. Li, Y. Chai, and F. Blaabjerg, "Autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid AC-DC microgrid," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, no. 3, pp. 584–592, May/Jun. 2013.
- [23] سیدعباس صارمی حساری، محسن حمزه، و احمد سالم‌نیا، «بهبود عملکرد دینامیکی و استاتیکی سیستم تقسیم توان در ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [1] D.E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, C.A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A.H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G.A. Jimenez-Estevéz and N.D. Hatziaargyriou, "Trends in microgrid control," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014.
- [2] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz and B. Alagoz, "An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids," Renewable Energy Elsevier, vol. 52, no. 1, pp. 251–259, Apr. 2013.
- [3] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.
- [4] X. Liu, P. Wang, and P. C. Loh, "A hybrid AC/DC microgrid and Its coordination control," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 2, pp. 278–286, 2011.
- [5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.
- [6] H. H. Huang, C. Y. Hsieh, J. Y. Liao, and K. H. Chen, "Adaptive droop resistance technique for adaptive voltage positioning in boost dc-dc converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 7, pp. 1920–1932, 2011.
- [7] P. T. Baboli, M. Shahparasti, M. ParsaMoghaddam, M. R. Haghifam and M. Mohamadian, "Energy management and operation modeling of hybrid AC–DC microgrid," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 8, no. 10, pp. 1700–1711, Mar. 2014.