کنترل سلسله مراتبی برای مدیریت توان و حذف جریان چرخشی در ریزشبکه ترکیبی AC/DC شامل مبدل‌های موازی در حالت جزیره‌ای

عبدالله آبادیان1، سید­مسعود برکاتی2

1دانشگاه سیستان و بلوچستان، Abdullah.abadian@gmail.com

2 دانشگاه سیستان و بلوچستان، smbaraka@ece.usb.ac.ir

*چکيده - با گسترش ریزشبکه‌ها‌ و محدودیت‌های نیمه­رساناها در انتقال توان، استفاده از مبدل‌های موازی برای اتصال دو ریزشبکه AC وDC اجتناب­ناپذیر است. مبدل‌های موازی،* *علاوه بر افزایش ظرفیت توان، قابلیت اطمینان سیستم را نیز افزایش می‌دهند. با این وجود، استفاده از مبدل‌های موازی باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود. این جریان گردشی باعث اتلاف توان، کاهش کیفیت توان و آسیب به سیستم کلیدزنی مبدل می‌شود. از این­رو، مسئله جریان گردشی در اتصال مبدل‌های موازی مسئله حائز اهمیتی می‌باشد. در این مقاله، یک کنترل سلسله­مراتبی بهبود­یافته در کنار مدیریت ریزشبکه ترکیبی به منظور کاهش جریان گردشی ارائه می­شود. کنترل سلسله مراتبی شامل کنترل اُفتی برای مدیریت توان در سطح اولیه کنترل و کنترل امپدانس مجازی برای حذف جریان گردشی در سطح ثانویه آن است. نتایج شبیه­سازی سیستم مورد نظر در محیط متلب-سیمولینک، ضمن تایید تحلیل­های نظری، کارایی ساختار کنترل پیشنهادی را نشان می­دهد.*

كليد واژه- ریزشبکه ترکیبی AC/DC، کنترل سلسله مراتبی، سیستم ذخیره­ساز، جریان گردشی، انرژی ­های تجدید­پذیر.

# مقدمه

ریزشبکه‌ها‌ از لحاظ ساختار به سه دسته ریزشبکه AC، ریزشبکه DC و ریزشبکه ترکیبی AC/DCتقسیم می‌شوند [1]. ریزشبکه‌ها‌ی AC به‌دلیل توانایی اصلاح سطح ولتاژ به کمک ترانسفورماتورهای فرکانس ­پایین و همچنین قابلیت مدیریت خطا نسبت به ریزشبکه‌ها‌ی DC بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند[2]. با این وجود، گسترش بارهای DC از قبیل روشنایی LED، خودروهای الکتریکی، برخی مصارف خانگی (مانند تلویزیون، رایانه) و مراکز داده[[1]](#footnote-1) باعث شده است که در سال‌های اخیر نگاه ویژه‌ای به ریزشبکه DC شود [3،4،5]. برای داشتن مزیت­­های دو ریزشبکه و برطرف کردن ضعف‌های آن‌ها، ریزشبکه‌های ترکیبی معرفی می‌شوند. در ریزشبکه ترکیبی برای کاهش تلفات تبدیل توان و هزینه مبدل‌ها سعی می‌شود که بارها و منابع AC در سمت AC قرار گرفته و بار‌ها و منابع DC به باس DC متصل شوند [6]. یک ریزشبکه ترکیبی همانند شکل 1 از ریزشبکه‌ AC، ریزشبکه DC و مبدل‌های متصل­کننده تشکیل می­شود. سمت AC ریزشبکه ترکیبی شامل ‌منابع توليد‌ پراکنده‌ است.

دو ریزشبکه به وسیله مبدل‌های موازی به همدیگر متصل شده‌اند، که کنترل هماهنگ و تعامل توان بین این دو ریزشبکه از طریق مبدل‌ها صورت می‌گیرد. هدف از تعامل توان هماهنگ، به اشتراک گذاری تقاضای توان و نوسانات توان خروجی منابع توليد ‌پراکنده‌ بین دو ریزشبکه AC و DC می‌باشد[7]. 

شکل 1: شماتیک کلی ریزشبکه ترکیبی AC-DC.

یکی از مشکلاتی که در استفاده از مبدل‌های موازی وجود دارد، به وجود آمدن جریان‌های گردشی است[8]. با پیاده سازی مبدل‌های موازی به دلیل عدم تطبیق کامل امپدانس‌ مبدل‌ها باعث ایجاد و جاری شدن جریان گردشی بین مبدل‌ها می‌گردد، که جریان گردشی تلفات توان را افزایش داده و عدم کنترل به موقع آن باعث خرابی عملیات کلید زنی و آسیب وارد شدن به کلید‌ها و در نتیجه ناپایداری ریزشبکه می‌شود[9]. بنابراین کنترل جریان گردشی برای بالا بردن کیفیت و تعامل درست توان بین دو ریزشبکه AC و DC و همچنین حفظ پایداری ضروری می‌باشد. برای حذف جریان گردشی پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. در مرجع [10]، ابتدا سازوکار تولید جریان گردشی مورد بررسی قرار گرفته است با اینکه در یک ریزشبکه، پسخور جریان نامتعادل بر روی محور صفر جریان تولید می‌شود، که می‌توان بدون نیاز به اطلاعات مبدل‌های دیگر با استفاده از روش امپدانس مجازی حذف گردد، اما در این روش فقط مولفه صفر جریان گردشی حذف می‌گردد. واسکیوز در [11] فرآیند تولید جریان چرخشی بر اثر مبدل‌های موازی و کلید زنی آسنکرون که در اثر عبور جریان چرخشی ایجاد می شود را نشان داده است.

موضوع حیاتی دیگری که برای مبدل‌های موازی مطرح است مدیریت توان بین دو ریزشبکه می‌باشد[12]. مدیریت توان شامل کنترل انتقال توان حقیقی و راکتیو، کنترل ولتاژ باس‌های AC و DC و همچنین کنترل توان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد[13]. برای مدیرت توان ریزشبکه های ترکیبی، ساختارهای کنترلی ،متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته است که در سه دسته: غیر متمرکز، توزیع شده و متمرکز طبقه بندی می‌شوند [14]. معماری کنترل متمرکز و توزیع شده مبتنی بر ارتباطات است. ارتباط میان اجزای ریزشبکه در دستیابی به اطلاعات گسترده سیستم کمک می‌کند تا با پردازش آن‌ها توابعی مانند مدیریت انرژی و بهینه سازی امکان پذیر باشند[15]. اما ساختار کنترل غیرمتمرکز ، برای اهداف کنترلی از داده‌های محلی استفاده می‌کند، و نیازی به اطلاعات کل ریزشبکه ندارد[16]. در پژوهش [10] راه‌کار کنترلی غیرمتمرکز برای تعامل توان در مد جزیره‌ای، بر اساس فرکانس AC و ولتاژ باس DC طراحی شده است.

ساختار کنترلی غیرمتمرکز به تنهایی برای مدیریت کلی یک ریزشبکه ترکیبی گسترده به‌دلیل نوساناتی که در ذات کنترل اُفتی وجود دارد و تغییراتی که ممکن است در پارامترهای آن رخ دهد دقیق نیست [17]. همچنین ساختار‌های کنترلی متمرکز و توزیع شده به دلیل نیاز به بستر مخابراتی قابلیت اطمینان پایینی دارند [8و 10].

در این مقاله برای انجام همزمان مدیرت توان ریزشبکه و حذف جریان چرخشی یک کنترل سلسله مراتبی بهبود یافته‌ ارائه شده است. ساختار کنترل سلسله مراتبی در سه سطح کنترلی زیر انجام می‌گیرد:

1. کنترل حلقه داخلی(کنترل غیرمتمرکز): در این سطح از کنترل، ولتاژ و جریان مبدل تنظیم و کنترل می‌شود.
2. کنترل اولیه(کنترل غیرمتمرکز): در این سطح، با اندازه گیری توان حقیقی و راکتیو، پخش توان از طریق کنترل اُفتی تعیین می‌شود.
3. کنترل ثانویه(کنترل متمرکز): در این سطح از کنترل، از روش امپدانس مجازی برای بهبود کیفیت توان و کاهش جریان گردشی استفاده می‌شود.

# ساختار ریزشبکه

شکل ساده شده ریزشبکه ترکیبی، در شکل 2 (الف) نشان شده است. در شکل 2 (ب) ولتاژ خازن که در راستای محور d قاب مرجع سنکرون *dq* جهت دهی شده، نمایش داده شده است.



شکل 2: (الف) نمونه ساده ریزشبکه ترکیبی AC/DC (ب) تبدیل3 فاز مرسوم به قاب مرجع چرخان dq.

مقادیر پارامترهای مورد استفاده در بخش‌های مختلف ریزشبکه مورد پژوهش، در جدول1 مشخص شده‌اند.

برای تحلیل ریزشبکه و طراحی کنترل­کننده، پارامترهای مورد نظر با استفاده از تبدیل *abc*/*dq* به قاب مرجع سنکرون انتقال داده می‌شوند.

با انجام تبدلabc به dq، معادلات طرف AC در قاب مرجع سنکرون، به صورت معادله‌های (1) تا (4) محاسبه خواهد شد:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
| (2) |  |
| (3) |  |
| (4) |  |

در معادله به دست آمده، اندازه ولتاژ خازن( ) و ω زاویه فرکانسی ولتاژ خازن می‌باشد. در ادامه با استفاده از مدل سازی صورت گرفته، حلقه‌ها‌ی کنترلی پیاده سازی می‌شوند. در ضمن، مقدار زاویه *θ* با استفاده از فنآوری سنکرون سازی PLL[[2]](#footnote-2) محاسبه می‌شود. اطلاعاتی که از PLL بدست می‌آید، برای سنکرون سازی، روشن و خاموش شدن تجهیزات توان، پخش توان حقیقی و راکتیو استفاده می‌شود.

جدول1: مشخصات کلی ریزشبکه ترکیبی.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| شبکه | پارامتر | نماد | مقدار |
| ریزشبکه AC | **ولتاژ AC** |  | **380V و 50HZ** |
| **منبع AC** |  | **210kVA+45kVAr** |
| **بار AC** |  | **400kVA+80kVAr** |
| ریزشبکه DC | **ولتاژ باس DC** |  | **600V** |
| **توان PV** |  | **450kW** |
| **خازن لینک DC** |  | **5mF** |
| **بار DC** |  | **200kW** |
| مبدل DC-DC | **فرکانس کلید زنی** |  | **5kHZ** |
| مبدل‌های متصل کننده | **مقاومت پارازیت** |  | **1mΩ** |
| **خازن فیلتر**  |  | **54 uF** |
| **سلف فیلتر پسیو مبدل1** |  | **1.5mH** |
| **سلف فیلتر پسیو مبدل2** |  | **1.65 mH** |
| **سلف فیلتر پسیو مبدل3** |  | **1.68 mH**  |

# کنترل سلسله مراتبی

در این مقاله برای انجام همزمان مدیریت توان و حذف جریان گردشی، یک روش کنترل سلسله مراتبی بهبود یافته ارائه شده است، تا مدیریت توان و عمل کاهش جریان گردشی را به صورت هم‌زمان و دقیق انجام بدهد. در بخش اول کنترل حلقه داخلی ریزشبکه طراحی می‌شود و در بخش های بعدی به ترتیب کنترل اولیه و ثانویه طراحی می‌شوند.

## کنترل حلقه داخلی

کنترل حلقه داخلی به منظور کنترل جریان و ولتاژ مبدل متصل کننده AC/DC طراحی می‌شود. این حلقه کنترلی از مرحله تشکیل شده است، ابتدا حلقه کنترل ولتاژ طراحی می‌شود، سپس روابط حلقه کنترل جریان برای ریزشبکه ترکیبی بیان خواهد شد.

برای کنترل مستقل توان حقیقی و راکتیو باید از ساختار کنترل مجزا شده[[3]](#footnote-3) استفاده کرد. برای این منظور، سیستم به قاب مرجع سنکرون (*dq*) منتقل می‌شود. با توجه به قرارگیری سیستم ذخیره‌ساز در سمت DC، ولتاژ DC ثابت و پایدار فرض می‌شود.

از آنجایی که مولفه‌ها‌ی حلقه ولتاژ در قاب مرجع سنکرون قرار گرفته‌اند، به مقادیر DC تبدیل شده‌اند، در نتیجه می‌توان از کنترل کننده‌های PI، برای کنترل خطای ولتاژ استفاده کرد. پارامترهای کنترلی برای کنترل ولتاژ خروجی سمت AC مبدل تنظیم می‌شوند، تا جریان مرجع *id,.ref* را برای حلقه‌ کنترل جریان تولید کنند.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

حلقهکنترلیجریان برای کنترل جریان مبدل تشکیل شده است. پهنای باند حلقه ولتاژ با توجه به طراحی حلقه داخلی و خارجی که به صورت آبشاری[[4]](#footnote-4) به هم متصل شده‌اند، باید دارای سرعت کندتری نسبت به حلقه داخلی داشته باشد. برای این منظور در طراحی حلقه کنترل ولتاژ، تابع تبدیل مربوط به بلوک کنترل‌کننده جریان را برابر با "1" در نظر می‌گیرند.

با تبدیل لاپلاس معادله‌ها‌ی خطی (3) و (4) می‌توان تابع تبدیل مدل خازن را بدست آورد:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

با دقت در معادلات (1) و (2) مشخص می‌شود، که جریان­های محور d و q به واسطه حضور عبارت در دو معادله بالا با هم مرتبط هستند. با تعریف دو متغیر و ، ولتاژهای مرجع مبدل، به صورت معادلات (7) و (8) محاسبه می‌شوند..

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |
| (8) |  |

 و سیگنال­های کنترلی هستند، با جایگذاری و در معادلات (1) و (2) نتایج زیر حاصل می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |
| (10) |  |

دو معادله (9) و (10) توصیف دو سیستم خطی درجه اول است، که می­توان و را به ترتیب با دو سیگنال کنترلی و کنترل کرد. در شکل 3 دیاگرام کنترلی حلقه داخلی نشان داده شده است.



شکل 3: بلوک دیاگرام کنترل حلقه داخلی.

## کنترل اولیه

در مد جزیره‌ای، تقاضای بار باید بین منابع توليد ‌پراکنده‌‌ و سیستم ذخیره‌ساز تقسیم ‌شود. علاوه بر، تقسیم توان بین دو ریزشبکه، مبدل‌ها باید ولتاژ ریزشبکه AC را در حد مطلوب حفظ کنند. روش کنترل اُفتی می‌تواند برای کنترل ولتاژ AC و پخش توان بین مبدل‌ها استفاده شود. در معادله‌ها‌‌ی (11) و (12)، معادله‌ها‌‌ی اُفتی مورد استفاده برای تعادل توان نشان داده شده است:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |
| (12) |  |

در معادله (11)، نشان دهنده شماره مبدل است و ، ، ، ، به ترتیب نشان دهنده فرکانس مرجع، فرکانس نامی، ضریب اُفتی فرکانس، توان حقیقی خروجی و توان حقیقی خروجی نامی‌ می‌باشد. در معادله (12)، نشان دهنده ‌اندازه ولتاژ مرجع و نشان دهنده ‌اندازه ولتاژ نامی‌ ریزشبکه AC می‌‌باشد. برای بیان توان حقیقی خروجی و توان حقیقی خروجی نامی ‌هر مبدل از و استفاده شده است، نیز ضریب اُفتی اندازه ولتاژ AC می‌باشد.

برای پیاده سازی تعامل توان هماهنگ و اینکه ریزشبکه AC بتواند نوسانات خود را با ریزشبکه DC به اشتراک بگذارد، راه‌کار کنترلی تعاملی به صورت معادله زیر بیان می‌شود[8]:

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

در معادله (13) خروجی کنترل تعاملی است، که برای تشکیل فرکانس مرجع به کنترل اُفتی معادله (11) اضافه می‌شود. و بیانگر ولتاژ نامی‌DC و ولتاژ خروجی DC مبدل می‌باشد، و همچنین ضریب تعاملی می‌باشد، که مشخص می‌کند در صورت تعامل دو ریزشبکه، کدام یک از مبدل‌ها، به چه میزانی در تعامل توان شرکت کنند. راه‌کار تعامل و تقسیم توان پیشنهاد شده به عنوان کنترل اولیه پیاده سازی می‌شود، که ساختار آن در شکل4، نشان داده شده است.



شکل 4: بلوک دیاگرام کنترلی ریزشبکه ترکیبیAC/DC تک مبدله.

## کنترل ثانویه

در این مقاله از کنترل ثانویه برای حذف جریان گردشی و بهبود کیفیت توان استفاده می‌شود. در ادامه این بخش، ابتدا به سازوکار تولید جریان گردشی پرداخته می‌شود و سپس روش امپدانس مجازی برای کاهش آن، مدل سازی و اجرا خواهد شد.

# سازوکار تولید جریان‌گردشی و اندازه گیری آن

در اتصال موازی مبدل‌ها دو عامل باعث به وجود آمدن جریان گردشی می‌شود:

* اختلاف در کلیدزنی مبدل‌های موازی،
* عدم تطبیق امپدانس‌ مبدل‌های موازی.

زمانی که مبدل‌ها به صورت موازی کار می‌کنند کلیدزنی متفاوت بین مبدل‌ها یکی از دلایلی است که باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود. علاوه بر کلیدزنی از آنجایی که امپدانس مقابل جریان گردشی، در مبدل‌های موازی خیلی کوچک است، و مبدل‌های استفاده شده از لحاظ مشخصه‌ها‌ی امپدانسی، نمی‌توانند کاملا بر هم منطبق باشند، اختلاف ولتاژ کم در مبدل‌های موازی می‌تواند، جریان گردشی بزرگی ایجاد کند. همانطور که در شکل 8، نشان داده شده است، اختلاف ولتاژ ناشی از عدم تطبیق امپدانس باعث ایجاد جریان گردشی و می‌شود. و باعث افزایش جریان مبدل 1 و کاهش جریان و مبدل دوم و سوم می‌شود. با تزریق جریان‌های گردشی جریان خروجی به شبکه تزریق می‌شود.

در شکل 5 جریان کل خروجی مبدل‌های دو طرفه است. که نشان دهنده فاز و نشان دهنده مبدل مورد نظر می‌باشد. در پارامتر که ، فاز جریان گردشی بین مبدل‌های ام و ام را نشان می‌دهد.



شکل 5: نمودار تک خطی ریزشبکه ترکیبی[18]

مطابق معادله (14)، با کم کردن مقدار جریان هر مبدل از مقدار یک سوم جریان خروجی، مقدار جریان نامتوازن به دست می‌آید. جریان نامتوازن در واقع از دو مولفه جریان گردشی و اختلاف تقسیم جریان تشکیل شده است. بنابراین در سیستم کنترل مبدل‌های موازی، می‌توان حذف جریان متوازن را به عنوان هدف کنترلی تعیین کرد[12].

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

در رابطه (14)، نشان دهنده اختلاف تقسیم جریان فاز برای مبدل ام می‌باشد و قسمت چپ معادله (14)، مجموع اختلاف تقسیم جریان و جریان گردشی می‌باشد[12].

# بررسی جریان گردشی در ریزشبکه ترکیبی با اتصال مبدل‌های موازی

باس‌های AC و DC توسط مبدل‌های متصل کننده موازی به همدیگر متصل می‌شوند. سمت DC ریزشبکه شامل یک بار DC می‌باشد و یک سیستم ذخیره‌ساز نیز به سمت DC متصل می‌شود، تا عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای پایدار بماند. یک سیستم خورشیدی نیز به عنوان منبع تولید پراکنده DC به باس DC متصل می‌شود.

ولتاژ لینک DC برابر 600 ولت در نظر گرفته شده است، که باید منابع و بارهای متصل به باس DC نیز با استفاده از مبدل DC به DC روی این مقدار تنظیم شوند. ولتاژ سمت AC برابر 380 ولت خط به خط تنظیم شده است. همانطور که در جدول 1 ذکر شده است، توان تولیدی نیروگاه خورشیدی برابر 450 کیلو وات بوده که تابش و دمای آن در سیکل 0.5 ثانیه‌ای، ثابت در نظر گرفته شده است. شبیه سازی‌ها به صورت گسسته و با زمان نمونه برداری 1e-5 صورت می‌گیرد.

 برای تقسیم توان بین مبدل‌ها، از شیوه متداول کنترل افتی استفاده شد. بنابراین تقسیم توان حقیقی به فرکانس ریزشبکه بستگی دارد، و بخاطر سراسری بودن فرکانس در ریزشبکه و عدم تغییرات آن در صورت اتصال موازی مبدل‌ها، تقسیم توان حقیقی به درستی انجام گرفته است. هر یک از مبدل‌ها توانی برابر با 65.5 کیلو وات از خود عبور می‌دهند. در شکل 6، تقسیم توان حقیقی مبدل‌های متصل کننده نشان داده شده است.



شکل 6: تقسیم توان حقیقی مبدل‌های موازی.

توان راکتیو در صورت اندوکتیو بودن خط تغذیه رابطه مستقیمی با اندازه ولتاژ دارد، از آنجایی که مبدل‌های موازی نمی‌توانند از لحاظ مشخصات الکتریکی، کاملا بر هم منطبق باشند، بنابراین افت ولتاژ پایانه هر مبدل، نسبت به مبدل دیگر متفاوت خواهد بود، در نتیجه بخاطر ناچیز بودن مقاومت بین مبدل‌ها، کم ترین اختلاف ولتاژ باعث عبور جریان گردشی بین آن‌ها می‌شود. در صورت عبور جریان گردشی و عدم تعادل جریان، همانطور که در شکل 7، نشان داده شد، توان راکتیو از هر مبدل متفاوت خواهد بود و تقسیم توان راکتیو به درستی انجام نمی‌شود.



شکل 7: تقسیم توان راکتیو در مبدل‌های موازی.

جریان گردشی بین مبدل‌ها، باعث عدم تعادل جریان مبدل‌ها می‌شود. همانطور که در شکل 8، نشان داده شده است.



شکل 8: تقسیم جریان بین مبدل‌های متصل کننده و جریان گردشی.

جریان گردشی عبوری در شکل 8، نشان داده شده است که برابر با 11.05 آمپر می‌باشد. جریان گردشی از مقدار مجاز بزرگتر بوده، و باعث اضافه جریان در مبدل‌ها می‌شود، بنابراین باید با استفاده از روش‌های پیشنهادی کاهش داده شود.

همانطور که در شکل 9، نشان داده شده است، سیستم ذخیره‌ساز مقدار 9.7 کیلو وات برای تامین تقاضای بار در حالت پایدار به ریزشبکه DC تزریق می‌کند.

شکل 9: توان خروجی سیستم ذخیره‌ساز.

روش امپدانس مجازی اصلاح شده که بلوک دیاگرام آن در شکل 5، نشان داده شد، به صورت کنترل ثانویه به سیستم کنترلی اضافه می‌شود. از آنجایی که امپدانس خط اندوکتانسی می‌باشد، با توجه به توضیحات ذکر شده در طراحی امپدانس مجازی، مقدار مطلوب سلف مجازی که در جدول 2 ذکر شده است به عنوان امپدانس مجازی به سیستم کنترلی اضافه می‌شود.

در شکل 10 تقسیم توان حقیقی را نشان می‌دهد، همانطور که در یخش قبلی گفته شد عدم تطبیق ولتاژ باعث افزایش تلفات توان می‌شود. از هر مبدل، مقدار توان 63.8 کیلو وات، عبور می‌کند، بنابراین توان دریافتی با میزان تقاضای بار، نزدیک شده است.



شکل 10: تقسیم توان حقیقی بین مبدل‌های موازی.

در شکل 11، مشاهده می‌شود، که با استفاده از روش امپدانس مجازی اصلاح شده، خطای تقسیم توان راکتیو به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. توان حقیقی عبوری از هر مبدل به برابر با 12.07 کیلو وار می‌باشد.



شکل 11: تقسیم توان راکتیو بین مبدل‌های متصل کننده.

جریان گردشی بین فاز A مبدل 1 و 2 در شکل 12، نشان داده شده است که نسبت به حالت عدم اعمال کنترل ثانویه، به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است و برابر 2.08 آمپر می‌باشد.



شکل 12: تقسیم جریان بین مبدل‌های متصل کننده، جریان گردشی.

همانطور که در شکل 13 نشان داده شده است، با توجه به کاهش تلفاتی که نسبت به حالت قبل وجود داشت، توان خروجی باتری از مقدار 9.7 کیلو وات به مقدار 1.24 کیلو وات کاهش پیدا کرده است.



شکل 13: توان خروجی سیستم ذخیره‌ساز.

# نتیجه گیری

استفاده از مبدل­های موازی مزایایی چون افزایش ظرفیت توان و قابلیت دارد، با این وجود مشکل جریان گردشی باعث عدم استفاده فراگیر از این مبدل­های در صنعت شده است. در مقاله حاضر، یک روش کنترل سلسله مراتبی بهبود یافته ارائه شده، تا مدیریت توان و عمل کاهش جریان گردشی را به صورت هم‌زمان و دقیق انجام بدهد. در بخش اول کنترل حلقه داخلی ریزشبکه طراحی شد و در بخش­های بعدی به ترتیب کنترل اولیه و ثانویه طراحی می‌شود. با شبیه سازی­های انجام شده بر روی یک سیستم سه مبدله، اختلاف پارامترهای مذکور با مقادیر مرجع به صفر نزدیک شد و همانطور که انتظار می‌رفت باعث تعادل توان راکتیو و کاهش جریان گردشی شد.

مراجع

1. Yazdani, A., & Iravani, R." Voltage-sourced converters in power systems".*Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons*.‏ Vol. 34. (2010).
2. . Obara, S. Y., "Optimum Design of Renewable Energy Systems: Microgrid and Nature Grid Methods", *IGI Global*, ‏ 2014.
3. . Lidula, N., Rajapakse, A.," Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 15, No. 1, pp. 186–202, 2011.
4. Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., "Trends in Microgrid Control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, pp. 1905-1919, 2014.
5. M. A. A.-S. Suleiman M. Sharkh, Georgios I. Orfanoudakis, Babar Hussain," Power Electronic Converters for Microgrids", *Wiley-IEEE Press*, 2014.
6. Unamuno, E., Barrena, J. A., "Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1251-1259, 2015
7. Ziouani, I., Boukhetala, D., Darcherif, A. M., Amghar, B., & El Abbassi, I." Hierarchical control for flexible microgrid based on three-phase voltage source inverters operated in parallel." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *95*, 188-201.‏ 2018.
8. Yang, P., Xia, Y., Yu, M., Wei, W., Peng, Y., "A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid ac–dc microgrid", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. *65*, No. 8, pp. 6217-6228, 2017.
9. He, J., Li, Y.W., "Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, pp. 2525-2538, 2011.
10. Xia, Y., Peng, Y., Yang, P., Yu, M., Wei, W., "Distributed coordination control for multiple bidirectional power converters in a hybrid ac–dc microgrid", *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 32, No. 6, pp. 4949–4959, 2017.
11. Vazquez, S., Sanchez, J. A., Carrasco, J. M., Leon, J. I., & Galvan, E. (2008). A model-based direct power control for three-phase power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *55*(4), 1647-1657.‏
12. Xiao, H., Luo, A., Shuai, Z., Jin, G., & Huang, Y. (2015). An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(1), 340-347.‏
13. C.Jin, P. C. Lohl, P. Wangl, Y. Mil, and F. Blaabjerg, "Autonomous Operation of Hybrid AC-DC Microgrids " presented at the *IEEEInternational Conference on Sustainable Energy Technologies* (ICSET),2010, Kandy, Sri Lanka , 2010
14. Unamuno, E., & Barrena, J. A. Hybrid ac/dc microgrids—Part II:" Review and classification of control strategies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 1123-1134.‏ (2015).
15. Ali and S. Hussain, "Communication design for energy management automation in microgrid" *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
16. Y. Zhang, H. J. Jia, and L. Guo, "Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control," *presented at the Innovative Smart Grid Technologies* (ISGT), 2012 IEEE PES, Washington, DC, USA, 2012.
17. Lu, X., Guerrero, J. M., Sun, K., Vasquez, J. C., Teodorescu, R., & Huang, L. "Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids". *IEEE Transactions on Smart Grid*, *5*(2), 683-692.‏. (2013).
18. Wang, F., Wang, Y., Gao, Q., Wang, C., & Liu, Y.," A control strategy for suppressing circulating currents in parallel-connected PMSM drives with individual DC links". *IEEE transactions on power electronics*, *31*(2), 1680-1691.‏ (2015).-118.

1. Data Centers [↑](#footnote-ref-1)
2. Phase lock loop [↑](#footnote-ref-2)
3. Decupled [↑](#footnote-ref-3)
4. Cascade [↑](#footnote-ref-4)