

Using Modular Multilevel Converter-Distribution Static Synchronous Compensator Integrated with Yy-Transformer to Compensate Reactive Power and Unbalanced Voltage in Distribution Grid

Asghar Eskandari, MSc

Education's Teacher- Education office, District 1, Zanjan, Iran
a_Eskandari61@yahoo.com

Abstract

Unbalanced loads in the distribution grid can cause unbalanced supply voltage and reduce the power quality of the system. Besides, reactive power loads might create the voltage disturbances such as voltage sag/swell. In this paper, a four-wire distribution static synchronous compensator (DSTATCOM) integrated with Yy-transformer to compensate both the unbalanced voltage and reactive power is proposed. A DSTATCOM based on modular multilevel converter (MMC) connects to the group of taps in the primary windings of Yy-transformer to constitute an interconnected structure. The compensating currents flow through the taps. This structure is similar to an autotransformer. Compared to the conventional MMC-DSTATCOM, with proposed structure, The DSTATCOM connection point voltage decreases and one can trade-off between the capability of the power device's rated voltage and current. Therefore, it can be decreased the primary investment costs, the voltage stresses and the size of compensation system. Furthermore, a control algorithm based on measuring the point of common coupling (PCC) instantaneous voltage and current is presented that it is able to compensate the zero and negative sequence voltage due to unbalanced load and grid. To compensate these components, voltage and current loops are used to track accurately the reference voltages of MMC-DSTATCOM by means of unbalanced algorithm. Simulation results verify the proposed method.

Keywords: distribution static synchronous compensator, distribution transformer, reactive power, unbalanced voltage

Received: 18 November 2022

Revised: 3 January 2023

Accepted: 16 March 2023

Corresponding Author: Asghar Eskandari

Citation: A. Eskandari, "Using modular multilevel converter-distribution static synchronous compensator integrated with yy-transformer to compensate reactive power and unbalanced voltage in distribution grid", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 60, pp. 149-170, March 2025 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001>.....

مقاله پژوهشی

جبران توان راکتیو و نامتعادلی ولتاژ در شبکه توزیع به وسیله مبدل‌های چندسطحی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع ادغام شده با ترانسفورماتور با اتصال ستاره-ستاره

اصغر اسکندری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

دبیر- آموزش و پرورش ناحیه یک، زنجان، ایران
a_Eskandari61@yahoo.com

چکیده: بارهای نامتعادل در شبکه توزیع می‌تواند باعث نامتعادل شدن ولتاژ تغذیه و کاهش کیفیت توان سیستم گردد. از طرفی، بارهای توان راکتیو، ممکن است اختلال‌های ولتاژ مانند کمبود و بیش‌بود ولتاژ ایجاد کند. در این مقاله یک جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع چهارسیمه ادغام شده با یک ترانسفورماتور با اتصال ستاره-ستاره برای جبران ولتاژ نامتعادل و توان راکتیو پیشنهاد می‌گردد. یک جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع (DSTATCOM) با مبدل‌های چندسطحی ماژولار به گروهی از تپ‌های موجود در سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور ستاره-ستاره اتصال می‌یابد تا یک ساختار به هم پیوسته را تشکیل دهد. جریان‌های جبران از طریق این تپ‌ها جاری می‌گردند. این ساختار مشابه یک اتوترانسفورمر است. در مقایسه با جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع متوالی رایج با این ساختار، ولتاژ نقطه اتصال جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع کاهش یافته و می‌توان بین قابلیت ولتاژ و جریان نامی تجهیزات قدرت مصالحه‌ای ایجاد نمود. بنابراین، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تنش ولتاژ و اندازه سیستم جبران می‌تواند کاهش یابد. علاوه بر این، یک الگوریتم کنترلی مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ و جریان لحظه‌ای نقطه اتصال مشترکین (PCC) پیشنهاد می‌گردد که قادر به جبران ولتاژهای توالی منفی و صفر ناشی از بار و شبکه نامتعادل است. برای جبران این مولفه‌ها، حلقه‌های جریانی و ولتاژی جهت ردیابی دقیق ولتاژهای مرجع جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار (MMC-DSTATCOM) به وسیله الگوریتم نامتعادلی به کار می‌رود. نتایج شبیه‌سازی صحت طرح پیشنهادی را تایید می‌نماید.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور توزیع، توان راکتیو، جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع، ولتاژ نامتعادل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: اصغر اسکندری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: زنجان- آموزش و پرورش ناحیه یک

۱- مقدمه

در این بخش به مرور ادبیات تحقیق و مطالعه‌های انجام گرفته در زمینه جبران ولتاژ نامتعادل و توان راکتیو توسط ادوات جبران مختلف پرداخته می‌شود. همچنین، از آنجایی که تمرکز مقاله در مورد جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع^۱ (DSTATCOM) مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار^۲ (MMC) ادغام شده با ترانسفورماتور توزیع است، لذا مطالعه‌های متعددی در این زمینه انجام می‌گیرد.

نگرانی‌ها درباره شدت و افزایش مسائل کیفیت توان، سازمان‌ها و شرکت‌های فنی در کشورهای مختلف را بر آن داشته است تا شاخص‌هایی برای ارزیابی کیفیت انرژی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان وضع نمایند [۱]. بر این اساس، در مرجع [۲] کارهایی مبتنی بر روش پیشنهادی توسط IEC [۱] برای تعیین میزان عدم تعادل یا تغییر بهبودیافته آن انجام شده است. یک ضریب نامتعادلی ولتاژ^۳ (VUF) به صورت نسبت بین ولتاژهای توالی منفی و مثبت در نقطه اتصال مشترکین^۴ (PCC) تعریف شده که این کمیت قبل و بعد از اتصال بار اندازه‌گیری می‌گردد و برای کمیت‌بندی نامتعادلی سیستم به کار می‌رود. با وجود سادگی این روش، مسائلی مربوط به متغیر بودن بارها وجود داشته و نیز دشواری‌هایی در شرایط قبل و بعد از اتصال بار و نیز اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در هرکدام از شرایط قبلی را دارد. در مرجع‌های [۳] و [۴]، روشی برای محدودکردن عدم تعادل از طریق قرار دادن خازن بر اساس جستجوی محلی تکراری^۵ (ILS) فراشهودی ارائه شده است. این روش می‌تواند مشخص کند که چه تعداد خازن موردنیاز است، به کدام شین باید وصل شوند و توان هر خازن چقدر است. یک تخمین و ابزار ردیابی دقیق برای عدم تعادل ولتاژ و هارمونیک‌های جریان در ریزشبکه در مرجع [۵] ارائه می‌گردد. در این تحقیق، میزان عدم تعادلی شبکه و مصرف‌کننده الکتریکی مبتنی بر جریان‌های تطبیقی و فیلترهای دیجیتالی بازگشتی باند باریک تعریف می‌گردد، ولی این روش با توجه به مرجع [۶]، هنگامی که بار دینامیکی نظیر ماشین القایی استفاده می‌شود، نتایج متناقضی دارد که دلیل این امر اختلاف کوچک امپدانس‌های توالی مثبت و منفی است.

در مرجع‌های [۷] و [۸]، محققین روشی مبتنی بر مرجع [۶] برای تعیین سهم مجزای هرکدام از منابع مختلف با یک عدم تعادل در سیستم قدرت پیشنهاد می‌دهند. علاوه بر به‌کارگیری مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان PCC، این نویسندگان روشی برای تخمین مؤلفه توالی منفی در هر فیدر با مفهوم امپدانس بار مجموع پیشنهاد می‌دهند. بر اساس همین روش به‌عنوان تحقیق قبلی، در مرجع [۹] الگوریتمی با قابلیت ایجاد تخمین مولفه‌های توالی منفی و مثبت ارائه شده است. بنابراین، هیچ‌کدام از این تحقیق‌ها از روش حوزه زمان برای انجام مطالعه استفاده نکرده‌اند.

همه روش‌های مذکور در مرجع‌های [۶] و [۱۰] به صورت آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که روش مبتنی بر جریان‌های تطبیقی و غیر تطبیقی بهترین گزینه برای شناسایی میزان عدم تعادل است، به‌خصوص هنگامی که مصرف‌کننده شامل بارهای استاتیکی است. با این حال، ایجاد یک روش با قابلیت کمیت‌بندی میزان عدم تعادل ولتاژ دینامیکی بین شبکه و مصرف‌کننده اساسی و ضروری است. اگرچه DSTATCOM در ابتدا برای جبران توان راکتیو، تنظیم ولتاژ و اصلاح ضریب قدرت پیشنهاد شده، لذا مطالعه‌های بسیاری وجود دارند که در آن، این تجهیز برای جبران نامتعادلی ولتاژ و جریان شبکه به‌کار رفته است [۱۲]. در نتیجه مدل‌های ریاضی برای کنترل ولتاژ در شین PCC به‌خصوص برای جبران ولتاژ توالی منفی PCC در ادبیات قبلی ارائه نشده است. فقدان این مدل‌ها باعث دشواری به‌کارگیری روش ریاضی جهت طراحی بهره‌های کنترل‌کننده-های ولتاژ AC می‌گردد.

در حال حاضر دو طرح اصلی برای استفاده از DSTATCOM جهت جبران توان راکتیو در شبکه توزیع تحت عناوین جبران متمرکز در سمت فشارقوی و جبران غیرمتمرکز در سمت فشار ضعیف وجود دارد. در طرح جبران متمرکز ولتاژ PCC بالاست. بنابراین به دلیل محدود بودن ولتاژ قابل تحمل تجهیزات الکترونیک قدرت، DSTATCOM نیاز به اعمال ساختارهای متوالی یا روش‌های دیگر برای کاهش تنش ولتاژی آن مانند اتصال از طریق ترانسفورماتور کوپلاژ سری با شاخه‌های غیرفعال خازنی و سلفی-خازنی دارد [۱۳]. ترانسفورماتور کوپلاژ هزینه‌های عملیاتی را افزایش داده و باعث حجیم شدن سیستم کلی خواهد شد. برای روشی که در آن DSTATCOM سری با شاخه‌های غیرفعال قرار می‌گیرد، شاخه‌های غیرفعال اغلب ولتاژ مؤلفه اصلی PCC را حفظ می‌نماید و در نتیجه ولتاژ لینک DC مربوط به DSTATCOM به‌شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، کل سیستم جبران

دارای محدوده جبران توان راکتیو نسبتاً باریکی خواهد بود [۱۴]. در طرح جبران غیرمتمرکز، ظرفیت جبران DSTATCOM به قابلیت انتقال جریان تجهیزات الکترونیک قدرت محدود می‌گردد. می‌توان برای افزایش ظرفیت جبران کلی از چند DSTATCOM موازی استفاده نمود، اما این امر می‌تواند منجر به مسئله تشدید گردد [۱۵]. همچنین، بهره کلی سیستم در اثر فقدان کنترل هماهنگ کاهش خواهد یافت. به‌طور خلاصه، ولتاژ مورد نیاز DSTATCOM در هر دو طرح جبران متمرکز و غیرمتمرکز باید ثابت باشد که یک عیب قابل توجه به حساب می‌آید. مورد اول توسط توانایی ولتاژ قابل تحمل تجهیزات الکترونیک قدرت محدود می‌گردد و مورد دوم با توانایی انتقال جریان محدود می‌شود. در صورتی که ولتاژ مورد نیاز DSTATCOM بتواند به‌صورت انعطاف‌پذیری انتخاب گردد، آنگاه استفاده کلی از حداکثر ولتاژ قابل تحمل و جریان قابل انتقال ادوات الکترونیک قدرت می‌تواند تحقق یافته و بهره اقتصادی آن به‌شدت بهبود یابد. از این منظر روش جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع ادغام شده با ترانسفورماتور برای کاهش ولتاژ نقطه اتصال مبدل پیشنهاد شده است [۱۶]. مرجع [۱۶] سیستم فیلتر قدرت سلفی قابل کنترل^۶ (CIPF) را پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [۱۷]، CIPF برای حل مسائل کیفیت توان موجود در سیستم‌های با منابع توان DC صنعتی اعمال می‌گردد. مدیریت کیفیت توان نیروگاه خورشیدی (PV) با ترانسفورماتور ادغام شده با روش فیلترینگ در مرجع [۱۸] مورد بحث قرار می‌گیرد. طرح جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل چندسطحی متوالی ترکیب شده با ترانسفورماتور توزیع اتصال مثلث-ستاره با نقطه خنثی در مرجع [۱۹] ارائه شده است. این طرح می‌تواند یک انتخاب منعطف برای دستیابی به ولتاژ DSTATCOM بدون تغییر ساختار ترانسفورماتور توزیع ارائه دهد. برای افزایش بهره سیستم و بهبود قابلیت اطمینان و ادغام سیستم جبران، مبدل‌ها به تپ‌های ترانسفورمر متعادل ستاره-مثلث اتصال یافته‌اند تا کیفیت توان خطوط ریلی الکتریکی را بهبود بخشد [۲۰].

بنابراین، در این مقاله یک DSTATCOM چهارسیمه ترکیب شده با یک ترانسفورماتور ستاره-ستاره [۱،۱۲] برای جبران ولتاژ نامتعادل و جبران توان راکتیو پیشنهاد می‌گردد. یک جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل چند سطحی ماژولار [۱۹] به گروهی از تپ‌های موجود در سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور اتصال می‌یابد تا یک ساختار به هم پیوسته را تشکیل داده و به‌صورت یک اتوترانسفورماتور عمل نماید با این طرح می‌توان بین ولتاژ نامی و جریان قابل تحمل ادوات قدرت و به‌خصوص کلیدها مصالحه‌ای ایجاد نمود. بنابراین، می‌توان اندازه سیستم جبران و به تبع آن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را کاهش داد. برای بهبود عملکرد پاسخ دینامیکی سیستم، استراتژی کنترلی جبران پیش‌خور ارائه می‌گردد. همچنین، جریان راکتیو مرجع به منظور پیش‌گیری از بروز اضافه جریان در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور، صورت می‌گیرد. علاوه بر این، یک الگوریتم کنترلی پیشنهاد می‌گردد که قادر به جبران ولتاژهای توالی منفی و صفر ناشی از بار نامتعادل است. برای جبران هر کدام از مؤلفه‌های توالی منفی و صفر، دو حلقه جریان داخلی و دو حلقه ولتاژ بیرونی جهت تضمین ردیابی دقیق ولتاژهای مرجع تولیدی DSTATCOM به‌وسیله الگوریتم ارزیابی نامتعادلی به‌کار می‌رود. از بازوی چهارم DSTATCOM برای حذف مؤلفه توالی صفر ولتاژ شبکه استفاده خواهد شد. این کنترل‌کننده‌ها در چارچوب مرجع سنکرون طراحی می‌گردند [۱]. روش پیشنهادی در این مطالعه برای کنترل DSTATCOM به‌منظور جبران نامتعادلی تولید شده توسط مصرف‌کننده از طریق جبران همه ولتاژهای توالی منفی و صفر PCC به‌کار می‌رود. روش محاسبه میزان نامتعادلی ارائه شده در این مقاله مبتنی بر روش پیشنهادی در مرجع [۱] است. بنابراین، روش پیشنهادی نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای شبکه قبل از اتصال به مصرف‌کننده را ندارد و فقط به داشتن اطلاعاتی از سیستم معادل و مقادیر امپدانس مصرف‌کننده در شین PCC احتیاج دارد [۱۱]. لازم به ذکر است که در مرجع [۱] فقط جبران نامتعادلی ولتاژ لحاظ شده و در مرجع‌های [۱۲]، [۱۶] و [۲۰] فقط جبران توان راکتیو در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در طرح پیشنهادی علاوه بر جبران توان راکتیو، جبران نامتعادلی نیز به مجموعه جبران افزوده شده است. همچنین، در هیچ‌یک از دو طرح مذکور از مبدل چند سطحی ماژولار استفاده نشده است. لذا نوآوری طرح پیشنهادی، ترکیب روش‌های انجام شده در مرجع‌های [۱] و [۱۲] به‌منظور جبران هم‌زمان ولتاژ نامتعادل و توان راکتیو با به‌کارگیری مبدل چند سطحی ماژولار است. بنابراین، مزایای هر دو طرح با به‌کارگیری مبدل چند سطحی ماژولار تنها در یک طرح و به‌صورت ادغام شده لحاظ شده است. لذا سهم علمی مقاله و برتری آن نسبت به کارهای انجام شده در این زمینه عبارت‌اند از:

- ۱- جبران ولتاژ توالی منفی شین PCC از طریق استخراج مؤلفه‌های توالی منفی آن با روش انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم^۷ (SOGI) و به‌کارگیری دو کنترل‌کننده ولتاژی و جریانی توالی منفی مبتنی بر کنترل‌کننده متناسب-انتگرال‌گیر (PI) رایج.
- ۲- جبران ولتاژ توالی صفر شین PCC از طریق بازوی چهارم DSTATCOM با استخراج مؤلفه‌های توالی صفر توسط انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم و به‌کارگیری دو کنترل‌کننده ولتاژی و جریانی توالی صفر مبتنی بر کنترل‌کننده PI رایج.
- ۳- جبران توان راکتیو شین PCC از طریق کنترل ولتاژ توالی مثبت شین PCC و تولید سیگنال جریان مرجع مؤلفه عمودی توسط اختلاف بین ولتاژ توالی مثبت مولفه مستقیم اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع آن یعنی ولتاژ توالی مثبت مولفه مستقیم مرجع و سپس عبور از یک کنترل‌کننده PI رایج.
- ۴- به‌کارگیری ترانسفورماتور ستاره-ستاره با یک تپ مرکزی به‌منظور کاهش مقادیر نامی ولتاژ و جریان ادوات کلیدزنی مبتنی بر مبدل چند سطحی مازولار.
- ۵- به‌کارگیری مبدل چند سطحی مازولار جهت کاهش فرکانس کلیدزنی و کاهش تلفات کلیدها و سایر مزایای مربوط به این نوع مبدل.
- ۶- ادغام روش‌های جبران ولتاژ نامتعادل و توان راکتیو مذکور به همراه ادغام مزایای آن‌ها تنها با استفاده از یک مجموعه DSTATCOM مبتنی بر مبدل چند سطحی مازولار ترکیبی با ترانسفورمر ستاره-ستاره.

۲- تشریح سیستم جبران پیشنهادی

در این پژوهش به‌منظور جبران هم‌زمان توان راکتیو و نامتعادلی ولتاژ شبکه از یک طرح DSTATCOM سه‌فاز چهارسیمه مبتنی بر مبدل چند سطحی مازولار استفاده می‌شود. برای جبران نامتعادلی ولتاژ نیاز به استخراج مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی شین PCC است. همچنین، برای جبران ولتاژ توالی صفر، از DSTATCOM چهارسیمه با هادی نوترال استفاده می‌گردد. بارهای متعادل و نامتعادل با ضریب قدرت سلفی و خازنی از طریق ترانسفورماتور ستاره-ستاره تغذیه می‌شوند. استراتژی کنترلی پیشنهادی قادر است، با تزریق مؤلفه عمودی توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تأمین نموده و ضریب قدرت شبکه را در مقدار مطلوبی حفظ نماید [۱]. این الگوریتم پیشنهادی در حوزه زمان، ولتاژهای نامتعادل شبکه را با به‌کارگیری اندازه‌گیری ولتاژها و جریان‌های لحظه‌ای سمت مشترکین کمیت‌بندی می‌نماید [۱]. مدل‌های سیگنال کوچک استخراج شده و برای طراحی کنترل‌کننده‌های DSTATCOM و به‌منظور جبران ولتاژهای توالی منفی و صفر ناشی از مصرف‌کننده استفاده می‌شوند. این کنترل‌کننده‌ها در چارچوب مرجع سنکرون با دو حلقه جریان داخلی و دو حلقه ولتاژ بیرونی برای هر کدام از توالی‌های جبران شده طراحی می‌گردند تا ردیابی ولتاژهای مرجع تولیدشده DSTATCOM به‌وسیله الگوریتم جبران نامتعادلی تضمین گردد [۱]. جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع پیشنهادی با مبدل‌های چند سطحی مازولار چهارسیمه به گروهی از تپ‌های سیم‌پیچی‌های اولیه ترانسفورماتور ستاره-ستاره برای ایجاد ساختار ترکیبی متصل می‌گردد. ساختار پیشنهادی می‌تواند یک انتخاب ولتاژ قابل انعطاف برای دستیابی به مصالحه بین ولتاژ و جریان نامی ارائه دهد.

۲-۱- مدل‌سازی ریاضی و کنترل مبدل‌های چند سطحی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع پیشنهادی

شکل (۱) ساختار DSTATCOM استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد که برای جبران ولتاژهای توالی منفی و صفر در شین PCC اعمال خواهد شد. این سیستم دارای یک مبدل چند سطحی مازولار سه‌فاز چهارسیمه با N زیرماژول^۸ (زیر ماژول) در بازوی بالا و N کلید زیر ماژول در بازوی پایین مبتنی بر مبدل نیم موج^۹ (HBC) است که هر کدام از زیر ماژولها شامل یک خازن DC معادل است. چهار فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول به‌عنوان مدار واسط بین جبران‌ساز و پایانه‌های شبکه به کار می‌رود. هرچند مبدل چند سطحی مازولار دارای فیلترهای RL خروجی است، لذا به‌عنوان فیلتر تکمیلی، در پایانه‌های آن از مدار RL کوچک استفاده می‌گردد. شبکه الکتریکی با یک منبع سه‌فاز ایده‌آل سری با یک امپدانس مدل شده است. با صرف‌نظر از هارمونیک‌های تولیدی توسط مبدل چند سطحی مازولار و با توجه به اینکه ولتاژهای فاز به خنثای اندازه‌گیری شده در شین

PCC نامتعادل هستند، لذا معادلات دینامیکی زیر می‌تواند در چارچوب مرجع سنکرون و برای تجزیه تحلیل جریان‌ها توسط DSTATCOM مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار مطابق شکل (۱) بیان شود [۱]:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = +\omega L_f i_q - R_{eq} i_d + v_{td} - v_{pcc,d} \quad (۱)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -\omega L_f i_d - R_{eq} i_q + v_{tq} - v_{pcc,q} \quad (۲)$$

$$L_f \frac{di_0}{dt} = -R_{eq} i_0 + v_{t0} - v_{pcc,0} \quad (۳)$$

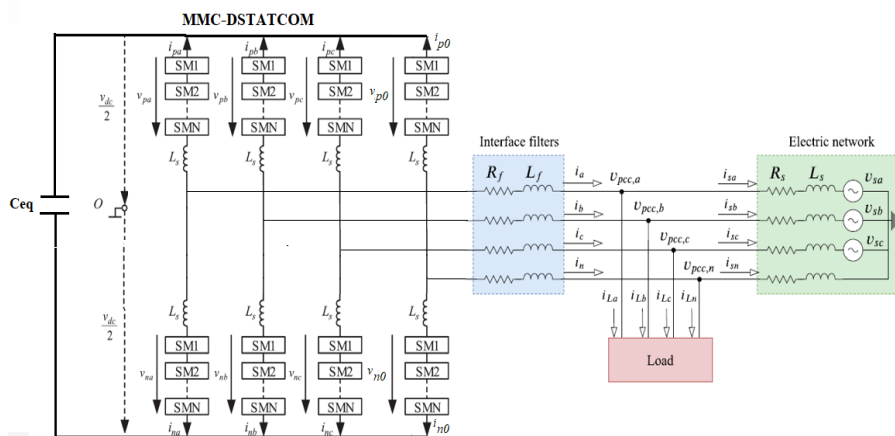
۱-۲-۱- کنترل جریان‌های توالی مثبت و منفی

همان‌طوری که اشاره شد، جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار (MMC-DSTATCOM) طوری کنترل خواهد شد که بتواند جریان‌های توالی مثبت و منفی را به‌منظور تنظیم ولتاژ توالی مثبت تجزیه و تحلیل کرده و ولتاژ توالی منفی در شین PCC را جبران نماید. این امر یک روش جالب است که در شبکه‌های با قدرت اتصال کوتاه پایین به‌کار می‌رود چون مقادیر امپدانس بالای این شبکه‌ها برای جبران ولتاژ توالی منفی شین PCC نیازمند جریان‌های با دامنه کم است [۱، ۱۹]. بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۲) که مربوط به جریان مؤلفه‌های dq توالی مثبت است، با توجه به علامت‌های کوپلینگ متقابل و حلقه‌های تجزیه‌شده می‌تواند برای جریان‌های توالی منفی محورهای dq نیز ترسیم گردد. بهره‌های آن مطابق رابطه‌های (۴) و (۵) طراحی می‌شود که در آن ثابت زمانی مطلوب حلقه‌های کنترل جریان توالی منفی محورهای dq است.

$$k_{p,i2} = (L_f / \tau_{i2}) \quad (۴)$$

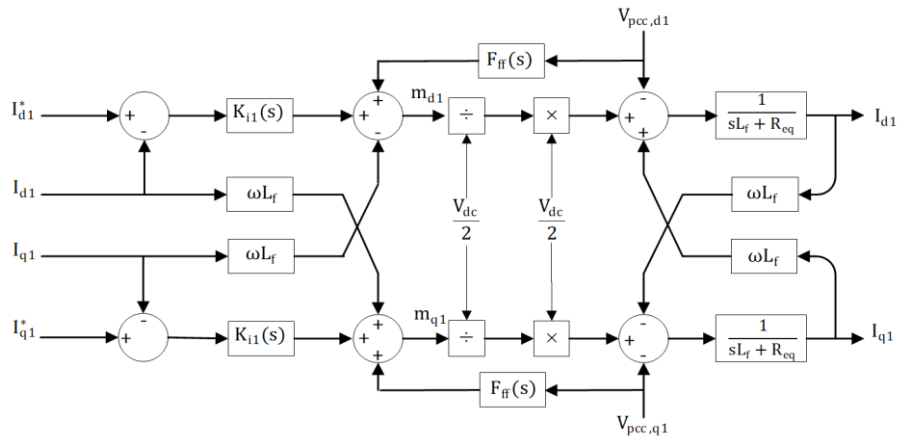
$$k_{i,i2} = (R_{eq} / \tau_{i2}) \quad (۵)$$

پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های جریان MMC-DSTATCOM با جداسازی مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی از ولتاژها و جریان‌های جبران شده توسط جبران‌ساز استاتیکی شروع می‌شود. بنابراین، با اعمال تبدیل کلارک در ولتاژهای لحظه‌ای PCC رابطه (۶) برقرار است که سمت چپ معادله فوق ولتاژهای اندازه‌گیری شده لحظه‌ای صفر، آلفا و بتا در شین PCC هستند. تبدیل تشریح شده در بالا مزیت جداسازی مؤلفه‌های لحظه‌ای توالی مثبت و صفر ولتاژ PCC را دارد که در آن ولتاژهای PCC مؤلفه‌های آلفا و بتا و صفر حفظ خواهد شد. این ویژگی می‌تواند برای استخراج مؤلفه‌های لحظه‌ای توالی مثبت و منفی ولتاژهای PCC مؤلفه‌های آلفا و بتا با استفاده از دو انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم و یک حلقه قفل فاز (PLL) برای ردیابی فرکانس مؤلفه اصلی و زاویه ولتاژ لحظه‌ای توالی مثبت در شین PCC استفاده گردد. الگوریتم استخراج مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی از طریق ولتاژهای لحظه‌ای شین PCC در مرجع [۱] ارائه شده است.



شکل (۱): دیاگرام فنی مبدل‌های چند سطحی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع سه فاز چهارسیمه متصل به مدار معادل شبکه توزیع بدون ترانسفورماتور با اتصال ستاره-ستاره

Figure (1): Four-wire three-phase MMC-DSTATCOM block diagram connected to equivalent distribution grid with no Yy-transformer



شکل (۲): بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان توالی مثبت

Figure (1): Block diagram for positive sequence current control loop

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,0} \\ V_{pcc,\alpha} \\ V_{pcc,\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pcc,an} \\ V_{pcc,bn} \\ V_{pcc,cn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ولتاژهای PCC مولفه‌های آلفا و بتا به دو مدار انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم داده می‌شود که سیگنال‌های خروجی شامل ولتاژ PCC مستقیم و عمودی مولفه آلفا و بتا هستند که بین هرکدام از آن‌ها ۹۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد. این ولتاژها می‌توانند با یکدیگر ترکیب شده تا مؤلفه‌های لحظه‌ای توالی مثبت و منفی ولتاژهای شین PCC محاسبه گردد. در بخش آخر دیاگرام، ولتاژهای توالی مثبت و منفی در مختصات آلفا-بتا به مختصات dq با رابطه زیر تبدیل می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,d1} \\ V_{pcc,q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \sin(\rho) \\ -\sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{pcc,\alpha 1} \\ V'_{pcc,\beta 1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,d2} \\ V_{pcc,q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\rho) & \sin(-\rho) \\ -\sin(-\rho) & \cos(-\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{pcc,\alpha 2} \\ V'_{pcc,\beta 2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

برخلاف الگوریتم به کاررفته برای ولتاژها، استخراج مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی جریان‌ها با استفاده از یک فیلتر شکاف انجام می‌شود. این انتخاب به دلیل مقادیر کم ثابت زمانی جریان‌های MMC-DSTATCOM است که می‌تواند پاسخ دینامیکی بهتری در مقایسه با انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم داشته باشد. بنابراین، جریان‌های MMC-DSTATCOM و PCC اندازه‌گیری شده و به مختصات آلفا-بتا با یک روش مشابه با رابطه (۶) تبدیل می‌گردد. سپس، جریان‌های منته‌جه به مختصات dq با استفاده از رابطه‌های (۷) و (۸) تبدیل می‌گردند و نوسانات آن با یک فیلتر شکاف حذف می‌گردد که تابع تبدیل آن با رابطه (۹) ارائه می‌گردد:

$$F_n(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2} \quad (9)$$

۲-۱-۲- کنترل جریان توالی صفر

چهارمین بازوی MMC-DSTATCOM سه‌فاز در شکل (۱) می‌تواند به صورت یک مبدل منبع ولتاژ تک‌فاز کنترل گردد تا جریان توالی صفر تجزیه و تحلیل شده و عدم تعادلی ولتاژ توالی صفر در شین PCC جبران گردد. ساختار مدار انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم در مرجع [۱] ارائه شده است که می‌تواند برای تبدیل ولتاژ توالی صفر PCC مطابق رابطه (۶) با ولتاژهای توالی صفر

شین اتصال مشترکین در چارچوب آلفا-بتا به کار رود. این ولتاژهای توالی صفر مجازی در مختصات آلفا-بتا می‌تواند به چارچوب مرجع سنکرون مطابق رابطه زیر تبدیل گردد:

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,d0} \\ V_{pcc,q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \sin(\rho) \\ -\sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pcc,\alpha0} \\ V_{pcc,\beta0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

برخلاف طرح مبتنی بر انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم، جریان‌های توالی صفر در مختصات آلفا-بتا با یک بافر تأخیر زمانی به‌دست می‌آیند. این انتخاب به علت مشخصه دینامیکی سریع‌تر جریان‌های MMC-DSTATCOM است. این روش به‌صورت فیلتر اکتیو تک فاز با استفاده از تئوری توان لحظه‌ای کنترل می‌گردد. بنابراین، مؤلفه‌های ساختگی مجازی به‌دست‌آمده شامل جریان‌های توالی صفر آلفا و بتا می‌تواند در چارچوب مرجع سنکرون با استفاده از رابطه (۱۰) بازنویسی گردد.

۳-۱-۲- کنترل ولتاژ توالی مثبت نقطه اتصال مشترکین

با توجه به مدار شکل (۱) برای مؤلفه‌های توالی مثبت، امکان نوشتن روابط زیر برای ولتاژهای محورهای dq در شین PCC وجود دارد:

$$V_{pcc,d1} = L_{s1} \frac{di_{s,d1}}{dt} - \omega L_{s1} i_{s,q1} + R_{s1} i_{s,d1} + v_{s,d1} \quad (11)$$

$$V_{pcc,q1} = L_{s1} \frac{di_{s,q1}}{dt} - \omega L_{s1} i_{s,d1} + R_{s1} i_{s,q1} + v_{s,q1} \quad (12)$$

شکل (۳) بلوک دیاگرام ولتاژ PCC توالی مثبت حلقه بسته را نشان می‌دهد. بلوک تابع تبدیل حلقه بسته کنترل‌کننده جریان توالی مثبت شکل (۲) و بلوک کنترل‌کننده ولتاژ توالی مثبت باید برای اطمینان از اینکه ثابت زمانی تابع تبدیل حلقه بسته کنترل ولتاژ حداقل یک‌دهم بزرگ‌تر از ثابت زمانی حلقه بسته جریان است، طراحی گردد. آنگاه تابع تبدیل حلقه بسته کنترل-کننده جریان توالی مثبت می‌تواند با بهره ۱ جایگزین شده و تابع تبدیل حلقه بسته کنترل ولتاژ توالی صفر به‌صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$H_{v1}(s) = \frac{1}{\tau_{v1}s + 1} \quad (13)$$

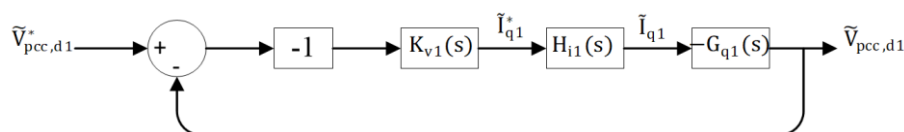
۴-۱-۲- کنترل ولتاژ توالی منفی نقطه اتصال مشترکین

مدل سیگنال کوچک به‌کاررفته برای طراحی کنترل‌کننده‌های مناسب برای جبران ولتاژهای توالی منفی PCC به‌صورت رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) ارائه می‌گردد [۱]:

$$\tilde{V}_{pcc,d2}(s) = G_{d2}(s) \tilde{I}_{d2}(s) - G_{q2}(s) \tilde{I}_{q2}(s) - G_{d2}(s) \tilde{I}_{L,d2}(s) + G_{q2}(s) \tilde{I}_{L,q2}(s) \quad (14)$$

$$\tilde{V}_{pcc,q2}(s) = G_{d2}(s) \tilde{I}_{q2}(s) + G_{q2}(s) \tilde{I}_{d2}(s) - G_{d2}(s) \tilde{I}_{L,q2}(s) - G_{q2}(s) \tilde{I}_{L,d2}(s) \quad (15)$$

دیاگرام حلقه بسته کنترل ولتاژ محورهای dq توالی منفی مشابه شکل (۳) بوده و در این مقاله ارائه نشده است. در این کنترل-کننده، ولتاژ توالی منفی محور مستقیم شین اتصال مشترکین با جریان توالی منفی محور عمودی کنترل می‌شود و ولتاژ توالی منفی محور عمودی شین اتصال مشترکین با جریان توالی منفی محور مستقیم کنترل می‌گردد. با تبعیت از روش طراحی ارائه شده در بخش قبلی، بهره کنترل ولتاژ توالی منفی حلقه بسته کنترل‌کننده انتگرالی با رابطه (۱۴) می‌تواند با انتخاب ثابت زمانی مناسب مطابق رابطه (۱۵) برای ولتاژ توالی منفی حلقه بسته طراحی گردد.



شکل (۳): ولتاژ توالی مثبت نقطه اتصال مشترکین حلقه بسته

Figure (3): Closed loop positive sequence voltage of PCC

$$K_{v2}(s) = k_{v2} / s \quad (16)$$

$$\tau_{v2} = 1 / (k_{v2} \omega L_{s2}) \quad (17)$$

۵-۱-۲- کنترل ولتاژ توالی صفر

دیگرام به کاررفته برای جبران ولتاژهای توالی صفر محورهای dq شین PCC با شکل (۳) یکسان است به جز در اندیس‌های مربوط به متغیرها و کنترل‌کننده‌ها و تغییر علامت‌های منفی در حلقه‌های مستقیم و عمودی. لذا، دیگرام مربوطه در این مقاله ارائه نشده است. مدل خطی‌سازی شده به کار رفته برای طراحی کنترل‌کننده‌های مناسب برای جبران ولتاژ توالی صفر PCC در مرجع‌های [۱] و [۱۹] ارائه شده است. تابع تبدیل حلقه بسته برای کنترل جریان توالی صفر با یک بهره واحد به منظور طراحی کنترل‌کننده ولتاژ توالی صفر PCC با رابطه (۱۸) در نظر گرفته شده است. بهره کنترل ولتاژ توالی صفر حلقه بسته می‌تواند با روشی محاسبه شود که ثابت زمانی ولتاژ توالی صفر حلقه بسته که رابطه (۱۹) بیان می‌گردد، حداقل یک‌دهم بزرگ‌تر از ثابت زمانی تابع تبدیل حلقه بسته کنترل‌کننده جریان توالی صفر گردد. حلقه‌های کنترلی ولتاژ توالی منفی و صفر مذکور تضمین می‌کنند که تمام عدم تعادلی‌های ولتاژ PCC جبران می‌گردد.

$$K_{v0} = k_{v0} / s \quad (18)$$

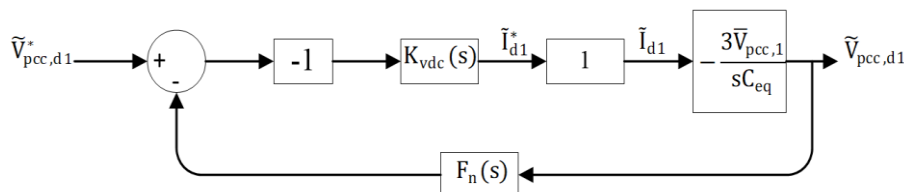
$$\tau_{i0} = 1 / (k_{v0} \omega L_{s0}) \quad (19)$$

۶-۱-۲- کنترل حلقه بسته ولتاژ DC جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار

در مرجع [۱]، مدل‌سازی سیگنال کوچک کنترل ولتاژ لینک DC یک DSTATCOM ارائه شده است. شکل (۴) بلوک دیگرام حلقه کنترلی ولتاژ DC یک DSTATCOM موجود در شکل (۱) را نشان می‌دهد. متوسط ولتاژ DC مربوط به مبدل‌های چند سطحی ماژولار تمامی بازوها اندازه‌گیری می‌شود و با مقدار مرجع آن ۱۶ کیلوولت مقایسه می‌گردد. هنگامی که این دو سیگنال مقایسه گردید، سیگنال منتهی به یک کنترل‌کننده PI ارسال می‌گردد که جریان مرجع مولفه مستقیم توالی مثبت را فراهم می‌نماید. بنابراین، تابع تبدیل حلقه بسته جریان با یک بهره واحد ارائه می‌گردد چون ثابت زمانی حلقه کنترل ولتاژ DC بزرگ‌تر از ثابت زمانی حلقه کنترل جریان است. لازم به ذکر است که مقدار تفرانس ولتاژ لینک DC برابر با ۵- یا ۵+ درصد مقدار مرجع آن در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که ولتاژ لینک DC در اثر مؤلفه‌های توالی منفی و صفر در جریان‌ها و ولتاژهای شین DC با دو برابر فرکانس شبکه شروع به نوسان می‌نماید، لذا یک فیلتر شکاف^۱ با تابع تبدیل بیان شده در رابطه (۹) تنظیم شده در فرکانس دو برابر فرکانس اصلی شبکه باید مورد استفاده قرار گیرد تا عملکرد حلقه کنترلی آن به خطر نیفتد. تابع تبدیل فیلتر ارائه شده در رابطه (۹) به کار رفته در کنترل ولتاژ DC با رابطه (۷) یکسان است. همچنین، این فیلتر برای جبران اختلال در حلقه کنترل ولتاژ DC طراحی نشده است. بهره‌های تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده حلقه بسته ولتاژ لینک DC می‌تواند با مقایسه صرفه‌های تابع تبدیل حلقه بسته بلوک دیگرام شکل (۴) با مشخصه چندجمله‌ای مرتبه دوم ارائه شده در رابطه (۲۰) به صورت رابطه‌های (۲۱) و (۲۲) محاسبه شود:

$$P(s) = (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (20)$$

$$k_{p,vdc} = \frac{2\xi\omega_n C_{eq}}{3\bar{V}_{pcc,d1}} \quad (21)$$



شکل (۴): بلوک دیگرام حلقه کنترلی ولتاژ dc

Figure (4): Diagram block of DC voltage control loop

$$k_{i,vdc} = \frac{\omega_n^2 C_{eq}}{3\bar{V}_{pcc,dI}} \quad (22)$$

۳- پیکربندی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار ادغام‌شده با ترانسفور-ماتور ستاره-ستاره

۳-۱- پیکربندی سیستم با ترانسفورمر ستاره-ستاره

ساختار یک MMC-DSTATCOM متوالی پیشنهادی ترکیب شده با ترانسفورماتور توزیع در شکل (۵) نشان داده شده است. اساساً این سیستم ترکیبی از یک ترانسفورماتور با چندین تپ و یک MMC-DSTATCOM متوالی است. سه سیم‌پیچی بر روی سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور با اتصال ستاره-ستاره طراحی می‌گردد. این MMC-DSTATCOM به تپ‌ها متصل می‌گردد و جریان‌های جبران از طریق این تپ‌ها تزریق می‌شود. این ساختار مشابه با یک اتوترانسفورماتور است. باید توجه کرد که تپ‌های سیم‌پیچی می‌تواند تا زمانی که ولتاژهای سه فاز متقارن باشد، به‌طور قابل‌انعطافی طراحی گردد. در مقایسه با MMC-DSTATCOM متوالی رایج، ولتاژ نقطه اتصال MMC-DSTATCOM در طرح پیشنهادی کاهش می‌یابد و یک مصالحه بین ولتاژ قابل‌تحمل و توانایی انتقال حداکثر جریان ادوات قدرت می‌تواند حاصل گردد. یک MMC-DSTATCOM متوالی با سطح ولتاژ شبکه ۱۰ کیلوولت در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که از ترانزیستورهای IGBT با سطح ولتاژ ۱/۷ کیلوولت و جریان ۱۰۰ آمپر استفاده شود، تعداد زیرماژول‌های هر فاز می‌تواند ۱۰ ماژول در نظر گرفته شود. بنابراین، به علت ظرفیت پست‌های هوشمند کمپکت به‌کار رفته در شبکه‌های توزیع شهری که ۱ مگاولت-آمپر است، لذا ظرفیت جبران توان راکتیو در حالت کلی ۴۰ درصد ظرفیت نامی ترانسفورماتور توزیع تنظیم می‌گردد و جریان نامی رایج تنها ۲۳ آمپر است. می‌توان مشاهده کرد، وقتی که ولتاژ قابل‌تحمل IGBT به‌طور کامل استفاده شود، آنگاه جریان آن تقریباً پایین خواهد بود. هنگامی که سیستم جبران پیشنهادی در شکل (۵) استفاده گردد، آنگاه ولتاژ اتصال MMC-DSTATCOM کاهش می‌یابد و جریان مصرفی ادوات قدرت می‌تواند در همین زمان افزایش یابد. در صورتی که از تپ مرکزی سیم‌پیچ‌های اولیه استفاده کنیم، سرمایه‌گذاری اولیه حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و ولتاژ اتصال MMC-DSTATCOM وابسته به نیازمندی‌های جبران توان راکتیو خواهد بود. این اوصاف، توزیع جریان سیم‌پیچی اولیه هنگامی که جریان‌های جبران از طریق تپ‌ها تزریق می‌شود، تغییر خواهد کرد [۱۲].

۳-۲- اصول جبران

برای شفاف‌سازی اصول جبران ساختار پیشنهادی، مدار معادل تک فاز در شکل (۶) نشان داده شده است. برای ساده‌سازی، DSTATCOM می‌تواند به‌عنوان یک منبع جریان کنترل‌شده در نظر گرفته شود. با توجه به شکل (۵)، ساختار پیشنهادی مشابه با یک اتوترانسفورماتور سه‌فاز سه سیم‌پیچه است. سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور دارای دو بخش است: سیم‌پیچ سری و سیم‌پیچ مشترک. W_1 ، W_2 و W_3 به ترتیب تعداد دورهای سیم‌پیچ سری، سیم‌پیچ مشترک و سیم‌پیچ ثانویه هستند [۱۲]. فاز a به‌عنوان مثال در نظر گرفته می‌شود و U_{SA} ولتاژ منبع است. با توجه به اصول نیروی محرکه مغناطیسی ترانسفورماتور و نادیده گرفتن جریان‌های تحریک، می‌توانیم معادله زیر را داشته باشیم:

$$W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2 - W_3 \dot{I}_{La} = 0 \quad (23)$$

با توجه به قانون جریان کیرشهف (KCL) رابطه (۲۳) می‌تواند به‌صورت رابطه (۲۴) تبدیل گردد:

$$W_1 \dot{I}_{SA} + W_2 (\dot{I}_{SA} + \dot{I}_{TA}) - W_3 \dot{I}_{La} = 0 \quad (24)$$

جریان بار می‌تواند به دو بخش مؤلفه توان اکتیو و مؤلفه توان راکتیو تقسیم شود، آنگاه رابطه (۲۴) می‌تواند به‌صورت رابطه (۲۵) بیان گردد:

$$(W_1 + W_2) \dot{I}_{SA} + W_2 \dot{I}_{TA} - W_3 (\dot{I}_{Lap} + \dot{I}_{Laq}) = 0 \quad (25)$$

برای اطمینان از اینکه سمت منبع دارای ضریب توان واحد خواهد بود، لذا جریان تزریقی باید در معادله زیر صدق کند:

$$W_2 \dot{I}_{TA} = W_3 \dot{I}_{Laq} \quad (26)$$

از طریق رابطه (26)، جریان جبران تزریقی می‌تواند با رابطه (27) محاسبه شود:

$$\dot{I}_{TA} = \frac{W_3}{W_2} \dot{I}_{Laq} \quad (27)$$

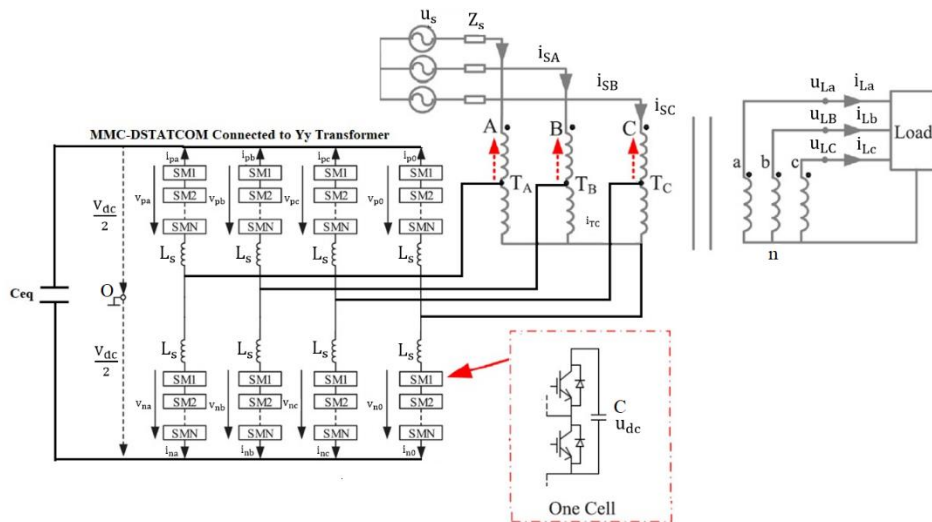
بنابراین، جریان سیم‌پیچ‌های سری و مشترک می‌تواند با رابطه زیر بیان گردد:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{W_3}{W_1 + W_2} \dot{I}_{Lap} \\ \dot{I}_2 = \frac{W_3}{W_1 + W_2} \dot{I}_{Lap} + \frac{W_3}{W_2} \dot{I}_{Laq} \end{cases} \quad (28)$$

از طریق رابطه (28) می‌توان متوجه شد که مقادیر جریان سیم‌پیچ‌های سری و مشترک بعد از تزریق جریان دیگر معادل نخواهند بود. دامنه جریان سیم‌پیچ مشترک بزرگ‌تر از جریان سیم‌پیچ سری است. در فازهای b و c نیز نتایج مشابهی خواهیم داشت.

3-3- استراتژی کنترلی تعادل ولتاژ مبدل‌های چندسطحی ماژولار

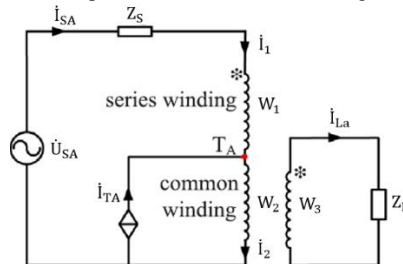
به علت پارامترهای مختلف تجهیزات کلیدزنی، ولتاژ خازن‌های زیر ماژول می‌تواند نامتعادل گردد و حتی منجر به ناپایداری مبدل چند سطحی ماژولار شود. بنابراین، کنترل تعادل ولتاژهای خازن زیر ماژول موردنیاز بوده و در شکل (7) معرفی شده است که شامل کنترل تعادل بازوها و کنترل تعادل تکی است.



شکل (5): دیاگرام فنی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار سه فاز چهارسیمه

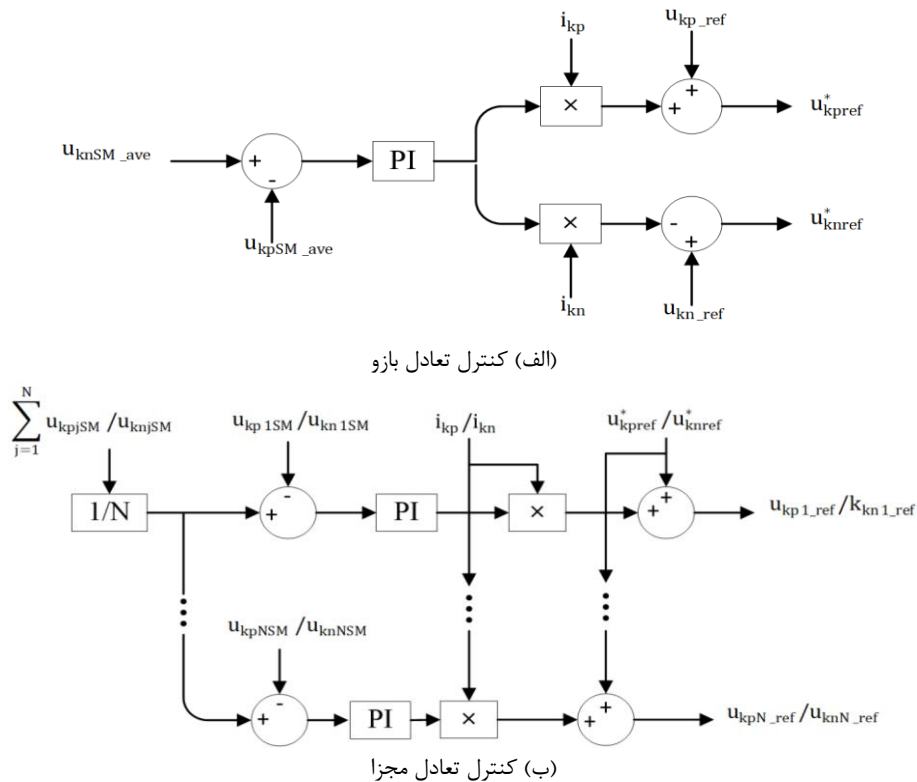
متصل به ترانسفورمر ستاره-ستاره پیشنهادی

Figure (5): Proposed four-wire three phase MMC-DSTATCOM integrated to Yy-transformer diagram



شکل (6): دیاگرام تکفاز ساختار پیشنهادی

Figure (6): Single phase diagram for proposed structure



شکل (۷): دیاگرام‌های روش‌های کنترل تعادل ولتاژ [۱۱]

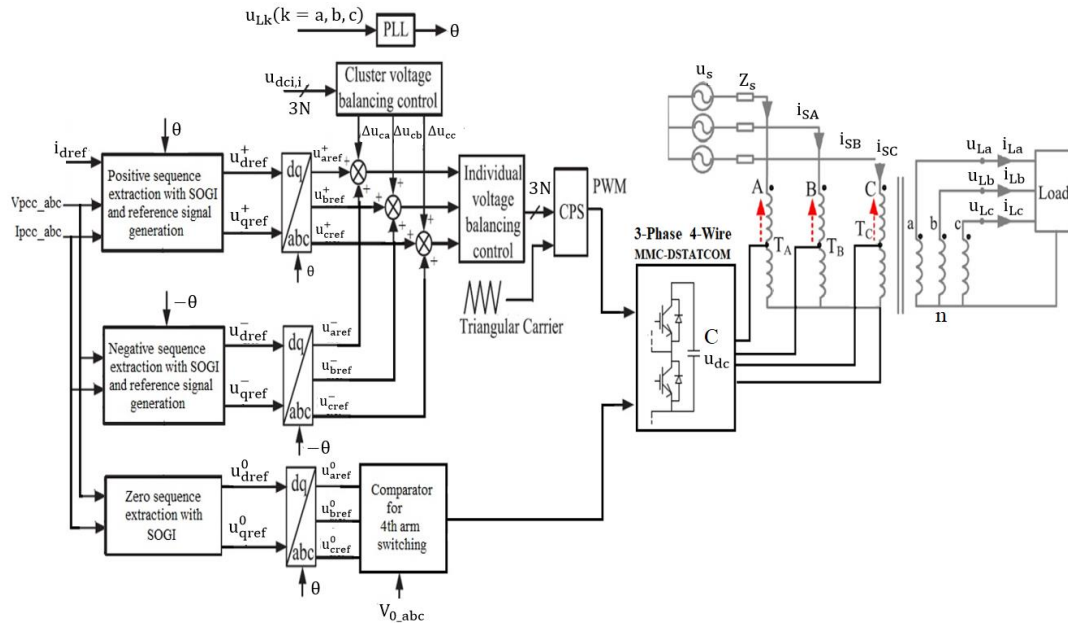
Figure (7): Voltage balance control diagrams, a) Arm balance control, b) Individual balance control [11]

روش کنترل تعادل بازو در شکل (۷-الف) برای متعادل نمودن ولتاژهای متوسط بازوی بالایی و بازوی پایینی ارائه می‌گردد. کنترل تعادل تکی ولتاژهای خازن زیرماژول که در شکل (۷-ب) نشان داده شده است برای هر بازو به کار می‌رود و یک کنترل-کننده PI برای هر زیرماژول استفاده می‌گردد که ولتاژ متوسط N زیرماژول در هر بازوی مرجع ولتاژ است. بنابراین، سیگنال‌های مدولاسیون مرجع برای هر زیرماژول به صورت رابطه (۲۹) به دست می‌آید [۱۱].

$$u_{kpj_ref} / u_{knj_ref} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (29)$$

۳-۴- استراتژی کنترلی جامع پیشنهادی

استراتژی کنترلی پیشنهادی مطابق بخش‌های قبلی و شکل (۸) است. در استراتژی پیشنهادی، ابتدا سیگنال‌های ولتاژ و جریان MMC-DSTATCOM متصل به PCC در چارچوب abc اندازه‌گیری شده و سپس توسط الگوریتم انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم به مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر تجزیه می‌گردند [۳-۱]. مؤلفه مستقیم جریان مرجع توالی مثبت از مقایسه ولتاژ لینک DC ناشی از بازوهای بالا و پایین مبدل‌های چند سطحی ماژولار با مقدار مرجع آن و عبور از یک کنترل‌کننده PI به دست می‌آید. مؤلفه عمودی جریان مرجع توالی مثبت از مقایسه ولتاژ توالی مثبت PCC با مقدار مرجع (۱ پریونیت) و عبور آن از کنترل‌کننده PI حاصل می‌شود. مؤلفه عمودی برای جبران توان راکتیو شین PCC و تنظیم ولتاژ آن به کار می‌رود. جریان مرجع توالی مثبت مولفه‌های عمودی و مستقیم با مقادیر اندازه‌گیری شده آن استخراج شده توسط انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم مقایسه شده و از یک کنترل‌کننده PI عبور داده می‌شود. خروجی PI همان خطای مرجع ولتاژ بوده که با مقادیر پیش‌خور فیلتر خروجی و ولتاژ پیش‌خور PCC جمع شده و در نهایت ولتاژ مرجع مولفه توالی مثبت محورهای عمودی و مستقیم تولید می‌شود. سپس، ولتاژ توالی منفی به دست آمده از انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم، با مقادیر مرجع آن (که مقدار آن به منظور جبران کامل مؤلفه توالی منفی شبکه صفر است) مقایسه شده و سیگنال حاصل از کنترل‌کننده PI عبور کرده و سیگنال جریان توالی منفی مرجع محورهای عمودی و مستقیم تولید می‌شود.



شکل (۸): بلوک دیاگرام طرح کلی جبران توان راکتیو و نامتعادلی ولتاژ نقطه اتصال مشترکین با جبران ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل های چندسطحی ماژولار ترکیب شده با ترانسفورماتور توزیع ستاره-ستاره

Figure (8): Overall diagram block for compensating the reactive power and voltage unbalanced of PCC by MMC-DSTATCOM integrated to distribution Yy transformer

جریان مرجع موجود با جریان اندازه گیری شده توالی منفی DSTATCOM مقایسه شده و از کنترل کننده PI عبور داده می شود. خروجی PI همان خطای مرجع ولتاژ توالی منفی است که با مقادیر پیش خور فیلتر و ولتاژ توالی منفی PCC جمع شده و در نهایت، ولتاژ مرجع توالی منفی محورهای مستقیم و عمودی به دست می آید. ولتاژهای توالی مثبت و منفی مرجع با یکدیگر جمع شده و سیگنال مرجع کلی با سیگنال متعادل ساز گروهی ولتاژ خازن های مبدل چند سطحی ماژولار جمع می گردد. سیگنال ولتاژ حاصل به کنترل کننده متعادل ساز مجزای ولتاژ خازن های هر بازو داده می شود که بلوک دیاگرام آن در شکل (۷) نشان داده شده است. در نهایت، سیگنال های مرجع کلی به بلوک مدولاسیون شیفیت فاز متوالی^{۱۱} (CPS) داده می شود تا عمل کلیدزنی مبدل های چند سطحی ماژولار انجام گیرد. سیگنال ولتاژ توالی صفر شبکه نیز از طریق روش بیان شده در بخش (۲) و همین بخش توسط الگوریتم انتگرال گیر تعمیم یافته مرتبه دوم استخراج شده، سپس با مقدار مرجع آن (که برای جبران کامل ولتاژ توالی صفر شبکه صفر است) مقایسه می گردد و سیگنال حاصل بعد از عبور از کنترل کننده PI، مؤلفه توالی صفر جریان مرجع محورهای مستقیم و عمودی شکل می گیرد. سیگنال مرجع توالی صفر با سیگنال توالی صفر جریان مقایسه می شود و از کنترل کننده PI عبور می نماید. مجدداً، خروجی PI با مقادیر پیش خور فیلتر خروجی و ولتاژ توالی صفر شبکه جمع شده و در نهایت سیگنال مرجع ولتاژ توالی صفر حاصل می شود. با مقایسه ساده این سیگنال با ولتاژ توالی صفر اندازه گیری شده، عمل کلیدزنی دو کلید ساده S7 و S8 که در بازوی بالا و پایین قرار دارند انجام می گیرد. به منظور سادگی کنترلی، کلیدهای S7 و S8 از نوع IGBT بوده و مبدل چند سطحی ماژولار انتخاب نمی شود. لازم به ذکر است که تحلیل پایداری سیستم پیشنهادی در مرجع [۱] انجام شده است. لذا با توجه به این که سیستم کنترلی ارائه شده در این مقاله منطبق بر مرجع [۱] است، بنابراین، پایداری سیستم تضمین شده است.

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، استراتژی کنترلی جبران هم زمان توان راکتیو و نامتعادلی ولتاژ شبکه پیشنهادی برای MMC-DSTATCOM چهارسیمه ترکیب شده با ترانسفورماتور توزیع ستاره-ستاره مورد شبیه سازی و ارزیابی قرار می گیرد. هدف اصلی از شبیه سازی، تأیید جبران مؤلفه های توالی منفی و صفر ولتاژ شبکه به همراه جبران توان راکتیو در شین نقطه اتصال مشترکین است. بلوک دیاگرام کامل طرح جبران پیشنهادی در شکل (۸) ارائه شده است. به منظور ایجاد یک محیط واقعی، MMC-DSTATCOM در

یک شبکه استاندارد IEEE ۱۳ شینه قرار خواهد گرفت. در این سناریو، علاوه بر نامتعادل بودن ولتاژ منبع، تمامی بارهای شبکه IEEE نامتعادل هستند و ضریب قدرت شبکه پایین است. بنابراین، توانایی MMC-DSTATCOM در جبران ولتاژ نامتعادل شین PCC و نیز جبران توان راکتیو آن در هنگام تغییرات بار سلفی سنگین به بار خازنی سنگین مورد بررسی و تأیید قرار می‌گیرد. لذا، MMC-DSTATCOM بایستی قادر به جبران نامتعادلی ولتاژ ناشی از مؤلفه‌های توالی منفی و صفر شبکه و نیز جبران توان راکتیو و اصلاح ضریب قدرت شبکه باشد. بنابراین، با توجه به توانایی ترانسفورماتور توزیع و اصول جبران که در بخش قبل بررسی شد، انتظار می‌رود، علاوه بر جبران نامتعادلی ولتاژ، اصلاح ضریب قدرت نیز بهبود قابل توجهی پیدا کند. در این شرایط، مقادیر ضریب نامتعادلی ولتاژ مربوط به مؤلفه‌های توالی منفی و صفر به همراه ضریب قدرت شبکه بررسی شده و نتایج ارائه خواهد شد. بار سلفی سنگین از ابتدا در مدار بوده و ضریب قدرت شبکه پایین‌تر از حد مجاز است، سپس این بار از مدار خارج شده و بار خازنی با همان ضریب قدرت ولی پیش‌فاز وارد مدار می‌گردد. نتایج به‌دست آمده حاصل از ضریب قدرت شبکه و اختلاف فاز ولتاژ و جریان منبع تحت کلیدزنی بار سلفی و خازنی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مقادیر برخی از مهم‌ترین پارامترها و کمیت‌های مربوط به سیستم پیشنهادی در جدول (۱) ارائه شده است.

۴-۱- شبیه‌سازی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار مبتنی بر ترانسفورمر ستاره-ستاره

شکل (۹) ساختار یک شبکه توزیع نامتعادل ۵ شینه مدل شده در نرم‌افزار متلب برای بررسی تأثیر الگوریتم پیشنهادی در این کار را نشان می‌دهد. هدف از این الگوریتم، کنترل یک MMC-DSTATCOM به‌منظور جبران نامتعادلی ولتاژ و جبران توان راکتیو شبکه مطابق طرح ارائه شده در شکل (۱) است. این شبکه از سیستم ۱۳ شینه IEEE استخراج شده است که پارامترهای آن در پیوست A مرجع‌های [۱] و [۱۲] ارائه شده است. پارامترهای معادل شبکه در شین شماره ۶۷۰ در جدول (۱) مرجع‌های [۱] و [۱۲] ارائه شده است. یک MMC-DSTATCOM با کنترل‌کننده‌های آن به شین ۶۷۰ موجود در شکل (۹) متصل شده است. ضمناً لازم به ذکر است که مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM پیشنهادی هدف این مقاله نبوده و در کارهای آتی می‌تواند مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد. لذا شین ۶۷۰ به دلیل کیفیت توان پایین آن از لحاظ ضریب قدرت پایین و نامتعادلی بالا به‌عنوان شین مورد شبیه‌سازی انتخاب می‌گردد.

Table (1): Important parameters of the proposed system

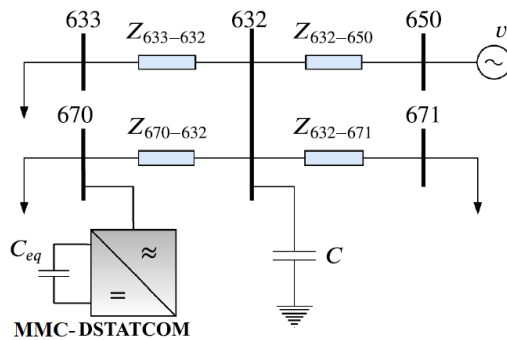
جدول (۱): مقادیر پارامترها و کمیت‌های مهم سیستم پیشنهادی

مقدار	پارامتر
۴/۱۶ ولت- ۶۰ هرتز	ولتاژ (V_n) و فرکانس (f_n) نامی شبکه
۳۰۰ کیلوولت-آمپر	توان نامی مبدل (S_n)
۱ کیلوولت-۱۵۰ میلی‌فاراد- ۱۶ کیلوولت	ولتاژ، ظرفیت لینک DC و ولتاژ هر زیر مازول (V_{dc}, C_{dc}, V_{SM})
۱۰ کیلو هرتز	فرکانس کلیدزنی PWM (f_{sw})
۱۵ میکرو ثانیه	زمان نمونه‌گیری (T_s)
۸ خازن زیر مازول- ۱ میلی‌فاراد	تعداد و ظرفیت خازن هر زیرماژول (N, C_{SM})
۲/۴۵ اهم - ۲۴/۶ میلی‌هانری	مقادیر فیلتر RL خروجی MMC (R_f, L_f)
متناسب ۰/۰۵۵	بهره‌های کنترل‌کننده‌های PI ولتاژ توالی‌های مثبت و منفی
انتگرال‌گیر ۰/۰۰۲۵	
متناسب ۱۲	بهره‌های کنترل‌کننده PI ولتاژ لینک DC
انتگرال‌گیر ۰/۱۵	
متناسب ۰/۳۵	بهره‌های کنترل‌کننده‌های PI جریان توالی مثبت و منفی
انتگرال‌گیر ۰/۰۰۲	
۱۲۰ هرتز	فرکانس قطع فیلترهای شکاف

شکل (۱۰)، شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز شین ۶۷۰ را برای زمانی نشان می‌دهد که MMC-DSTATCOM عمل نمی‌کند. استراتژی CPS-PWM الگوهای پالسی برای کلیدهای مبدل چند سطحی ماژولار نیم موج را تولید می‌کند. ولتاژ DC طوری طراحی شده است که حداقل دو برابر بزرگ‌تر از مقدار پیک ولتاژ PCC باشد. این گزینه تضمین خواهد کرد که MMC-DSTATCOM قادر به تجزیه تحلیل جریان‌های جبران باشد. کلیدهای نیمه‌هادی سه‌فاز ۴ سیمه مبدل شکل (۱) با چهار زیرماژول سری در بازوی بالا و چهار زیر ماژول در بازوی پایین هر فاز طراحی می‌گردد.

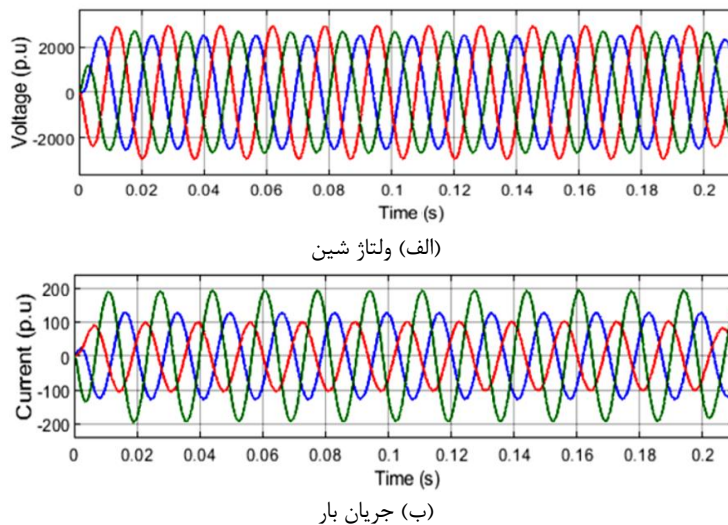
۴-۱-۱ جبران کل نامتعادلی‌های ولتاژ نقطه اتصال مشترکین

در این بخش، MMC-DSTATCOM طوری کنترل می‌شود تا کل نامتعادلی‌های ولتاژ توالی منفی و صفر نقطه اتصال مشترکین را جبران نماید. شکل موج جریان‌های سه‌فاز جبران شده توسط MMC-DSTATCOM و ولتاژهای توالی منفی و صفر در شین PCC به ترتیب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۱-الف) جریان خنثای جبران شده توسط جبران‌ساز را نشان نمی‌دهد چون این جریان مجموع جریان‌های سه‌فاز دیگر است. در لحظه ۲ ثانیه، MMC-DSTATCOM شروع به جبران نامتعادلی ولتاژهای PCC می‌نماید، لذا تمام نامتعادلی‌های توالی منفی و صفر در شین PCC جبران خواهد شد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب شکل موج‌های ولتاژهای مؤثر سه فاز شین PCC و ضرایب نامتعادلی ولتاژ توالی منفی و صفر را نشان می‌دهد.



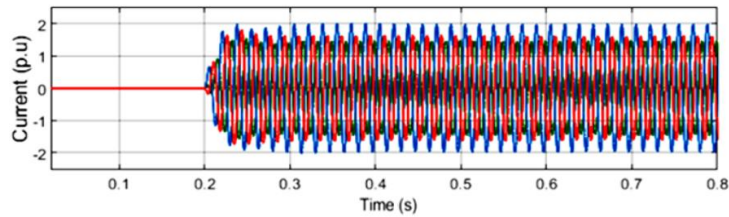
شکل (۹): دیاگرام تک خطی سیستم توزیع با جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار متصل به شین ۶۷۰

Figure (9): Single line diagram for distribution grid with MMC-DSTATCOM connected to bus 670

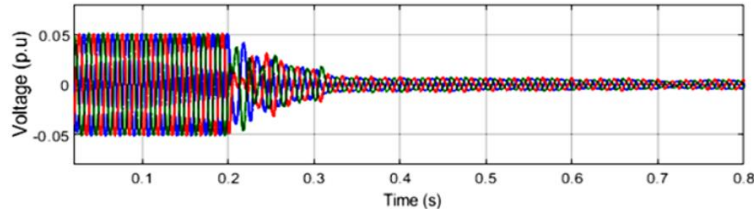


شکل (۱۰): شکل موج‌های شین ۶۷۰ بدون جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی ماژولار

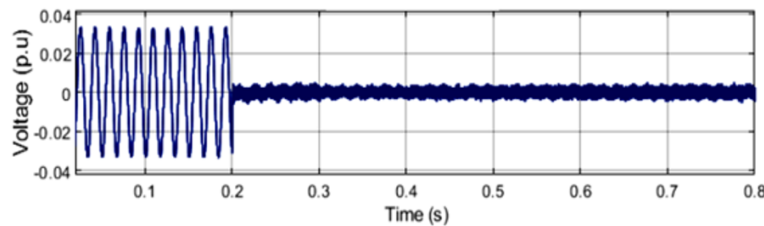
Figure (10): Output waveforms of bus 670 without MMC-DSTATCOM, a) Voltages, b) Load currents



الف) جریان‌های جبران ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار



ب) ولتاژهای توالی منفی نقطه اتصال مشترکین



ج) ولتاژ توالی صفر نقطه اتصال مشترکین

شکل (۱۱): نتایج جبران ولتاژ نامتعادل توسط جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار

Figure (17): Results of unbalanced voltage compensation by using MMC-DSTATCOM, a) Compensation currents for MMC-DSTATCOM, b) Negative sequence voltages of PCC, c) Zero sequence voltages of PCC

از آنجایی که نامتعادلی ولتاژ PCC به‌طور کامل جبران می‌گردد لذا هر دو ضریب نامتعادلی منفی و صفر به سمت صفر میل خواهند کرد، باید توجه کرد که ولتاژهای مؤثر سه‌فاز شین ۶۷۰ بعد از جبران متعادل و برابر می‌گردند. لازم به ذکر است که ضرایب نامتعادلی ولتاژ توالی منفی و صفر به ترتیب از رابطه‌های (۳۰) و (۳۱) به‌دست می‌آیند:

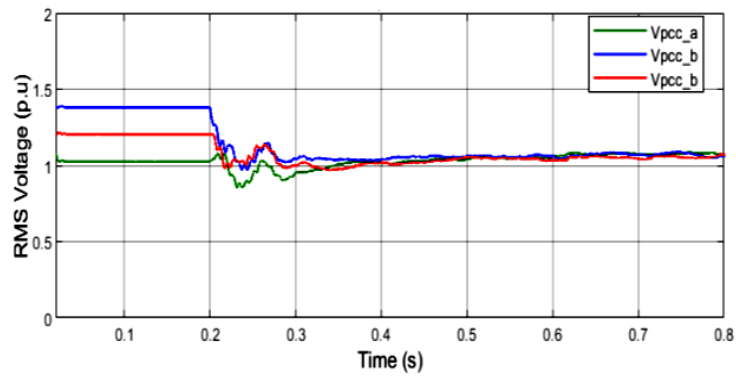
$$VUF_2 = \frac{\sqrt{(v_d^-)^2 + (v_q^-)^2}}{\sqrt{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2}} \quad (30)$$

$$VUF_0 = \frac{\sqrt{(v_d^0)^2 + (v_q^0)^2}}{\sqrt{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2}} \quad (31)$$

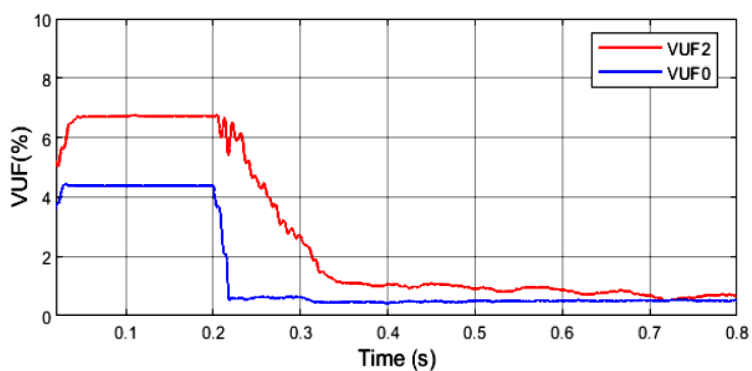
تنظیم بخشی از پارامترهای کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان توالی‌های منفی و صفر به همراه ولتاژ پیش‌خور با روش سعی و خطا انجام شده است و بخشی دیگر از آن‌ها با توجه به مرجع [۱] تنظیم شده‌اند. لذا بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI به‌عنوان طرح مطالعاتی آتی در نظر گرفته شده و در این مقاله انجام نمی‌گیرد. شکل موج‌های ولتاژ و جریان شین ۶۷۰ قبل و بعد از جبران که MMC-DSTATCOM به آن متصل شده است، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، بعد از جبران، ولتاژهای سه‌فاز کاملاً متعادل شده‌اند و دامنه جریان بار نیز کاهش یافته است.

۲-۱-۴- جبران توان راکتیو

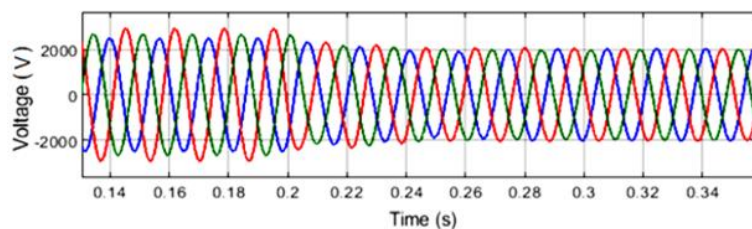
به‌منظور تأیید جبران توان راکتیو توسط MMC-DSTATCOM پیشنهادی با ترانسفورمر ستاره-ستاره، بار اهمی-سلفی با ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز در لحظه ۰/۶ ثانیه از مدار خارج و بار اهمی خازنی با ضریب قدرت ۰/۶ پیش فاز در همین لحظه وارد مدار می‌شود.



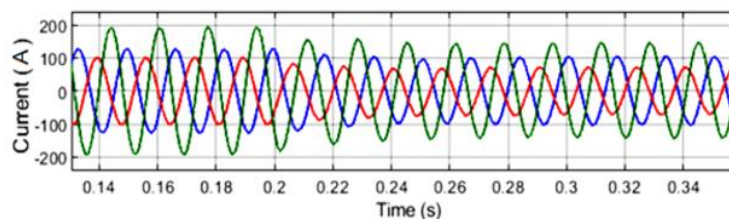
شکل (۱۲): ولتاژهای موثر سه فاز نقطه اتصال مشترکین قبل و بعد از جبران
Figure (12): RMS three phase voltages of PCC with and without compensation



شکل (۱۳): ضرایب نامتعادلی ولتاژ توالی منفی و صفر قبل و بعد از جبران
Figure (13): Zero and Negative sequence voltage unbalanced factor with and without compensation



(الف) ولتاژ شین



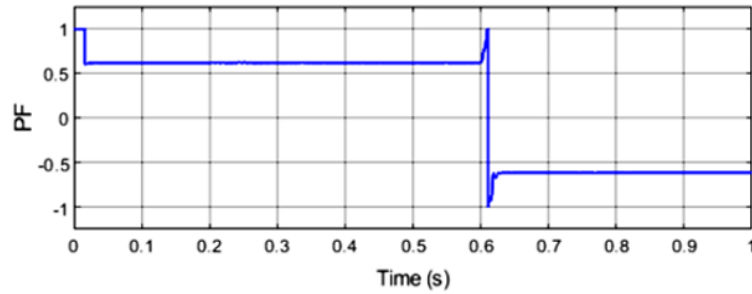
(ب) جریان شین

شکل (۱۴): شکل موج‌های شین ۶۷۰ قبل و بعد از جبران مربوط به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی مازولار

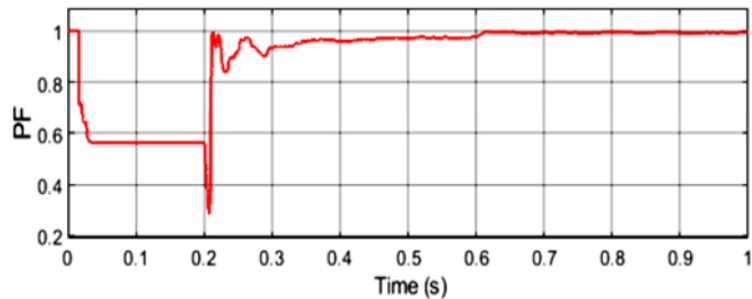
Figure (14): Waveforms of bus 670 before and after compensation by MMC-DSTATCOM, a) Bus voltages, b) Bus currents

شکل (۱۵) ضریب قدرت شین بار و منبع قبل و بعد از جبران را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قبل از حضور DSTATCOM متصل به ترانسفورمر، ضریب قدرت منبع ۰/۵۸ است. بعد از ورود DSTATCOM و در حضور بار سلفی ضریب قدرت منبع به مقدار مطلوب ۰/۹۷ پس فاز ارتقاء می‌یابد. در لحظه ورود بار خازنی و خروج بار سلفی در لحظه ۰/۶ ثانیه، ضریب قدرت منبع به مقدار ۰/۹۹ پس فاز بهبود می‌یابد. دلیل این امر تزریق توان راکتیو اضافی توسط بار خازنی است. تغییرات

دینامیکی جریان فاز a منبع در لحظه ورود DSTATCOM در شکل (۱۶) نشان داده شده که در حضور ترانسفورماتور ستاره-ستاره به دست آمده است. با حضور DSTATCOM علاوه بر افزایش دامنه جریان منبع، ولتاژ و جریان منبع تقریباً هم‌فاز می‌گردند. در نهایت، ولتاژ لینک DC مبدل MMC-DSTATCOM در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده ولتاژ DC، سطح ولتاژ لینک DC را در مقدار مرجع ۱۶ کیلوولت ثابت نگاه داشته است.



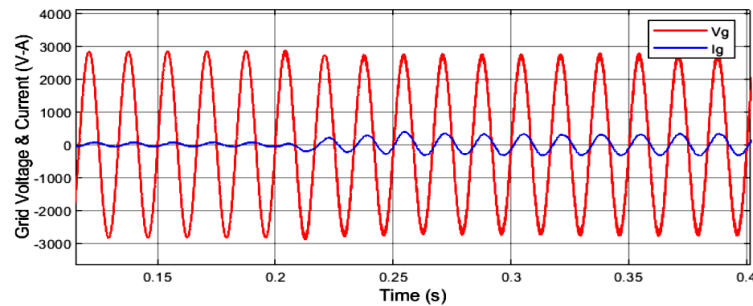
(الف) ضریب قدرت شین بار



(ب) ضریب قدرت منبع

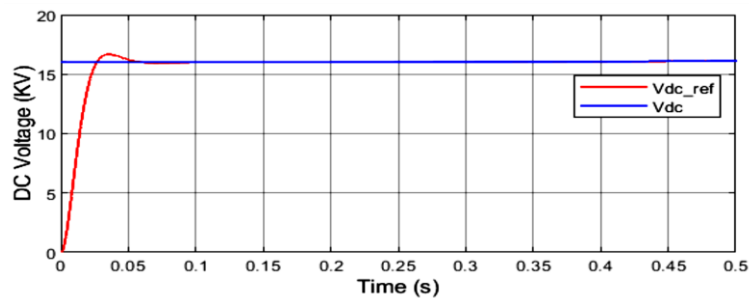
شکل (۱۵): جبران توان راکتیو توسط مبدل‌های چندسطحی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع

Figure (15): Reactive power compensation by MMC-DSTATCOM, a) Power factor of load bus, b) Power factor of source



شکل (۱۶): شکل موج‌های ولتاژ و جریان فاز a منبع در لحظه ورود جبران‌ساز سنکرون استاتیکی توزیع با حضور ترانسفورماتور ستاره-ستاره

Figure (16): Voltage and current of Phase A for source when DSTATCOM integrated to Yy transformer is connected



شکل (۱۷): ولتاژ لینک جریان مستقیم مبدل

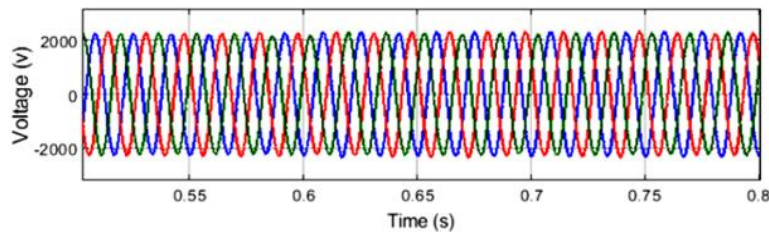
Figure (23): DC-Link voltage of converter

۳-۱-۴- عملکرد دینامیکی سیستم

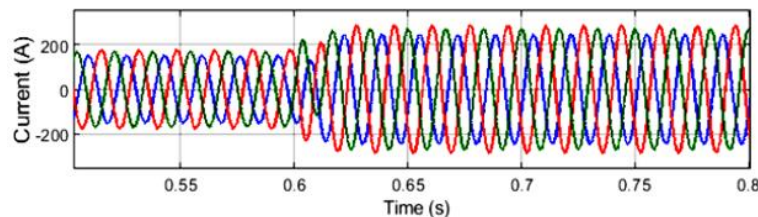
به منظور تأیید توانمندی سیستم جبران پیشنهادی، در لحظه $0/6$ ثانیه، بار اکتیو شین 670 از 300 کیلووات به 600 کیلووات تحت بار سلفی 400 کیلووات ثابت تغییر می‌نماید. شکل (۱۸) شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه فاز شین 670 را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، طی تغییر پله‌ای بار اکتیو، دامنه جریان‌های نامتعادل شین 670 از 180 آمپر به 235 آمپر افزایش می‌یابد. تحت چنین شرایطی ولتاژ بار همچنان متعادل باقی می‌ماند و دامنه آن نیز ثابت است. با توجه به شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، طی حالت دینامیکی ناشی از تغییر بار اکتیو، ضریب قدرت منبع از $0/97$ پس‌فاز به $0/99$ پس‌فاز افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش بار اهمی تحت بار سلفی ثابت است که منجر به افزایش جزئی ضریب قدرت خواهد شد.

۴-۱-۴- نتایج مقایسه‌ای

در جدول (۲)، نتایج مقایسه‌ای عملکرد DSTATCOM پیشنهادی برای جبران ولتاژ نامتعادل و توان راکتیو در حضور ترانسفورماتور ستاره-ستاره و بدون آن ارائه شده که در آن میزان بهبود جبران ولتاژهای توالی منفی و صفر و ضریب قدرت با به‌کارگیری ترانسفورماتور ستاره-ستاره نسبت به حالتی که از آن استفاده نمی‌شود، قابل ملاحظه است. در جدول (۳)، عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر جبران نامتعادلی ولتاژ و جبران توان راکتیو به‌طور مقایسه‌ای با روش‌های پیشنهادی در مرجع‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج این جدول بیانگر این نکته است که در هیچ‌کدام از مرجع‌ها جبران ترکیبی و هم‌زمان نامتعادلی ولتاژ و توان راکتیو انجام نشده است. همچنین، می‌توان متوجه شد که از نظر جبران عدم تعادل ولتاژ توالی منفی، روش پیشنهادی نسبت به مرجع [۱] بهتر عمل کرده است. از نظر جبران ولتاژ توالی صفر، مرجع [۱] برتر بوده است. به لحاظ جبران بار سلفی و خازنی، روش پیشنهادی با روش مرجع [۱۲] مطابقت داشته و نسبت به مرجع‌های دیگر بهتر عمل کرده‌اند.



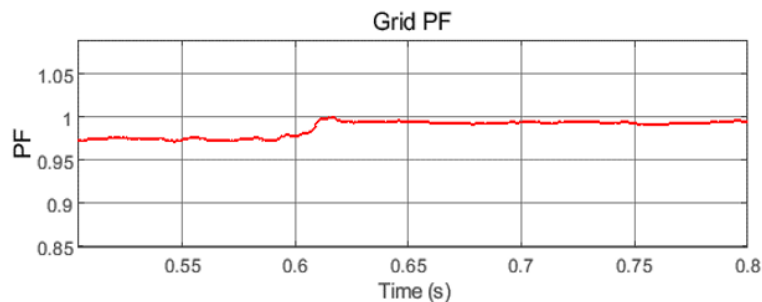
(الف) ولتاژ شین



(ب) جریان شین

شکل (۱۸): کمیت‌های ولتاژ و جریان شین 670 طی تغییر دینامیکی بار اکتیو

Figure (18): Waveforms of bus 670 during dynamic change in active load a) Bus voltages, b) Bus currents



شکل (۱۹): ضریب قدرت شین 670 طی تغییر پله‌ای بار اکتیو

Figure (19): Power factor of bus 670 during step change in active load

Table (2): Comparative results of proposed system operation with and without Yy transformer
جدول (۲): نتایج مقایسه‌ای عملکرد سیستم پیشنهادی با ترانسفورماتور ستاره-ستاره و بدون آن

با ترانسفورماتور ستاره-ستاره			بدون ترانسفورماتور ستاره-ستاره			وضعیت
ضرریت قدرت منبع	درصد ولتاژ توالی صفر	درصد ولتاژ توالی منفی	ضرریت قدرت منبع	درصد ولتاژ توالی صفر	درصد ولتاژ توالی منفی	
۰/۵۶	۷/۵	۹/۵	۰/۷۸	۴/۵	۶/۸	قبل از جبران
۱	۰/۸	۰/۹	۰/۹۶	۰/۵	۰/۸	بعد از جبران

Table (3): Comparison of operation the proposed method with some similar references

جدول (۳): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با برخی مراجع مشابه

جبران توان راکتیو		جبران نامتعادلی ولتاژ		مرجع
بار خازنی	بار سلفی	درصد ولتاژ توالی صفر	درصد ولتاژ توالی منفی	
جبران نشده	جبران نشده	۰/۵	۱	[۱]
۱	۰/۹۶	جبران نشده	جبران نشده	[۱۲]
۰/۹۶	۰/۹	جبران نشده	جبران نشده	[۱۹]
۰/۹۷	۰/۹۵	جبران نشده	جبران نشده	[۲۱]
۱	۰/۹۶	۰/۸	۰/۹	روش پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور جبران هم‌زمان مؤلفه‌های توالی منفی و صفر ولتاژ شبکه و نیز جبران توان راکتیو شین PCC، یک DSTATCOM چهارسیمه مبتنی بر مبدل چند سطحی مازولار ادغام شده با ترانسفورماتور توزیع ستاره-ستاره پیشنهاد گردید. در این طرح با حضور ترانسفورماتور توزیع ستاره-ستاره ظرفیت کلیده‌های مبدل چند سطحی مازولار به لحاظ ولتاژ قابل تحمل به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. ابتدا ولتاژهای شبکه توسط الگوریتم انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه دوم به مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر در چارچوب مرجع چرخان dq تجزیه گردید. سپس، به منظور جبران توان راکتیو، جریان مؤلفه عمودی توالی مثبت برای جبران توان راکتیو و تنظیم ولتاژ PCC توسط کنترل‌کننده PI به کار رفت. همچنین برای کنترل ولتاژ لینک dc، از جریان مرجع مؤلفه مستقیم مبدل با کنترل‌کننده PI استفاده شد. برای حذف کامل مؤلفه‌های توالی منفی، ولتاژهای توالی منفی اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع آن که صفر است، مقایسه شد و از یک کنترل‌کننده PI به منظور تولید جریان‌های مرجع توالی منفی عبور داده شد. بازوی چهارم مبدل پیشنهادی برای حذف جریان‌های توالی صفر طراحی گردید. همچنین، استخراج جریان‌های PCC از طریق فیلترهای شکاف صورت گرفت. از طریق مدولاسیون شیفت فاز متوالی مبدل چند سطحی مازولار که در حالت نیم موج طراحی گردیده است، عمل کلیدزنی این مبدل‌ها با به‌کارگیری ولتاژهای مرجع تولید شده انجام گردید. مبدل پیشنهادی قادر است با کمک ترانسفورماتور توزیع ستاره-ستاره با چندین تپ علاوه بر جبران نامتعادلی ولتاژ شبکه، جبران کامل توان راکتیو را نیز در شرایط بار سلفی و خازنی سنگین انجام دهد. نتایج شبیه‌سازی، توانمندی روش جبران هم‌زمان توان راکتیو و نامتعادلی ولتاژ PCC پیشنهادی را تأیید نمود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از مطالعه تحقیقاتی در آموزش و پرورش ناحیه یک استان زنجان است. نویسنده بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] S.N. Duarte, B.C. Souza, P.M. Almeida, L.R. Araujo, P.G. Barbosa, "Control algorithm for DSTATCOM to compensate consumer-generated negative and zero sequence voltage unbalance", International Journal of

- Electrical Power and Energy Systems, vol. 120, Article Number: 105957, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105957).
- [2] M. Abasi, S.G. Seifossadat, M. Razaz, S.S. Moosapour, "Determining the contribution of different effective factors to individual voltage unbalance emission in n-bus radial power systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 94 pp. 393-404, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.08.006).
- [3] T.A.P. Beneteli, L.P. Cota, T.A.M. Euzébio, "Limiting current and voltage unbalances in distribution systems: A metaheuristic-based decision support system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 135, Article Number: 107538, Feb. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107538).
- [4] L.F.L. Araújo, A.L.F. Filho, M.V.B. Mendonça, "Comparative evaluation of methods for attributing responsibilities due to voltage unbalance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31 pp. 743-752, Oct. 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2015.2493445).
- [5] A. Elnady, A.A. Adam, M. Alshabi, "Newly developed narrow-band filters for stabilizing load voltage and compensating for voltage unbalance with harmonics in islanded Microgrid", *Computers and Electrical Engineering*, vol. 100, Article Number: 107849, May 2022 (doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.107849).
- [6] Y. Sun, L. Peixin, L. Shurong, L. Zhang, "Contribution determination for multiple unbalanced sources at the point of common coupling", *Energies*, vol. 10, Article Number: 171, Feb. 2017 (doi: 10.3390/en10020171).
- [7] Y. Yang, X.M.Y. Wang, "Determining the responsibility of three-phase unbalanced sources based on RICA", *Energies*, vol. 12, Article Number: 2849, July 2019 (doi: 10.3390/en12152849).
- [8] Q. Liu, L. Yong, H. Sijia, L. Longfu, "A controllable inductive power filtering system: modeling, analysis and control design", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105 pp.717-728, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.09.016).
- [9] D. Fonseca, J. M. Lobo, F. K. A. Lima, F. L. Tofoli, C. G. C. Branco, "Three-phase phase-locked loop algorithms for the detection of positive-sequence and negative-sequence components", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 126, Article Number: 106570, Mar 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106570).
- [10] Y. Chen, W. Minghao, L. Ertao, Y. Xianggen, L. Jinmu, W. Zhen, "Passivity-based control of cascaded multilevel converter based D-STATCOM integrated with distribution transformer", *Electric Power Systems Research*, vol. 154 pp. 1-12, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.001).
- [11] S. Hu, L. Yong, X. Bin, C. Mingfei, Z. Zhiwen, L. Longfu, C. Yijia, K. Andreas, R. Christian, "A YD multifunction balance transformer-based power quality control system for single-phase power supply system", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 52 pp. 1270-1279, Nov. 2015 (doi: 10.1109/TIA.2015.2503389).
- [12] Z. Wang, Y. Xianggen, C. Yu, L. Jinmu, L. Langzi, Q. Zhenyu, "DSTATCOM integrated with Yy connection transformer for reactive power compensation", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 117, Article Number: 105721, May 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105721).
- [13] Y. Xu, Z. Yi, Q. Liang, L. Kaipei, F. Blaabjerg, "Quantitative criteria of considering AC infeed in DC fault assesent of modular multilevel converters", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, Article Number: 107874, Oct. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107874).
- [14] S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad, L.A. Dessaint, "A combination of shunt hybrid power filter and thyristor-controlled reactor for power quality", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61 pp. 2152-2164, July 2013 (doi: 10.1109/TIE.2013.2272271).
- [15] Z. Chen, C. Yandong, J.M. Guerrero, H. Kuang, Y. Huang, L. Zhou, A. Luo, "Generalized coupling resonance modeling, analysis, and active damping of multi-parallel inverters in microgrid operating in grid-connected mode", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4 pp. 63-75, Jan. 2016 (doi: 10.1007/s40565-016-0184-9).
- [16] Q. Liu, L. Yong, H. Sijia, L. Longfu, "Power quality improvement using controllable inductive power filtering method for industrial DC supply system", *Control Engineering Practice*, vol. 83 pp. 1-10, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.024).
- [17] Q. Liu, L. Yong, L. Longfu, P. Yanjian, C. Yijia, "Power quality management of PV power plant with transformer integrated filtering method", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 34 pp. 941-949, Nov. 2018 (doi: 10.1109/TPWRD.2018.2881991).
- [18] Q. Liu, L. Yong, H. Sijia, L. Longfu, "A controllable inductive power filtering system: modeling, analysis and control design", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105 pp. 717-728, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.09.016).
- [19] E. Lei, Y. Xianggen, C. Yu, L. Jinmu, "A cascaded D-STATCOM integrated with a distribution transformer for medium-voltage reactive power compensation", *Journal of Power Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 522-532, March 2017 (doi: 10.6113/JPE.2017.17.2.522).
- [20] S. Hu, L. Yong, X. Bin, C. Mingfei, Z. Zhiwen, L. Longfu, C. Yijia, K. Andreas, R. Christian, "A YD multifunction balance transformer-based power quality control system for single-phase power supply

system", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 52 pp. 1270-1279, Nov. 2015 (doi: 10.1109/TIA.2015.2503389).

- [21] E. Lei, Y. Xianggen, Z. Zhe, C. Yu, "An improved transformer winding tap injection DSTATCOM topology for medium-voltage reactive power compensation", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 33, pp 2113-2126, April 2015 (doi: 10.1109/TPEL.2017.2698207).

زیر نویس‌ها

1. Distribution static synchronous compensator
2. Modular multilevel converter
3. Voltage unbalanced factor
4. Point of common coupling
5. Iterative local search
6. Controllable inductive power filter
7. Second-order generalized integrator
8. Sub-module
9. Half-bridge converter
10. Notch filter
11. Cascade phase shifting modulation

ضمیمه

معرفی تعدادی از پارامترها به کار رفته در رابطه‌ها

فرمول	پارامتر
I_q, I_d	جریان مولفه عمودی و مستقیم اندازه گیری شده
V_d^+	ولتاژ توالی مثبت مولفه مستقیم اندازه گیری شده
V_{d-ref}^+	ولتاژ توالی مثبت مولفه مستقیم مرجع
$V_{pcc-\alpha}$	ولتاژ نقطه اتصال مشترکین مولفه آلفا
$V_{pcc-\beta}$	ولتاژ نقطه اتصال مشترکین مولفه بتا
V_{pcc-0}	ولتاژ نقطه اتصال مشترکین مولفه صفر
$V_{pcc-\beta}, qV_{pcc-\beta}$	ولتاژ نقطه اتصال مشترکین مستقیم و عمودی مولفه بتا
$V_{pcc-\alpha}, qV_{pcc-\alpha}$	ولتاژ نقطه اتصال مشترکین مستقیم و عمودی مولفه آلفا
$I_{a0}, I_{\beta 0}$	جریان‌های توالی صفر ساختگی آلفا و بتا
$V_{pcc-d2}, V_{pcc,q2}$	ولتاژ توالی منفی محور مستقیم و عمودی شین اتصال مشترکین
I_{q2}, I_{d2}	جریان توالی منفی محور عمودی و مستقیم
K_{v2}, K_{v0}	بهره کنترل ولتاژ توالی منفی و صفر حلقه بسته
I_{q1}^*, I_{d1}^*	جریان مرجع مولفه عمودی و مستقیم توالی مثبت
K_{vdc}	کنترل کننده حلقه بسته ولتاژ لینک DC
I_{La}, I_{SA}, I_{TA}	جریان بار، منبع و تزریقی سمت ترانسفورمر
I_{Lap}, I_{Laq}	مؤلفه توان‌های اکتیو و راکتیو جریان بار
I_1, I_2	جریان سیم پیچی سری و مشترک
Z_s, Z_L	امپدانس سیستم و امپدانس معادل بار