

اندازه‌گیری گروهی ولتاژ خازن‌ها و پایش برخط ظرفیت برای مبدل چند سطحی ماژولار

مهسا ذورقی جدی^۱ سید مسعود برکاتی^۲ وحید براهویی^۳ محسن رحمانی هره دشت^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
zoraghi.mahsa@pgs.usb.ac.ir

۲- دانشیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
sambaraka@ece.usb.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
v_barahouei@pgs.usb.ac.ir

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
mohsen.rahmani@pgs.usb.ac.ir

چکیده: مبدل چند سطحی ماژولار (MMC) یک انتخاب رایج برای کاربردهای توان بالا به دلیل ساختار قابل توسعه است. با این حال استفاده از تعداد زیادی خازن در ساختار MMC باعث چالش فنی اولیه در کاهش قابلیت اطمینان آن شده است. در کاربردهای الکترونیک قدرت خازن‌ها یکی از اجزا با بیشترین احتمال خرابی هستند. همچنین، برای کنترل تعادل ولتاژ خازن‌ها در ساختار MMC، نیاز به تعداد زیادی حسگر ولتاژ است که باعث افزایش هزینه مبدل شده است. علاوه بر این، استفاده از تعداد حسگرهای ولتاژ زیاد باعث افزایش حجم اطلاعات رد و بدل شده بین سیستم قدرت و پردازنده مرکزی می‌شود که باعث محدودیت در سرعت پردازنده شده است. بنابراین نظارت بر سلامت ظرفیت (CHM) خازن‌ها با کاهش تعداد حسگرهای ولتاژ ضروری است. این مقاله یک روش نظارت بر ظرفیت با تعداد حسگرهای کاهش یافته را ارائه می‌دهد. در روش پیشنهادی برای هر دو زیرماژول نیم پل از یک حسگر ولتاژ استفاده شده است و ولتاژ خازن‌ها با بهره‌گیری از یک روش تخمین ولتاژ خازن با حجم محاسبات کم بدست می‌آید. علاوه بر این با استفاده از نسبت افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده به اندازه گیری شده در طول جریان مثبت بازو، یک روش نظارت بر ظرفیت ساده ارائه شده است. نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی کارایی روش پایش ظرفیت و کاهش حسگر پیشنهادی را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مبدل چند سطحی ماژولار (MMC)، پایش ظرفیت، حسگر ولتاژ، قابلیت اطمینان

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.171

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مسعود برکاتی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سیستان و بلوچستان - زاهدان - دانشگاه سیستان و بلوچستان - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

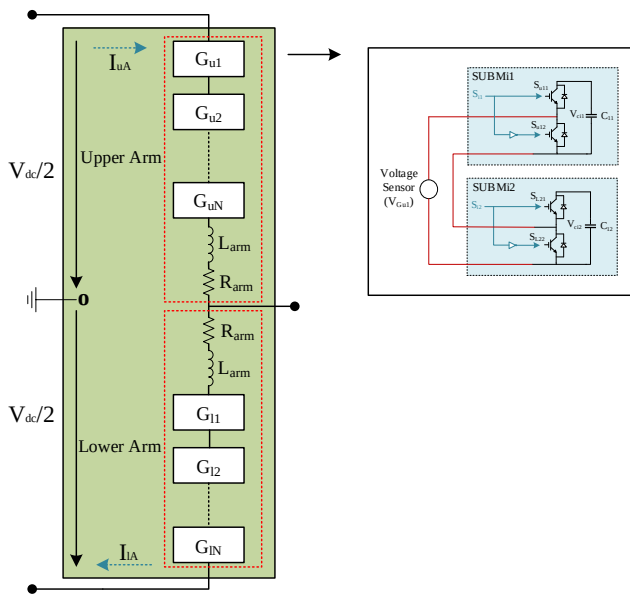
ویژگی‌های منحصر بفردی همچون ساختار مازولار و مقیاس پذیری، عدم نیاز به منابع DC متعدد، THD پایین و شکل موج خروجی با کیفیت، مبدل چندسطحی مازولار را به یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربردهای صنعتی توان بالا تبدیل کرده است [۱]، [۲]. با این حال، با افزایش تعداد سطوح خروجی در کاربردهای توان بالا نیاز به تعداد زیرماژول‌ها (SUBM) افزایش می‌یابد که احتمال خرابی در SUBM‌ها و هزینه‌های ساخت MMC را افزایش می‌دهد [۳]، [۴]. خازن‌ها یکی از اجزای کلیدی در SUBM‌ها هستند که به دلایلی همچون اثر پیری، فرآیندهای شیمیایی، تبخیر الکترولیت‌ها، تنش ولتاژی و جریانی، حرارت، قطع اتصالات و رطوبت باعث کاهش ظرفیت از مقدار نامی می‌گردد [۵]، [۶]. در مطالعات صورت گرفته درباره قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت خازن‌ها با بیش از ۳۰ درصد احتمال خرابی یکی از اجزا با بیشترین احتمال شکست محسوب می‌شوند [۷]–[۹]. در صورت کاهش بیش از حد ظرفیت خازن‌ها از مقدار نامی، خازن معیوب باید با خازن سالم جایگزین شود و در غیر این صورت کاهش ظرفیت از مقادیر مجاز باعث کاهش راندمان MMC، ناپایداری مبدل و حتی انفجار خواهد شد [۸]. بنابراین جهت افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم MMC و اعلام هشدار پیشگیرانه قبل از وقوع خرابی نظارت بر سلامت ظرفیت (CHM) خازن‌ها ضروری است [۱۰]، [۱۱].

چالش اصلی در فرایند CHM تخمین دقیق مقدار ظرفیت خازن است، که تاکنون چندین مطالعه به بررسی CHM در MMC پرداخته‌اند. در [۱۲]، یک روش CHM غیر برخط برای تحقق نظارت بر ظرفیت پیشنهاد شده است که از ویژگی راه اندازی MMC بعنوان مدار شارژ RC استفاده می‌کند. با این حال، این روش پس از مرحله راه اندازی هیچ نظارتی بر ظرفیت ندارد و در صورتی که خازنی در حین کار MMC دچار خرابی شود سیستم را با اختلالاتی مواجه می‌کند. در [۱۳] و [۱۴]، روشی برای نظارت بر ظرفیت با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی و تزریق جریان با هارمونیک دوم به جریان گردشی ارائه شده است. با وجود تحقق نظارت بر خط، تلاش کنترلی برای برقراری پایداری سیستم افزایش می‌یابد و تزریق هارمونیک دوم به جریان گردشی باعث افزایش تلفات توان و تنش ولتاژی در SUBM‌ها می‌شود. یک روش CHM در [۱۵] با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن (KMA) پیشنهاد شده است که از ریبیل ولتاژ خازن و جریان عبوری از زیرماژول‌ها برای دستیابی به ظرفیت خازن‌ها استفاده می‌کند. روش پیشنهادی وابستگی شدیدی به دقت حسگرهای ولتاژی دارد و استفاده از KMA در کاربردهای عملی چالش برانگیز است. در [۱۶]، یک روش نظارت بر خازن مبتنی بر الگوریتم مرتب سازی ارائه شده است که علاوه بر ظرفیت، مقاومت معادل سری (ESR) را نیز در نظر گرفته است. در روش پیشنهادی خازن SUBM‌ها بر اساس رابطه

بین ESR و ظرفیت بصورت غیر مستقیم مرتب می‌شوند و فرایند نظارت تنها برای خازن با بیشترین ESR و کمترین ظرفیت انجام می‌شود. اگر چه بار محاسباتی کاهش می‌یابد ولی فرایند مرتب سازی بر اساس ESR و ظرفیت برای MMC‌های ولتاژ بالا نامطلوب است. مفهوم CHM براساس زیرماژول مرجع (RSUBM) اولین بار در [۱۷] ارائه شد و سپس بطور مشابه نویسندگان در [۱۸] با ارائه راه حل‌های باعث بهبود روش پیشنهادی شدند. روش‌های ارائه شده در [۱۷] و [۱۸] گام مثبتی در کاهش حجم محاسبات و حذف عملیات انتگرال در روش‌های CHM بودند. با این حال، شناسایی RSUBM باید از قبل با استفاده از روش CHM مجزای صورت پذیرد و همچنین RSUBM در هر بازو در عملکرد مبدل نقشی ندارد که باعث هزینه اضافی می‌شود. از سویی دیگر در روش ارائه شده در [۱۸]، دو SUBM در طول فرایند کنار گذر می‌شوند که باعث ناپایداری سیستم MMC خواهد شد. در [۱۹]، یک روش CHM سلسه مراتبی پیشنهاد شده است که CHM را در دو مرحله انجام می‌دهد. با این وجود روش پیشنهادی وابستگی شدیدی به زمان کلید زنی SUBM‌ها دارد که پیاده سازی آن در کاربردهای عملی را دشوار می‌کند. اگرچه مراجع ذکر شده در بالا تدابیر خوبی برای ارائه راهکارهای جهت CHM در MMC ارائه کرده‌اند. با این وجود با اشکالاتی مانند موارد زیر رو به رو هستند:

- در اکثر روش‌ها از الگوریتم‌های با حجم محاسباتی بالایی استفاده شده است که پیاده سازی این روش را در کاربردهای توان بالای MMC با چالش رو به رو می‌کند.
- روش‌های اشاره شده نیاز به استفاده از تعداد حسگرهای ولتاژ زیاد دارد، که این باعث افزایش هزینه می‌شود.
- در اکثر روش‌های ارائه شده نیاز به استفاده از حسگرهای با دقت بالا می‌باشد.

کنترل تعادل ولتاژ خازن در مبدل‌های چند سطحی یکی دیگر از چالش‌های اصلی بشمار می‌رود [۲۰]، [۲۱]. با وجود اینکه مطالعات زیادی بر کاهش تعداد حسگرهای ولتاژ و جریان در MMC وجود دارد؛ اما تعداد کمی از مطالعات بر کاهش تعداد حسگرهای ولتاژ به همراه پایش ظرفیت خازن‌ها پرداخته‌اند. در [۲۲]، [۲۳]، مرتب سازی ولتاژ خازن‌ها بدون حسگرهای جریان بازو پیشنهاد شده است؛ اما وجود حسگرهای جریان بازو برای کنترل جریان گردشی و تشخیص خطاهای مدار باز در سوییچ‌ها الزامی است. در [۲۴]، یک روش جدید اندازه‌گیری ولتاژ خازن‌ها با حداقل دو حسگر ولتاژ در هر بازو ارائه شده است؛ که تعداد حسگرهای ولتاژ در بازوها بطور چشمگیری کاهش می‌یابد. با این وجود در روش پیشنهادی از الگوریتم فعال سازی اجباری برای بروزرسانی تخمین ولتاژ خازن‌ها استفاده شده است که پایداری سیستم MMC را به خطر می‌اندازد. در [۲۵] و [۲۶] به ترتیب از الگوریتم‌های فیلتر کالمن و حداقل مربعات بازگشتی وزنه دار (ERLS) برای تخمین ولتاژ خازن‌ها با استفاده از تنها یک حسگر



شکل (۱): پیکربندی پیشنهادی MMC

دهنده تلفات توان در بازو است، تشکیل شده است. هر گروه از دو SUBM ($z=1,2$) و یک حسگر ولتاژ تشکیل شده است. هر گروه از دو SUBM ($z=1,2$) و یک حسگر ولتاژ تشکیل شده است. حسگر ولتاژ هر گروه وظیفه نظارت بر ولتاژ خروجی هر گروه را برعهده دارند. همچنین وضعیت فرمان‌های کلیدزنی (S_{iz}) وضعیت فعال یا غیرفعال بودن سویچ‌های گروه را تعیین می‌کند. بر اساس پیکربندی پیشنهادی برای هر دو SUBM تنها از یک حسگر ولتاژ استفاده شده است که در مقایسه با MMC معمولی تعداد حسگرها به نصف کاهش پیدا می‌کند.

۳- روش پیشنهادی تخمین ولتاژ خازن‌ها

حفظ تعادل ولتاژ خازن‌ها یک مسئله حیاتی برای عملکرد صحیح مبدل MMC است. به دلیل کاهش تعداد حسگرها در پیکربندی پیشنهادی نیاز است؛ تا یک روش تخمین ولتاژ جهت دستیابی به اطلاعات لحظه‌ای از ولتاژ خازن‌ها ارائه شود. برای این منظور، یک روش تخمین دو مرحله‌ای ارائه شده است که در ادامه به توصیف آن پرداخته شده است:

۳-۱- تخمین ولتاژ خازن‌ها

مرحله (۱) اندازه‌گیری ولتاژ خازن‌ها به صورت مستقیم: با توجه به شکل (۱) برای هر گروه از یک حسگر ولتاژ ($V_{Gu,i}(i)$) استفاده شده است. با توجه به وضعیت کلیدزنی هر زیرماژول در هر گروه حالت‌های خاصی وجود دارد؛ که ولتاژ خازن‌های گروه به طور مستقیم توسط حسگر ولتاژ گروه اندازه‌گیری می‌شود. این حالت‌های خاص به شرح زیر است:

ولتاژ در هر بازو استفاده شده است. الگوریتم‌های پیشنهادی بسیار پیچیده هستند و در کاربردهای واقعی MMC، استفاده از تنها یک حسگر ولتاژ در بازو باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. با حذف تمامی حسگرهای ولتاژ باز در [۲۷] و [۲۸] روشی برای تخمین ولتاژ خازن‌ها با استفاده از الگوریتم نورن خطی تطبیقی و فیلتر کالمن ارائه شده است. با وجود اینکه تعداد حسگرها در این روش بشدت کاهش یافته‌اند؛ اما نیاز به اندازه‌گیری ولتاژ سلف بازو می‌باشد. بنابراین، حجم محاسبات بطور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و پیاده‌سازی را در کاربردهای توان بالا غیرممکن می‌کند. یک روش تخمین گروهی ولتاژ خازن‌ها در [۲۹] ارائه شده است که علاوه بر کاهش حسگرها بر تشخیص خطای سویچ‌ها و نظارت بر ظرفیت تمرکز دارد. با این وجود، روش ارائه شده برای تشخیص خطای مدار باز مبتنی بر ازمون و خطا است که زمان تشخیص خطای مدار باز را طولانی می‌کند. در [۳۰]، روش ساده‌ای برای تخمین ولتاژ خازن‌ها با استفاده از معادلات ولتاژ کیرشهف و تنها یک حسگر ولتاژ در بازو ارائه شده است. با وجود کاهش حجم محاسبات، دقت روش تخمین ارائه شده در MMC‌های با تعداد SUBM‌های زیاد، کاهش می‌یابد. در [۳۱]، روشی برای بهبود عملکرد روش [۳۰] ارائه شده است؛ اما بروزرسانی ولتاژ خازن‌ها وابسته به الگوریتم فعال سازی اجباری است که پایداری MMC را چالش برانگیز می‌کند.

هدف از مقاله حاضر ارائه روشی برای CHM در MMC به همراه کاهش تعداد حسگرهای ولتاژ است. در روش پیشنهادی برای هر دو زیر ماژول تنها از یک حسگر ولتاژ استفاده شده است. همچنین ولتاژ خازن‌ها در دو مرحله با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ خازن‌ها و معادله ولتاژ خازن صورت می‌پذیرد؛ که حجم محاسبات تخمین در مقایسه با سایر روش‌ها کاهش می‌دهد. به این ترتیب، نیاز به حسگرهای ولتاژ بالا از بین می‌رود و تعداد حسگرهای ولتاژ به نصف کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، یک روش پایش ظرفیت خازن ارائه شده است؛ که با ارائه یک شاخص سلامت بطور مداوم بر CHM خازن‌ها نظارت می‌کند. جهت کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت روش CHM پیشنهادی تنها در سیکل مثبت جریان بازو اجرا می‌شود. ادامه مطالب مقاله بشرح زیر است: ساختار پیشنهادی در این مقاله و عملکرد عادی MMC در بخش ۲، آورده شده است. در بخش‌های ۳ و ۴ به ترتیب روش‌های پیشنهادی تخمین ولتاژ خازن‌ها و CHM ارائه شده است. اعتبار سنجی روش پیشنهادی تحت سناریوهای مختلف شبیه سازی و تجربی در بخش ۵ و ۶ آورده شده است و در نهایت بخش ۷ این مقاله را به پایان می‌رساند.

۲- پیکربندی پیشنهادی مبدل MMC

پیکربندی پیشنهادی برای حسگرهای ولتاژ در شکل (۱) نشان داده شده است. در روش پیشنهادی هر بازو از تعداد ($N/2$) ($i = 1, 2, \dots, N/2$) گروه زیرماژول، سلف بازو (L_{arm}) و یک مقاومت (R_{arm}) که نشان

۳-۲- خطای تخمین ولتاژ خازن‌ها

با توجه به روابط استفاده شده در روش تخمین پیشنهادی، سیگنال‌های کلیدزنی، حسگر جریان بازو و تغییر ظرفیت خازن‌ها باعث خطا در تخمین ولتاژ خازن‌ها می‌شوند. معمولاً خطا در ارسال سیگنال‌های کلیدزنی و یا زمان‌های مرده در ارسال سیگنال‌های کلیدزنی باعث خطا در روش تخمین پیشنهادی می‌شوند. با این وجود، به دلیل ناچیز بودن مقدار این نوع خطا و تصادفی بودن، تأثیر این نوع خطا در روش پیشنهادی در نظر گرفته نشده است. نویزهای اندازه‌گیری در حسگر-های جریان باعث ایجاد خطاهای در تخمین ولتاژ خازن می‌شود و تعادل ولتاژ خازن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این وجود، خطاهای تخمین به صورت دوره‌ای در مرحله (۱) روش تخمین پیشنهادی توسط حسگر ولتاژ گروه حذف می‌شوند تا ولتاژ اولیه برای تخمین ولتاژ خازن در حالت تخمین بعدی بروزرسانی شود. در نتیجه، خطاهای تخمین بسیار کوچک هستند؛ و در این مقاله نادیده گرفته می‌شوند، زیرا در مرحله (۱) روش تخمین از تجمیع خطا در تخمین ولتاژ خازن‌ها جلوگیری می‌کند. به دلیل اینکه در روش تخمین ولتاژ خازن پیشنهادی از ظرفیت نامی استفاده شده است؛ با کاهش ظرفیت خازن، ولتاژ تخمینی خازن متناظر با افزایش ریبیل مواجه خواهد شد. بعنوان مثال، در صورتی که، ظرفیت واقعی خازن به نصف مقدار ظرفیت نامی خازن کاهش یابد؛ ریبیل ولتاژ واقعی خازن دو برابر ریبیل ولتاژ تخمینی خواهد بود. در نتیجه، پایداری سیستم با چالش مواجه خواهد شد. به این ترتیب، استفاده از یک روش CHM مناسب باعث افزایش قابلیت اطمینان و دقت تخمین ولتاژ خازن‌ها خواهد شد.

۴- روش پیشنهادی CHM

خازن‌ها به عنوان یکی از شکننده‌ترین قطعات در پیکربندی MMC استفاده می‌شوند که باعث کاهش قابلیت اطمینان آن شده‌اند. علاوه-براین، روش تخمین ولتاژ خازن‌ها وابسته به ظرفیت نامی است؛ و در صورتیکه ظرفیت بیش از حد کاهش یابد روش تخمین پیشنهادی با چالش مواجه خواهد شد. همچنین خطا در خازن‌ها در طول مدت زمان طولانی اتفاق می‌افتد. بنابراین، سرعت تشخیص خطا در روش-های CHM ملاک نبوده و معیار اصلی در روش‌های تشخیص خطای خازن دقت روش CHM است.

در این مقاله، با توجه به پیکربندی خاص حسگرهای ولتاژ در بازو‌ها، یک روش موثر و ساده برای CHM پیشنهاد شده است؛ که از نسبت میان افزایش ولتاژ تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده در طول بازه $I_{arm} > 0$ به عنوان شاخصی برای نظارت بر ظرفیت استفاده می‌کند. باتوجه به نحوه عملکرد MMC در جریان بازو مثبت، ولتاژ خازن افزایش خواهد یافت. بنابراین روش پیشنهادی از این ویژگی عملکرد MMC برای ارائه یک شاخص CHM استفاده می‌کند. با توجه به بخش ۳ ولتاژ خازن‌ها بطور مستقیم در مرحله (۱) اندازه‌گیری می-شود.

اگر $S_{i1}=1$ & $S_{i2}=0$ در این حالت تنها زیرماژول شماره یک ($SUBM_{i1}$) در گروه فعال است و خروجی $SUBM_{i1}$ برابر با ولتاژ خازن متناظر (V_{Ci1}) است. در نتیجه ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط حسگر ولتاژ برابر با V_{Ci1} خواهد بود و خواهیم داشت:

$$V_{Gu,li}(t) = V_{SUBM_{i1}}(t) = S_{i1}(t)V_{Ci1} \quad (1)$$

که در اینجا، مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط حسگر ولتاژ گروه i ام، $V_{SUBM_{i1}}(t)$ ولتاژ خروجی $SUBM_{i1}$ و $V_{Ci1}(t)$ ولتاژ خازن C_{i1} است.

اگر $S_{i1}=0$ & $S_{i2}=1$ در این شرایط زیرماژول شماره دو ($SUBM_{i2}$) در گروه فعال و $SUBM_{i1}$ غیرفعال است. به این ترتیب، ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط حسگر ولتاژ برابر با ولتاژ خازن $SUBM_{i2}$ (V_{Ci2}) است و داریم:

$$V_{Gu,li}(t) = V_{SUBM_{i2}}(t) = S_{i2}(t)V_{Ci2} \quad (2)$$

که در (۲)، $V_{SUBM_{i2}}(t)$ ولتاژ خروجی $SUBM_{i2}$ و $V_{Ci2}(t)$ ولتاژ خازن C_{i2} است. بنابراین، با توجه به معادلات (۱) و (۲) ولتاژ خازن‌ها در شرایط خاصی بصورت مستقیم توسط حسگر گروه قابل اندازه‌گیری است. با این وجود، جهت عملکرد صحیح MMC، نیاز به ولتاژ خازن‌ها در تمامی لحظات است. در نتیجه تخمین ولتاژ خازن‌ها الزامی است که در ادامه بیان شده است.

مرحله ۲) تخمین ولتاژ خازن‌ها: با وجود اینکه در مرحله (۱) ولتاژ خازن‌ها به صورت مستقیم به وسیله حسگرهای گروه اندازه‌گیری می‌شوند؛ اما نیاز است تا برای سایر شرایط کلیدزنی در هر گروه ولتاژ خازن‌ها به دقت تخمین زده شود. معادله تخمین ولتاژ خازن‌ها در سایر شرایط کلیدزنی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{V}_{Ciz}(t) = V_{Cmiz}(t_0) + \frac{1}{C_{niz}} \int_{t_0}^t i_{Ciz} dt, (t = t_0 + k_{iz}T_{CC} \leq t_1) \quad (3)$$

در رابطه فوق، $\hat{V}_{Ciz}(t)$ ولتاژ تخمین زده شده C_{iz} ، ظرفیت نامی خازن متناظر، t_0 و t_1 به ترتیب زمان شروع و پایان حالت تخمین هستند. $V_{Cmiz}(t_0)$ آخرین ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط حسگر گروه برای خازن متناظر است. همچنین، T_{CC} چرخه کنترل سیستم است و k_{iz} تعداد سیکل‌های کنترل در حالت تخمین است. i_{Ciz} جریان عبوری از خازن است که به دلیل پرهیز از به کارگیری حسگر جریان مجزا برای خازن‌ها، توسط حسگر جریان بازو به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$i_{Ciz} = S_{iz} i_{arm} \quad (4)$$

به این ترتیب، با استفاده از دو مرحله فوق ولتاژ خازن‌ها به سادگی و به دور از به کارگیری الگوریتم‌های پیچیده قابل محاسبه خواهد بود.

باشد، زیرا فرکانس جریان بازو بسیار کمتر از فرکانس کلیدزنی زیرماژول است. بنابراین محاسبات (۵) الی (۷) را می‌توان در چرخه-های کلیدزنی چندگانه در طول بازه جریان بازو مثبت اعمال کرد. با فرض اینکه در طول دوره جریان بازو مثبت در یک زیرماژول دارای k حالت مانده بازه $(t_0 - t_1)$ باشد و ظرفیت خازن تغییر نکند، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_{1eiz}}{\Delta V_{1miz}} &= \frac{\Delta V_{1eiz}}{v_{2miz} - v_{1miz}} = \frac{C_{actiz}}{C_{niz}} \\ \frac{\Delta V_{2eiz}}{\Delta V_{2miz}} &= \frac{\Delta V_{2eiz}}{v_{3miz} - v_{2miz}} = \frac{C_{actiz}}{C_{niz}} \\ &\vdots \\ \frac{\Delta V_{keiz}}{\Delta V_{kmiz}} &= \frac{\Delta V_{keiz}}{v_{kmiz} - v_{k-1miz}} = \frac{C_{actiz}}{C_{niz}} \end{aligned} \quad (۸)$$

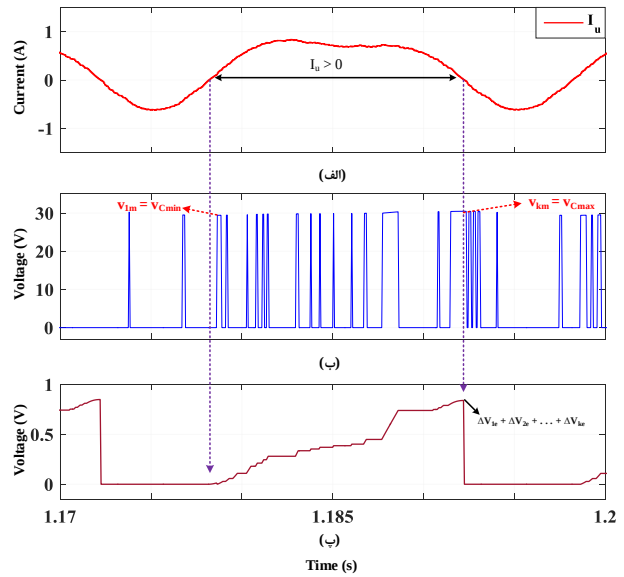
که رابطه فوق را می‌توان به شکل زیر باز نویسی کرد:

$$\frac{\Delta V_{1eiz} + \Delta V_{2eiz} + \dots + \Delta V_{keiz}}{v_{kiz} - v_{1miz}} = \frac{C_{actiz}}{C_{niz}} \quad (۹)$$

که در آن ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده در آخرین زمان در طول دوره جریان بازو مثبت است. از آنجایی که خازن در طول دوره جریان بازو مثبت در حالت شارژ نگه داشته می‌شود، ولتاژهای اندازه‌گیری شده v_{1miz} و v_{kmiz} به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ خازن هستند. لازم به ذکر است که Δv_{je} ($j = 1, 2, \dots, k$) در معادله (۳) برای تخمین ولتاژ خازن برای عملکرد عادی MMC محاسبه شده است، به این معنی که روش نظارت بر خازن پیشنهادی بار محاسباتی را افزایش نمی‌دهد.

فرآیند روش CHM پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. در طول دوره جریان بازویی مثبت نظارت بر ظرفیت انجام می‌شود؛ جایی که خروجی حسگر ولتاژ در مرحله (۱) روش تخمین پیشنهادی بین صفر و ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده تغییر می‌کند. همانطور که در شکل (۲ الف) نشان داده شده است؛ حداقل و حداکثر ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده، v_{cmin} و v_{cmax} ، باید در مرحله (۱) روش تخمین پیشنهادی جمع آوری شود؛ و به ترتیب به صورت v_I و v_k ثبت شود. همچنین، افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده در طول هر دوره‌های تخمین در شکل (۲ پ) نشان داده شده است. در نهایت، مجموع افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده در طول دوره جریان بازو مثبت را می‌توان برای ساخت یک شاخص نظارت بر سلامت ظرفیت (ICHM) استفاده کرد که داریم:

$$ICHM_{iz} = \frac{\Delta V_{1eiz} + \Delta V_{2eiz} + \dots + \Delta V_{keiz}}{v_{kiz} - v_{1miz}} \quad (۱۰)$$



شکل (۲): فرآیند روش پایش ظرفیت، (الف) جریان بازو بالا، (ب) مقدار ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده برای SUBM₁₁ بازو بالا در مرحله (۱) تخمین، (پ) افزایش ولتاژ تخمینی خازن در طول دوره جریان بازو مثبت

فرض شود ولتاژ اندازه‌گیری شده خازن در سیکل کنترلی قبلی (یعنی قبل از شروع تخمین در لحظه t_0) و سیکل کنترلی فعلی (پایان حالت تخمین در زمان t_1) به ترتیب v_{1miz} و v_{2miz} است. افزایش ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده در طول بازه $(t_0 - t_1)$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta V_{1miz} = v_{2miz} - v_{1miz} = \frac{1}{C_{actiz}} \int i_{arm} dt \quad (۵)$$

که در آن ΔV_{1miz} افزایش ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده در طول بازه تخمین و C_{actiz} ظرفیت واقعی خازن زیرماژول است. برای تحقق نظارت بر خازن، افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده نیز در بازه $(t_0 - t_1)$ محاسبه می‌شود:

$$\Delta V_{1eiz} = \frac{1}{C_{niz}} \int i_{arm} dt \quad (۶)$$

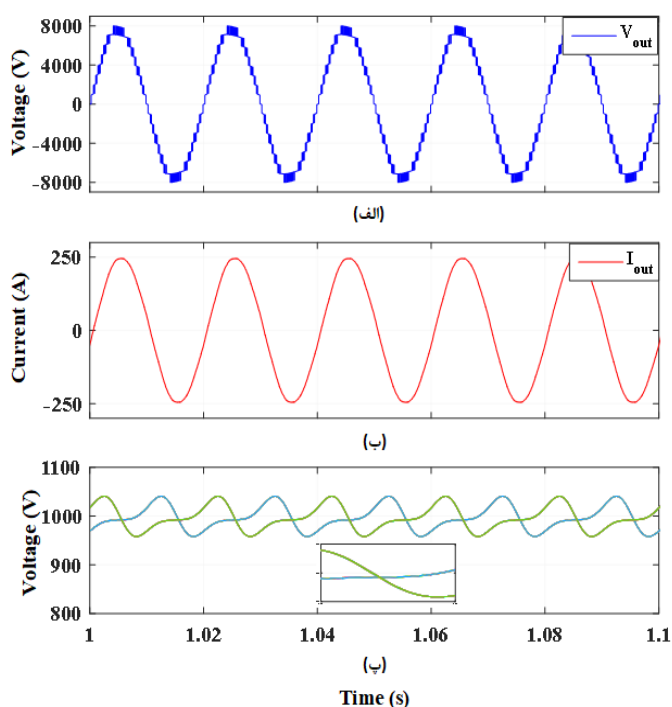
که ΔV_{1eiz} افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده در طول دوره ذکر شده است. بنابراین، نسبت افزایش بین ولتاژ خازن تخمین زده شده و ولتاژ اندازه‌گیری شده خازن در طول بازه $(t_0 - t_1)$ را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\frac{\Delta V_{1eiz}}{\Delta V_{1miz}} = \frac{\Delta V_{1eiz}}{v_{2miz} - v_{1miz}} = \frac{C_{actiz}}{C_{niz}} \quad (۷)$$

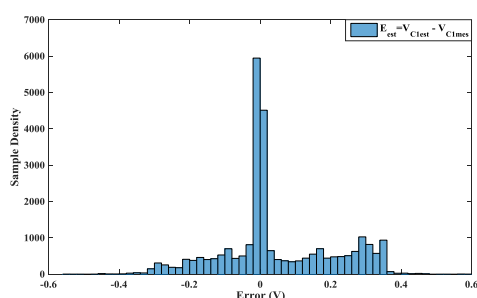
در این مقاله، برای کاهش حجم محاسبات فقط از دوره‌ای با جریان بازو مثبت برای نظارت بر ظرفیت خازن استفاده می‌شود؛ و ممکن است چرخه‌های کلیدزنی زیادی مانده بازه $(t_0 - t_1)$ وجود داشته

جدول (۱): پارامترهای کلیدی شبیه سازی و تجربی MMC

پارامتر	شبیه سازی	تجربی
ولتاژ لینک DC	$V_{dc} = 16 \text{ kV}$	120 V
تعداد زیرمآزول‌های هر بازو	$N = 16$	4
زمان نمونه برداری	$T_s = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$	$2 \times 10^{-4} \text{ s}$
فرکانس کلیدزنی	$F_{sw} = 1 \text{ kHz}$	500 Hz
ظرفیت خازن	$C = 6200 \mu\text{F}$	$2200 \mu\text{F}$
سلف بازو	$L_s = 5 \text{ mH}$	5 mH
مقاومت بازو	$R_s = 0.1 \Omega$	0.3Ω
مقاومت خروجی	$R_o = 30 \Omega$	30Ω
سلف خروجی	$L_o = 17 \text{ mH}$	17 mH
شاخص مدولاسیون	$m_a = 0.95$	0.85



شکل (۳): ارزیابی روش کاهش حسگر پیشنهادی شرایط عملکرد عادی، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی، (ج) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین



شکل (۴): توزیع ترکیبی مقدار خطای روش تخمین ولتاژ خازن

ولت قرار دارند. به این ترتیب از نتایج شکل (۳) و (۴) مشخص است که روش پیشنهادی کاهش حسگر پیشنهادی اثر مخربی بر عملکرد عادی MMC نداشته و با وجود کاهش حسگرها به نصف تعداد معمولی عملکرد مبدل مناسب است.

۵-۲- ارزیابی روش کاهش حسگر پیشنهادی با تغییر شاخص مدولاسیون

در شکل ۵ نتایج شبیه سازی عملکرد MMC، با روش کاهش حسگر پیشنهادی را با تغییر نگاهی در شاخص مدولاسیون نشان می‌دهد. در حالت عادی مبدل با شاخص مدولاسیون ۰.۹۵ تنظیم شده است که در $t=0.9 \text{ s}$ به طور ناگهانی شاخص مدولاسیون به ۰.۷ کاهش یافته

شاخص پیشنهادی نسبت ظرفیت واقعی به ظرفیت اسمی را نشان می‌دهد که با توجه به پیری خازن‌ها مقداری کمتر از یک خواهد بود. به عنوان مثال، برای خازن الکترولیتی، اگر $ICHM_{ij}$ کمتر از ۰/۸ باشد، به این معنی است، خازن مورد نظر معیوب بوده و باید با یک خازن سالم تعویض گردد.

۵- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

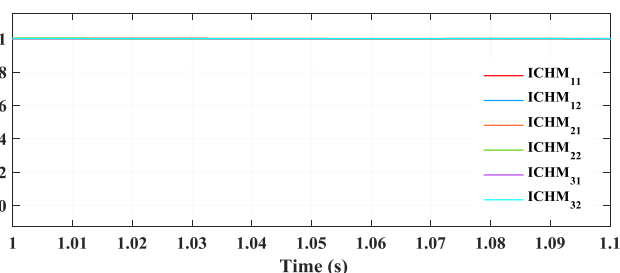
به منظور ارزیابی روش‌های کاهش حسگر و CHM پیشنهادی، شبیه سازی این روش‌ها به کمک نرم افزار MATLAB/Simulink، بر روی یک MMC تکفاز با ۱۶ زیرمآزول در هر بازو انجام گرفته است. پارامترهای کلیدی MMC شبیه‌سازی شده در جدول (۱) آورده شده است. در ادامه تحلیل نتایج تحت حالت‌های مختلف عملکرد مبدل مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- ارزیابی روش کاهش حسگر پیشنهادی در شرایط عادی

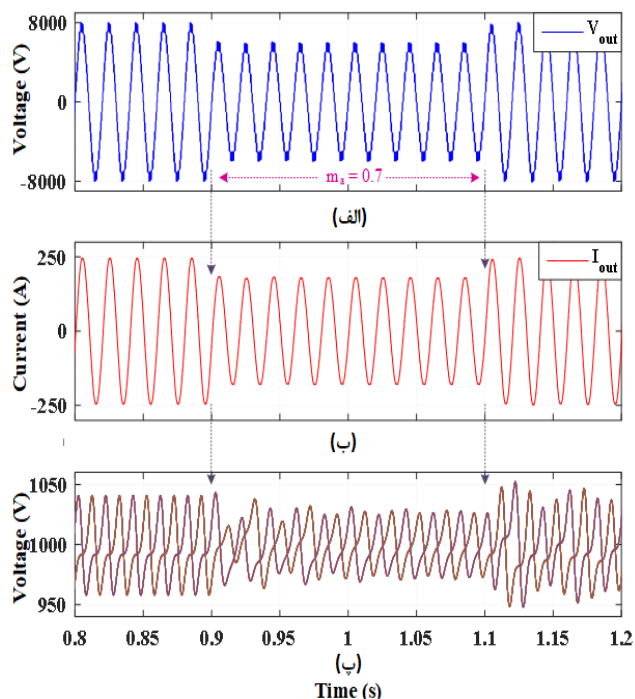
در شکل (۳) نتایج شبیه سازی عملکرد عادی مبدل نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳ الف) مشخص است ولتاژ خروجی مبدل به خوبی در ۱۷ سطح ولتاژ با کمترین اغتشاش تولید شده است. در شکل (۳ ب) جریان خروجی مبدل نمایش داده شده است که شکلی تقریباً سینوسی دارد و با توجه به فرکانس پایه ۵۰ هرتز در حال نوسان است. همچنین ولتاژ بازو بالا و پایین مبدل در شکل (۳ پ) نشان داده شده است که خازن‌ها به خوبی در مقدار مرجع خود متعادل شده اند و با یک دامنه ریل مناسب در حال نوسان هستند. شکل ۴ نمودار هیستوگرام از توزیع ترکیبی مقدار خطای روش تخمین ولتاژ خازن را نشان می‌دهد؛ که با نمونه گیری بصورت تصادفی در ۲۶۶۰۰ نمونه از مقدار خطای تخمین V_{CH} (ولتاژ تخمین زده شده برای C_{u11} منهای ولتاژ اندازه گیری شده برای C_{u11}) بدست آمده است. همانطور که از شکل (۴) مشخص است خطا تخمین مقدار بسیار کم و در محدوده $\pm 0.4V$ است و تعداد زیادی از نمونه‌های انتخاب شده در محدوده صفر

مشخص است؛ $ICHM_{IZ}$ برای همه خازن‌ها عددی تقریباً برابر با ۱ را نشان می‌دهد که نشان دهنده عملکرد صحیح روش پیشنهادی است. برای بررسی بیشتر در شکل (۷) میزان افزایش ولتاژ خازن تخمین زده شده و توابع کمینه (کمترین مقدار) و بیشینه (بیشترین مقدار) برای ولتاژ اندازه‌گیری شده برای C_{11} نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش ولتاژ تخمینی عدد $۸۲/۶۵۳$ را نشان می‌دهد. همچنین کمترین و بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده بترتیب مقدار شاخص سلامت برای این خازن مقدار $ICHM_{11} = 1.0008$ را نشان می‌دهد که با دقت بسیار بالایی اندازه‌گیری شده است. با بررسی صورت گرفته و با در نظر گرفتن مقادیر خطا، شاخص سلامت در شرایط عملکرد عادی حدود $۰/۲\%$ دارای خطا است که این مقدار بسیار ناچیز است. بنابراین ارزیابی روش پیشنهادی در شرایط عادی درحالی که ظرفیت تمامی خازن‌ها در مقدار نامی قرار دارد قابل قبول است.

بررسی بیشتر روش پایش ظرفیت پیشنهادی با تغییرات گسترده در ظرفیت خازن زیرمژول‌های مشخص شده انجام گرفته است. ظرفیت خازن زیرمژول‌های $SUBM_{11}$ - $SUBM_{32}$ بترتیب، $-۰/۵\%$ ، $-۰/۱۰\%$ ، $-۰/۲۰\%$ ، $-۰/۱۵\%$ ، $-۰/۳۰\%$ و -۲۵% کاهش یافته است تا ظرفیت این خازن‌ها به ترتیب برابر با: $۵۵۸۰\ \mu F$ ، $۵۸۹۰\ \mu F$ ، $۴۹۶۰\ \mu F$ ، $۵۲۷۰\ \mu F$ ، $۴۳۴۰\ \mu F$ و $۴۶۵۰\ \mu F$ باشند. شکل (۸) شاخص‌های سلامتی را برای این حالت نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است؛ $ICHM_{11} = 0.9 \pm 0.2\%$ است که حدود $۰/۲\%$ دارای خطا است که مقدار بسیار کمی است و قابل صرفه نظر است. همچنین شاخص‌های سلامت برای سایر خازن‌ها بترتیب برابر است با: $ICHM_{12} = 0.95 \pm 0.1\%$ ، $ICHM_{21} = 0.8 \pm 0.3\%$ ، $ICHM_{22} = 0.85 \pm 0.4\%$ ، $ICHM_{31} = 0.7 \pm 0.3\%$ و $ICHM_{32} = 0.75 \pm 0.3\%$. با توجه به نتایج شبیه سازی مشخص است که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در پایش ظرفیت خازن‌ها دارد و با دقتی بسیار بالا قابلیت تشخیص خازن معیوب را دارد.



شکل (۶): ارزیابی روش پیشنهادی پایش ظرفیت و بررسی شاخص‌های سلامت برای زیرمژول‌های مشخص شده با ظرفیت نامی



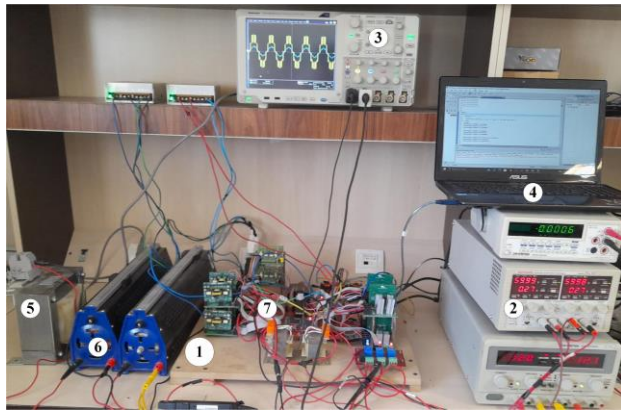
شکل (۵): ارزیابی روش کاهش حسگر پیشنهادی با تغییر شاخص مدولاسیون، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی، (ج) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین

است و بار دیگر در $t = 1.1\ s$ شاخص مدولاسیون به $۰/۹۵$ افزایش می‌یابد. شکل (۵ الف) ولتاژ خروجی مبدل را نشان می‌دهد که در شرایط عادی بخوبی ۱۷ سطح ولتاژی را ایجاد کرده است و با کاهش اندیس مدولاسیون، سطوح ولتاژ خروجی مبدل به ۱۳ سطح کاهش یافته است. در همین زمان همانطور که در شکل (۵ ب) نشان داده شده، دامنه جریان خروجی مبدل کاهش می‌یابد. با این وجود ولتاژ و جریان خروجی، بخوبی با فرکانس پایه ۵۰ هرتز در حال نوسان هستند. در شکل (۵ پ) ولتاژ خازن‌های بازو بالا و پایین مبدل نشان داده شده است که پس از تغییر شاخص مدولاسیون تعادل ولتاژ خازن با نوساناتی مواجه می‌شود. با این وجود، بلافاصله سیستم کنترل تعادل ولتاژ خازن‌ها موفق به حفظ پایداری سیستم می‌شود. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تأثیر نامطلوبی بر عملکرد سیستم با تغییرات ناگهانی در شاخص مدولاسیون ندارد.

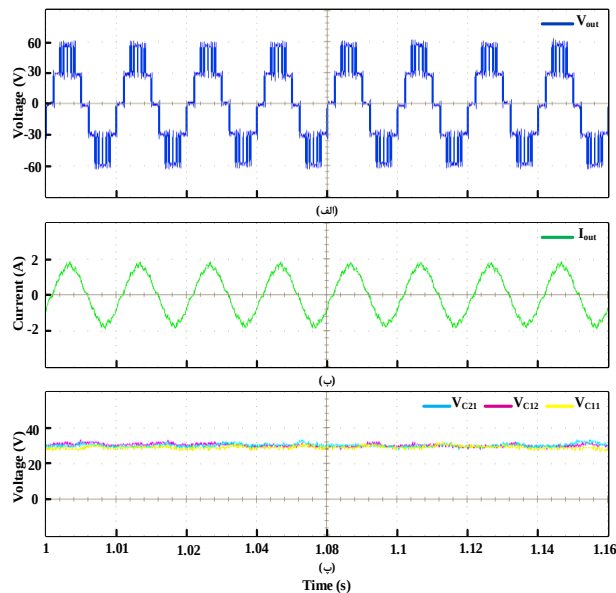
۳-۵- ارزیابی روش پایش ظرفیت پیشنهادی

بررسی عملکرد روش پایش ظرفیت پیشنهادی در شرایط عملکرد عادی و تحت چندین حالت با تغییرات گوناگون در ظرفیت خازن‌ها انجام شده است. برای سادگی فقط خازن زیرمژول‌های شماره یک تا شش بازویی بالا مورد مطالعه قرار گرفته است.

شکل (۶)، شاخص‌های سلامت ($ICHM_{IZ}$) را برای شش زیرمژول مشخص شده در شرایطی نشان می‌دهد که تمامی خازن‌ها ظرفیتی برابر با مقدار نامی خود دارند. در این حالت همان طور که از شکل (۷)



شکل (۹): نمونه آزمایشگاهی تکفاز MMC، (۱) MMC تکفاز، (۲) منبع ولتاژ DC، (۳) اسیلوسکوپ، (۴) مانیتور، (۵) سلف بار، (۶) مقاومت بار، (۷) پردازنده مرکزی

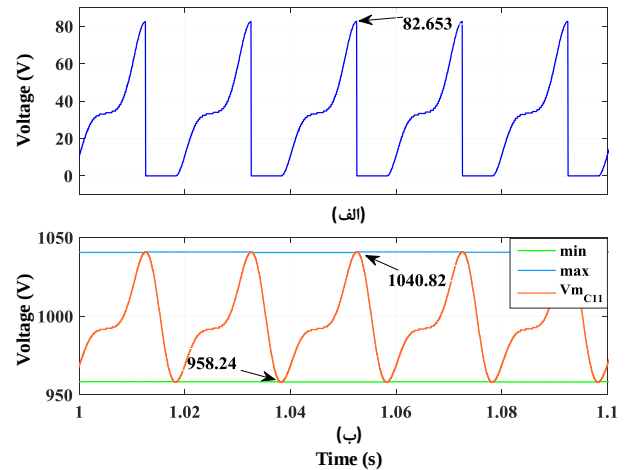


شکل (۱۰): ارزیابی روش پیشنهادی کاهش حسگر در شرایط عادی (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی، (ج) ولتاژ خازن‌های بازو بالا

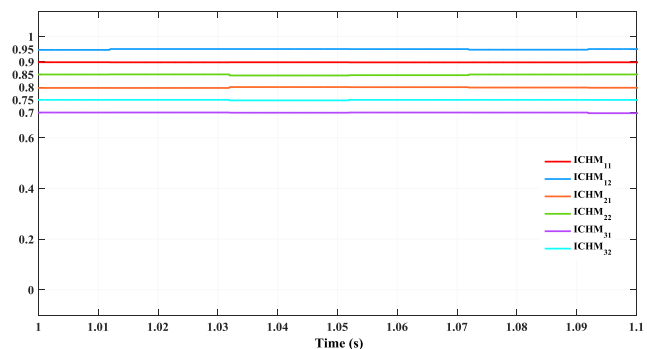
می باشد. در شکل (۱۰ ب) جریان خروجی مبدل به خوبی با فرکانس ۵۰ هرتز با اغتشاش کم در حال نوسان است و ولتاژ خازن‌های بازو بالا در شکل (۱۰ پ) نشان داده شده است که در مقدار مرجع یعنی ۳۰ ولت متعادل شده و با یک دامنه ریبیل مناسب در حال نوسان هستند. از نتایج عملکرد عادی مبدل مشخص است که عملکرد مبدل با وجود کاهش حسگرها دچار اثرات نامطلوب نشده است.

۶-۲- عملکرد روش پایش ظرفیت پیشنهادی

اعتبار سنجی روش پیشنهادی پایش ظرفیت با بررسی ظرفیت C_{11} در بازو بالا صورت گرفته است. به طور معمول ظرفیت واقعی خازن‌ها با ظرفیت نامی آن‌ها متفاوت است، به همین علت ظرفیت واقعی C_{11}



شکل (۷): عملکرد روش پیشنهادی پایش ظرفیت برای SUBM11، (الف) افزایش ولتاژ تخمینی، (ب) مقادیر کمینه و بیشینه ولتاژ اندازه‌گیری شده



شکل (۸): ارزیابی روش پیشنهادی پایش ظرفیت و بررسی شاخص‌های سلامت برای زیرمژول‌های مشخص شده با ظرفیت‌های متفاوت

۶- نتایج آزمایشگاهی

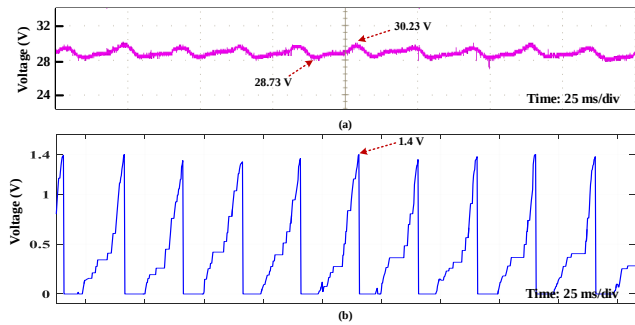
جهت اعتبار سنجی روش‌های پیشنهادی کاهش حسگر و پایش ظرفیت، با توجه به محدودیت امکانات آزمایشگاهی، یک نمونه تکفاز MMC استفاده شده است، که هر بازو آن شامل چهار زیرمژول است و توانایی تولید پنج سطح ولتاژ در خروجی را دارد. نمونه آزمایشگاهی MMC در شکل (۹) نمایش داده شده است و مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است.

۶-۱- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط عادی

ارزیابی روش پیشنهادی کاهش حسگر در شرایط عادی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰ الف) ولتاژ خروجی مبدل را با پنج سطحی نشان می‌دهد، که نشان دهنده عملکرد مناسب سیستم واقعی

مراجع

- [1] M. Hosseinpour and A. Seifi, "Design and Implementation of a New Switch-Diode based Single Source Multilevel Inverter Topology," J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng., vol. 19, no. 4, pp. 57–69, Sep. 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.4.57.
- [2] M. B. Hashkavayi, "Balancing of Capacitor Voltages with a Reduced Number of Voltage and Current Sensors in Alternate Arm Multilevel Converter (AAMC)," no. Pedstc, pp. 0–5, 2023, doi: 10.1109/PEDSTC57673.2023.10087151.
- [3] S. Farzamkia, H. Iman-Eini, M. Noushak, and A. Hadizadeh, "Improved Fault-Tolerant Method for Modular Multilevel Converters by Combined DC and Neutral-Shift Strategy," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 3, pp. 2454–2462, Mar. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2823659.
- [4] M. R. Haredasht, S. M. Barakati, S. Y. Darmian, M. B. Hashkavayi, and V. Barahouei, "Open-circuit Fault Diagnosis Strategy For Modular Multilevel Converter Semiconductor Power Switches," in 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Feb. 2022, pp. 150–154, doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767349.
- [5] F. Deng, Y. Lü, C. Liu, Q. Heng, Q. Yu, and J. Zhao, "Overview on submodule topologies, modeling, modulation, control schemes, fault diagnosis, and tolerant control strategies of modular multilevel converters," Chinese J. Electr. Eng., vol. 6, no. 1, pp. 1–21, 2020, doi: 10.23919/CJEE.2020.000001.
- [6] F. Rojas, C. Jerez, C. M. Hackl, O. Kalmbach, J. Pereda, and J. Lillo, "Faults in Modular Multilevel Cascade Converters - Part II: Fault Tolerance, Fault Detection and Diagnosis, and System Reconfiguration," IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., vol. 3, no. September, pp. 594–614, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3213508.
- [7] H.-L. Dang and S. Kwak, "Review of Health Monitoring Techniques for Capacitors Used in Power Electronics Converters," Sensors, vol. 20, no. 13, p. 3740, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20133740.
- [8] F. Rojas, C. Jerez, C. M. Hackl, O. Kalmbach, J. Pereda, and J. Lillo, "Faults in Modular Multilevel Cascade Converters—Part I: Reliability, Failure Mechanisms, and Fault Impact Analysis," IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., vol. 3, no. September, pp. 628–649, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3213510.
- [9] V. Barahouei, S. Masoud Barakati, M. Rahmani Haredasht, M. Bagheri Hashkavayi, and M. Zoraghi Jedi, "Fault-Tolerant Operation Approach for Nested Neutral Point Clamped (NNPC) Converter," in 2023 14th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Jan. 2023, no. Pedstc, pp. 1–5, doi: 10.1109/PEDSTC57673.2023.10087114.
- [10] M. Asoodar, M. Nahalparvari, C. Danielsson, R. Soderstrom, and H.-P. Nee, "Online Health Monitoring of DC-Link Capacitors in Modular Multilevel Converters for FACTS and HVDC Applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 36, no. 12, pp. 13489–13503, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3091780.
- [11] V. Barahouei, S. Masoud Barakati, M. Rahmani Haredasht, and M. Bagheri Hashkavayi, "Fast Open-circuit Fault Detection Method for Defective Switches in Nested Neutral Point Clamped (NNPC) Converter," in 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Feb. 2022, pp. 191–195, doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767307.



شکل (۱۱): عملکرد روش پایش ظرفیت پیشنهادی، (الف) ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده، (ب) افزایش ولتاژ خازن تخمینی

توسط LCR متر اندازه‌گیری شده است که مقدار ظرفیت واقعی را برابر با $2025.5 \mu\text{F}$ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ظرفیت نامی در مبدل آزمایشگاهی $2200 \mu\text{F}$ در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه شاخص سلامت واقعی برای این خازن برابر است با: $ICHM_{11} = 0.9206$

شکل ۱۱ نتایج تجربی پایش ظرفیت خازن را نشان می‌دهد که ولتاژ اندازه‌گیری شده C_{11} در شکل (۱۱ الف) و افزایش ولتاژ تخمینی در شکل (۱۱ ب) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است کمترین و بیشترین مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده در طول دوره افزایش ولتاژ خازن به ترتیب برابر با 28.73 V و 30.23 V است. همچنین در طول همین دوره مقدار افزایش ولتاژ تخمینی 1.4 V است. بنابراین شاخص وضعیت سلامت برابر است با: $ICHM_{11} = 0.9333$ با توجه به نتایج فوق روش پیشنهادی با خطای 1.28% همراه است که مقدار کمی بوده و عملکرد روش پیشنهادی قابل قبول است.

۷- نتیجه‌گیری

وجود تعداد خازن زیاد در پیکربندی MMC باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم شده است. علاوه بر این، کنترل تعادل ولتاژ خازن‌ها در MMC یک چالش اصلی محسوب می‌شود که نیاز به تعداد حسگرهای ولتاژ زیاد را در MMC ضروری می‌کند. بکارگیری حسگرهای ولتاژ زیاد باعث افزایش هزینه‌های ساخت، پیچیدگی سخت افزار و کاهش قابلیت اطمینان مبدل شده است. روش نظارت بر سلامت ظرفیت خازن ارائه شده به همراه کاهش تعداد حسگرها در این مقاله مزایای را به همراه دارد. کاهش تعداد حسگرهای ولتاژ MMC به نصف نسبت به ساختار معمولی، تخمین دقیق ولتاژ خازن‌ها و پیاده‌سازی آسان روش تخمین در کاربردهای عملی و پایش برخط ظرفیت خازن‌ها با دقت بالا سه مزیت مهم استفاده از روش‌های پیشنهادی است. علاوه بر این، روش پیشنهادی کاهش حسگر در فرکانس‌های کلیدزنی پایین عملکرد مناسبی دارد که پیاده‌سازی آن را در یک سیستم واقعی ممکن می‌سازد. همچنین روش پایش ظرفیت پیشنهادی دارای بار محاسباتی پایین و دقت بالا است که باعث افزایش قابلیت اطمینان مبدل شده است.

- Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 177–187, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2412658.
- [25] O. S. H. M. Abushafa, M. S. A. Dahidah, S. M. Gadoue, and D. J. Atkinson, “Submodule Voltage Estimation Scheme in Modular Multilevel Converters with Reduced Voltage Sensors Based on Kalman Filter Approach,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 7025–7035, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2795519.
- [26] O. S. M. Abushafa, S. M. Gadoue, M. S. A. Dahidah, D. J. Atkinson, and P. Missailidis, “Capacitor Voltage Estimation Scheme With Reduced Number of Sensors for Modular Multilevel Converters,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 2086–2097, Dec. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2797245.
- [27] M. Abdelsalam, M. Marei, S. Tennakoon, and A. Griffiths, “Capacitor voltage balancing strategy based on sub-module capacitor voltage estimation for modular multilevel converters,” *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 65–73, Mar. 2016, doi: 10.17775/CSEEJPES.2016.00010.
- [28] M. D. Islam, R. Razzaghi, and B. Bahrani, “Arm-Sensorless Sub-Module Voltage Estimation and Balancing of Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 2, pp. 957–967, Apr. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2931287.
- [29] Z. Wang and L. Peng, “Grouping Capacitor Voltage Estimation and Fault Diagnosis with Capacitance Self-Updating in Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 2, pp. 1532–1543, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3011131.
- [30] S. Haghnazari and M. R. Zolghadri, “A novel voltage measurement technique for modular multilevel converter capacitors,” in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2015, pp. 000238–000243, doi: 10.1109/IECON.2015.7392105.
- [31] M. Bagheri-Hashkavayi, S. M. Barakati, S. Yousofi-Darmian, and V. Barahouei, “Improved Sensor Reduction Method in Modular Multilevel Converters Based on Energy Estimation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3165474.
- [12] Z. Wang, Y. Zhang, H. Wang, and F. Blaabjerg, “Capacitor Condition Monitoring Based on the DC-Side Start-Up of Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 6, pp. 5589–5593, Jun. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2956808.
- [13] Y. J. Jo, T. H. Nguyen, and D. C. Lee, “Condition monitoring of submodule capacitors in modular multilevel converters,” 2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014, pp. 2121–2126, Nov. 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953683.
- [14] D. Ronanki and S. S. Williamson, “Failure Prediction of Submodule Capacitors in Modular Multilevel Converter by Monitoring the Intrinsic Capacitor Voltage Fluctuations,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 4, pp. 2585–2594, Apr. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2912771.
- [15] O. Abushafa, S. Gadoue, M. Dahidah, and D. Atkinson, “A new scheme for monitoring submodule capacitance in modular multilevel converter,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP684, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.0369.
- [16] C. Zhang, W. Zhang, S. Ethni, M. Dahidah, V. Pickert, and H. Khalfalla, “Online Condition Monitoring of Sub-module Capacitors in MMC Enabled by Reduced Switching Frequency Sorting Scheme,” 2019 10th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2019, 2019, doi: 10.1109/IREC.2019.8754625.
- [17] F. Deng, Q. Wang, D. Liu, Y. Wang, M. Cheng, and Z. Chen, “Reference Submodule Based Capacitor Monitoring Strategy for Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4711–4721, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2857832.
- [18] Z. Wang, Y. Zhang, H. Wang, and F. Blaabjerg, “A Reference Submodule Based Capacitor Condition Monitoring Method for Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 7, pp. 6691–6696, Jul. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2961712.
- [19] Z. Geng, M. Han, W. Xie, and T. Sun, “A Hierarchic Capacitor Condition Monitoring Strategy for High-Voltage Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no. 6, pp. 5310–5324, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3176001.
- [20] M. Babaei, R. Ghandehari, and M. Asadi, “Voltage Equalization of DC Link capacitors in a CHB-Based PET under the Unbalance Voltage Conditions,” *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 71–80, Sep. 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.4.71.
- [21] P. Poorvahdani and A. Jalilian, “Voltage Unbalance Control in an Islanded Microgrid consists of VCM and CCM units,” *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 61–73, Apr. 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.1.61.
- [22] P. Hu, R. Teodorescu, S. Wang, S. Li, and J. M. Guerrero, “A Currentless Sorting and Selection-Based Capacitor-Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1022–1025, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2850360.
- [23] P. Hu, R. Teodorescu, and J. M. Guerrero, “State observer based capacitor-voltage-balancing method for modular multilevel converters without arm-current sensors,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, no. December 2018, pp. 188–196, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.025.
- [24] R. Picas, J. Zaragoza, J. Pou, S. Ceballos, and J. Balcells, “New Measuring Technique for Reducing the Number of Voltage Sensors in Modular Multilevel