

اینورتر هفت سطحی با پیکربندی جدید مبتنی بر استانداردهای رانش الکتریکی کشتی

محمدرضا نوروزی^۱، امیرحسین اکبری^۲، سیدادیب ابریشمی فر^۳، غلامعلی رضایی راد^۴

Amirhosein_akbari@elec.iust.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

مبدل‌های الکترونیک قدرت در صنایع مختلف از قبیل سیستم‌های حمل‌ونقل، راه‌انداز موتورها و منابع تغذیه کاربردهای بسیار زیادی دارد. یکی از کاربردهای این مبدل‌ها، استفاده در سیستم تحرک الکتریکی شناور است. مبدل‌های با پیکربندی متنوع در مقاله‌های مختلف ارائه شده است که برخی در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی به‌کار گرفته شده است. در این مبدل‌ها تعداد قطعه‌های استفاده شده، فشار ولتاژ روی کلیدها، فرکانس کلیدزنی، مقدار اعوجاج هارمونیک کلی، تکنیک مدولاسیون و قابلیت اطمینان پارامترهایی هستند که باید مورد بررسی قرار بگیرند. در این مقاله، یک پیکربندی جدید با کم‌ترین عناصر، یک روش کلیدزنی مناسب برای مبدل هفت‌سطحی و اعوجاج هارمونیک کلی کم‌تر برای استفاده در سیستم تحرک الکتریکی یک شناور مبتنی بر استانداردهای رانش الکتریکی کشتی ارائه شده است. برای اطمینان از طراحی انجام شده، نتایج شبیه‌سازی توسط نرم افزار PSpice برای مبدل پیشنهادی در ولتاژ ۶۶۰۰ ولت پیک تا پیک و جریان ۲۴۰ آمپر پیک تا پیک با مقدار اعوجاج هارمونیک ۱،۱٪ انجام شد که این نتایج، صحت طراحی انجام شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: مبدل‌های الکترونیک قدرت، محدوده ولتاژ متوسط، صنایع دریایی، اعوجاج هارمونیک، رانش الکتریکی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۲/۲۰

۱- مقدمه

امروزه استفاده از مبدل‌های چندسطحی برای کاربردهای توان بالای صنعتی بسیار مرسوم شده است و که این عامل یکی از موضوعات مطرح روز در تحقیقات علمی است [۱-۴]. استفاده از این دسته مبدل‌ها به علت مزایای زیر مورد توجه است:

- مقدار اعوجاج خروجی کم
- کاهش اعوجاج جریان ورودی
- اتصال راحت به منابع انرژی‌های نو مانند باد، خورشید و پیل سوختی
- تلفات کم کلیدزنی
- کاهش اثرهای نامطلوب EMC
- کاهش مقدار ولتاژ حالت مشترک [۵-۷]

از سوی دیگر مبدل‌های قدرت چندسطحی در صنعت بیشتر به صورت، سه سطحی، پنج سطحی و هفت سطحی مورد استفاده قرار گرفته است [۸-۱۲]. به علت افزایش سطح‌های ولتاژ مبدل، تعداد عناصر بیشتر و باعث افزایش حجم و پیچیدگی کنترل مبدل می‌شود [۱۳-۱۶]. استفاده از تعداد کلیدهای زیاد، با وجود اینکه سبب افزایش تلفات می‌شود، قابلیت اطمینان و طول عمر سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین در کاربردهایی که نیاز به میزان THD کمی در خروجی اینورتر است، استفاده از سطح‌های بالا به جای استفاده از فیلترهای گران قیمت در خروجی اینورتر، مقرون به صرفه‌تر است. برای تحرک یک شناور در دریا از سیستم‌هایی مانند سیستم تحرک بخار، سیستم تحرک دیزل، سیستم تحرک هسته‌ای، سیستم تحرک توربین گاز، سیستم تحرک پیل سوختی، سیستم تحرک خورشیدی، سیستم تحرک بیودیزل و سیستم تحرک الکتریکی استفاده می‌شود [۱۴-۱۶]. سیستم تحرک الکتریکی شناور از جمله سیستم‌هایی است که نیاز به میزان THD بسیار کم و قابلیت اطمینان بالا دارند.

در سیستم رانش الکتریکی کشتی، انرژی الکتریکی مورد نیاز از دیزل ژنراتور تأمین می‌شود. از مزایای این سیستم این است که قابلیت مانور بیشتر می‌شود و در سیستم انتقال نیرو به پروانه، گیربکس حذف می‌شود. لذا فضای کم‌تری اشغال می‌شود و وزن کلی سیستم تحرک نیز کاهش می‌یابد. از مزایای دیگر آن کاهش میزان تعمیر و نگهداری، کاهش

آلودگی صوتی محیط و همچنین افزایش بازده کلی سیستم تحرک است [۱۷ و ۱۸].

به منظور راه‌اندازی و کنترل موتورهای توان‌های زیاد در سیستم رانش الکتریکی کشتی، به علت زیاد بودن توان، لازم است که از مبدل‌های قدرت در حوزه ولتاژ متوسط^۱ استفاده شود [۱۹-۲۳]. مسئله دیگر آثار هارمونیک است که با توجه به محدودیت فضا برای قراردادن فیلتر، تا حد ممکن باید این آثار ضعیف گردد.

هدف این مقاله پیشنهاد یک پیکربندی جدید برای اینورتر چندسطحی است که برای استفاده در سامانه رانش الکتریکی شناور با استانداردهای مرتبط سازگار باشد.

در این مقاله، در بخش دو ساختارهای مورد استفاده در توان‌های زیاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. مبدلهایی که در کاربردهای ولتاژ متوسط استفاده می‌شوند، باید از استانداردهای خاصی پیروی کنند که به همین دلیل، در بخش سه به استانداردهای حوزه ولتاژ متوسط اشاره می‌شود. در بخش سه پیکربندی پیشنهادی و نحوه عملکرد آن در سطح‌های مختلف بررسی می‌شود. در بخش چهار، نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار PSpice و مقایسه پیکربندی جدید با پیکربندی‌های هم‌سطح بررسی می‌شود.

۲- بررسی پیکربندی‌های مختلف

برای بررسی ویژگی‌های پیکربندی پیشنهادی، ابتدا باید پیکربندی‌های مختلف را بررسی نمود. از بین پیکربندی‌ها به مواردی اشاره شده است که نسبت به سایر پیکربندی‌ها قابلیت‌های بهتری را در راستای استفاده در کاربردهای ولتاژ متوسط و همچنین در سامانه رانش الکتریکی داشته باشد.

۲-۱- اینورتر چندسطحی با اتصال DC (MLDCL^۲)

این پیکربندی مطابق شکل (۲) دارای چهار منبع DC ورودی است و شامل سلول‌هایی از پیکربندی سری نیم‌پل با منبع ویژه خود است که دارای قسمت‌های مجزای تولیدکننده ولتاژ با جهت جریان مطلوب و تولیدکننده سطح‌های ولتاژ است. در مقایسه با پیکربندی پل، ساختار MLDCL دارای کلیدهای کم‌تری است و در نتیجه تعداد سیگنال راه‌انداز کم‌تری نیاز دارد [۲۷ و ۲۸].

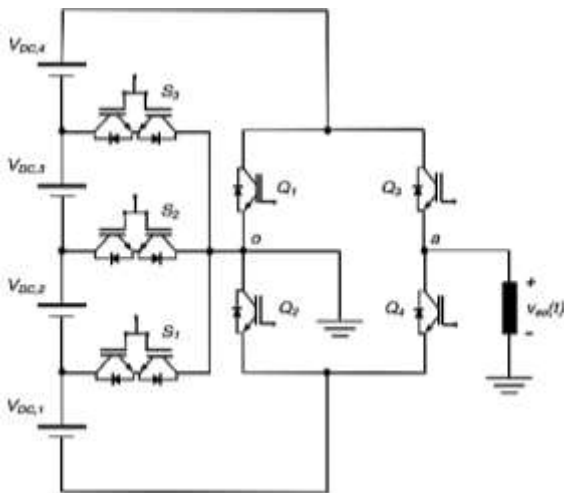
² Multilevel DC Link.

¹ Medium Voltage

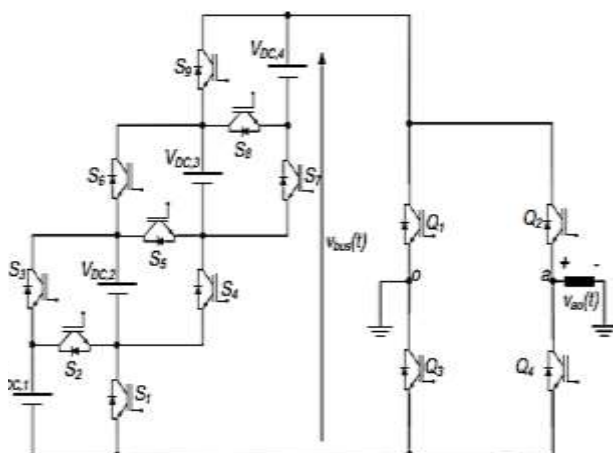
۲-۳- اینورتر چندسطحی با پیکربندی SSPS^۱

در این پیکربندی مطابق شکل (۴) با کلیدزنی، منابع با هم موازی یا سری می‌شود. در این پیکربندی به همان تعداد ولی برای تولید همان تعداد سطح ولتاژ در خروجی به تعداد کلید قدرت کم‌تری نیاز است.

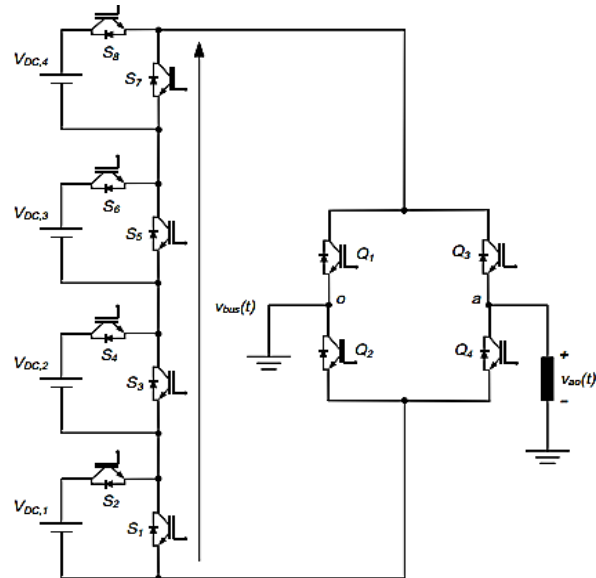
نکته مهم در این پیکربندی این است که کلیدهای Q_j باید حداقل دارای ولتاژ قابل تحملی برابر جمع مقادیر منابع باشند. در نتیجه برای حالتی که چهار منبع متقارن وجود داشته باشد، کلیدها باید دارای ولتاژ قابل‌تحملی برابر حداقل 4VDC باشند.



شکل (۳) پیکربندی نه‌سطحی T-Type پیشنهادی در [۱۳، ۱۹ و ۳۰].



شکل (۴) پیکربندی SSPS پیشنهاد شده در [۳۱].



شکل (۲) پیکربندی MLDC ارائه شده در [۲۷ و ۲۸].

هم‌چنین مشاهده می‌شود که در این پیکربندی هر کلید قدرت مربوط به قسمت تولیدکننده ولتاژ با جهت جریان مطلوب، حداقل باید دارای ولتاژ قابل تحمل نامی برابر جمع منابع ورودی است.

۲-۲- اینورتر چندسطحی با پیکربندی T-type

این پیکربندی مطابق شکل (۳) یک اینورتر تک‌فاز نه‌سطحی است که در مقایسه با پیکربندی‌های کلاسیک به‌طور چشم‌گیری تعداد کلیدها کاهش یافته است. در این ساختار منابع ورودی باید متقارن باشند، به علت این که تمام ترکیبات جمع یا تفریق منابع ورودی قابل دستیابی نیست و بعضی حالت‌ها مقدار مثبت یا منفی قابل ترکیب است ولی هر دو حالت باهم امکان ندارد. به علاوه عدم وجود حالت‌های اضافی باعث نامتعادل شدن می‌گردد.

با استفاده از این پیکربندی می‌توان با یک منبع ورودی، یک اینورتر سه‌فاز را پیاده‌سازی کرد. این اینورترها دارای ساختاری ساده هستند و به همین دلیل کنترل آن‌ها نیز ساده‌تر است. در این اینورترها نیاز نیست که منابع از هم مجزا شده باشند، که این عامل سبب می‌شود حجم مدار کاهش یابد. از معایب این پیکربندی می‌توان به نیاز به ترکیب کلیدهای یک‌جهته و دوجته، عدم امکان تقسیم بار و عدم امکان استفاده از منابع به صورت نامتقارن اشاره کرد.

¹ Switched Series/Parallel Sources.

۳- پیکربندی پیشنهادی

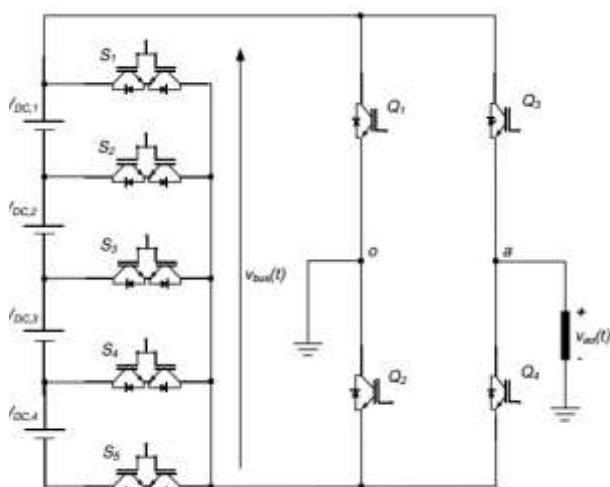
برای یک سامانه رانش الکتریکی کشتی ضروری است که حجم مبدل تاحد امکان کم باشد. اگر بتوان از قابلیت CHB به نحوی استفاده کرد که تعداد منبع‌های مورد نیاز زیاد نشود، یک انتخاب مناسب می‌باشد. پس با استفاده از ترکیب CHB و ایده گرفتن از پیکربندی NLM که از تعداد کلید کمی استفاده می‌شود، پیکربندی جدید دارای هفت سطح ولتاژ در خروجی است.

سطح‌های ± 1 ، $\pm 1/3$ ، $\pm 2/3$ و سطح صفر سطح‌های ولتاژ در خروجی اینورتر پیشنهادی است. استفاده از هفت سطح در ولتاژ خروجی، به علت کاهش میزان THD در ولتاژ خروجی است که نیاز به استفاده از فیلترهای گران قیمت را کاهش می‌دهد. مطابق شکل (۷) پیشنهاد شده است. در شکل‌های (۸) تا (۱۴) مسیر جریان در سطح‌های $+3$ تا -3 نشان داده شده است.

در جدول (۲) ترتیب عمل کرد کلیدها برای هر سطح نشان داده شده است. برای سطح‌های $+1$ و -1 ، سه کلید روشن است که برای سطح‌های $+2$ ، $+3$ ، -2 و -3 نیز چهار کلید روشن هستند.

۴- شبیه‌سازی

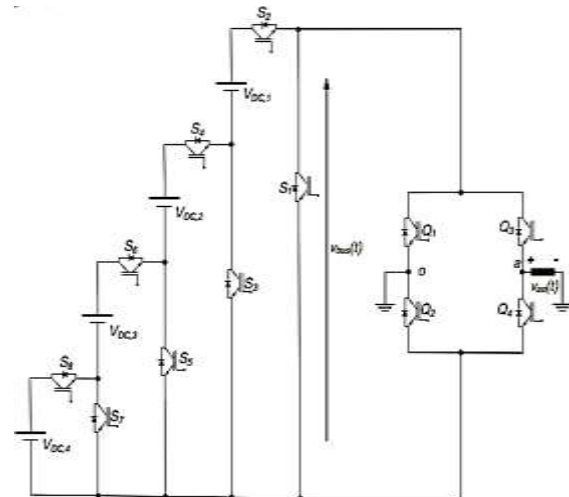
برای بررسی صحت مبدل طراحی شده، با استفاده از نرم‌افزار PSpice، مبدل پیشنهادی در ولتاژ 6600 ولت پیک تا پیک و جریان 240 آمپر پیک تا پیک با فرکانس کلیدزنی 5 کیلوهرتز شبیه‌سازی شده است.



شکل (۶) پیکربندی MLM پیشنهاد شده در [۳۳].

۲-۴- اینورتر چندسطحی با پیکربندی SCSS^۱

در این پیکربندی مطابق شکل (۵) منابع با کلیدهای قدرت سری شده‌اند و قابلیت ترکیبات مختلف برای سطح‌های ولتاژ را نمایش می‌دهد. به خاطر سادگی پیکربندی محدودیت در ترکیبات گوناگون سطح‌ها را دارد و استفاده از شکل نامتقارن منابع در پیکربندی برای کاهش بیشتر تعداد کلیدها امکان‌پذیر نیست.



شکل (۵) پیکربندی SCSS پیشنهاد شده در [۳۲].

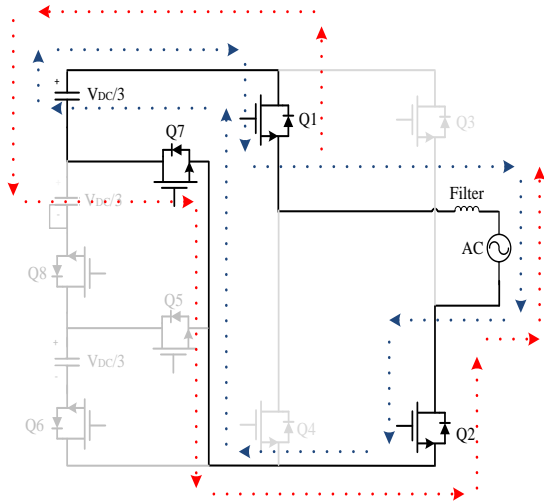
۲-۵- اینورتر چندسطحی بر پایه ماژول (MLM^۲)

پیکربندی نمایش داده شده در شکل (۶)، پیکربندی یک مبدل چندسطحی بر اساس ماژول است که قسمت تولید سطح‌های ولتاژ و قسمت تولید ولتاژ با جهت جریان مطلوب، از یک‌دیگر مجزا است. قسمت تولید سطح‌های ولتاژ، از منابع DC و کلیدهای دوجته تشکیل شده است که سبب می‌شود فشار روی کلیدها به‌طور یکسان توزیع نشود و کلیدهای قسمت تولیدکننده ولتاژ با جهت جریان مطلوب، یک جته است و دارای ولتاژ تحمیلی معادل ولتاژ بیشینه تولید شده توسط قسمت تولیدکننده سطح‌های ولتاژی است. بنابراین، کلیدها از نوع ولتاژ بالا و دارای فرکانس کلیدزنی کم هستند.

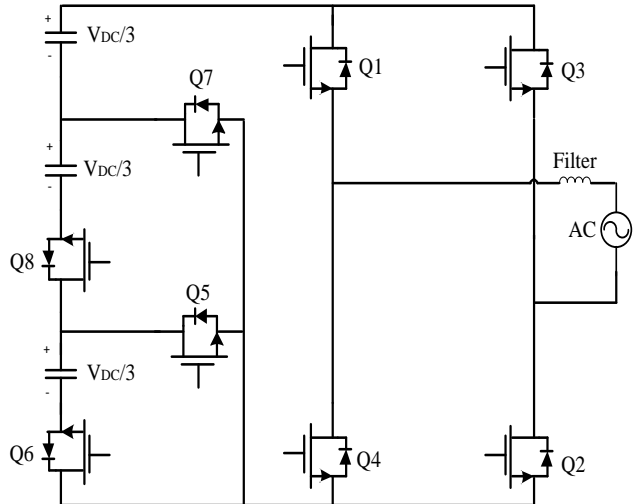
در این ساختار به علت این که امکان کلیه ترکیبات جمع یا تفریق منابع وجود ندارد، نمی‌توان از ترکیب نامتقارن منابع استفاده نمود. هم‌چنین امکان تقسیم بار یکسان بین منابع وجود ندارد و هریک از کلیدهای قسمت تولیدکننده ولتاژ با جهت جریان مطلوب، دارای ولتاژ نامی $4VDC$ است.

² Multi-Level Module.

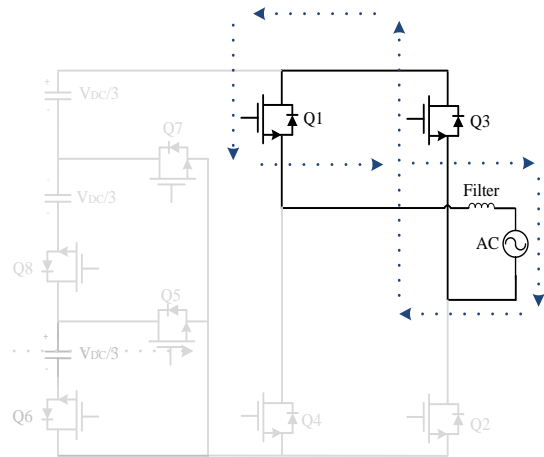
¹ Series Connected Switched Sources.



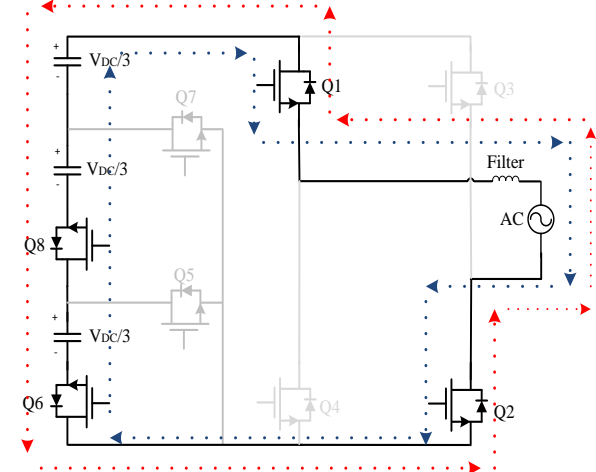
شکل (۱۰) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح +۱.



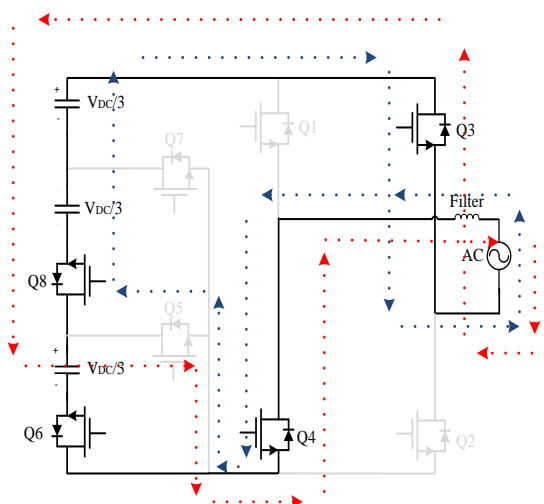
شکل (۷) پیکربندی مبدل هفت سطحی پیشنهاد شده با تعداد کلید کمتر.



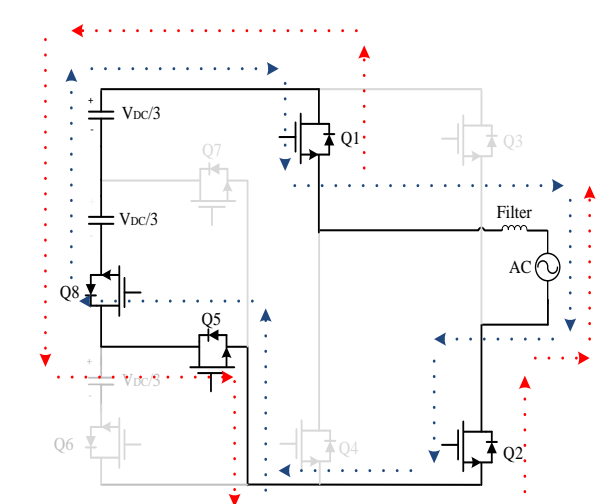
شکل (۱۱) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح ۰.



شکل (۸) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح +۳.



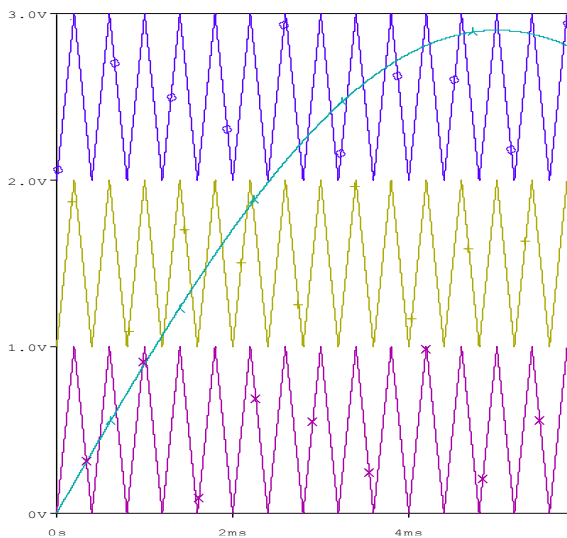
شکل (۱۲) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح -۳.



شکل (۹) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح +۲.

از مزایای این پیکربندی، همانطور که در شکل (۱۵) نیز نشان داده شده است، این است که برای مدولاسیون به سه حامل نیاز است. مدار استفاده شده در شبیه سازی در شکل (۱۶) آورده شده است. در شبیه سازی از کلید CM200DY-34A استفاده شده است. مدلی برای شبیه سازی کلید ذکر شده در نرم افزار وجود ندارد که از این رو با استفاده از ابزار Model Editor موجود در نرم افزار، ابتدا کلید مدل گردید و سپس شبیه سازی انجام شد.

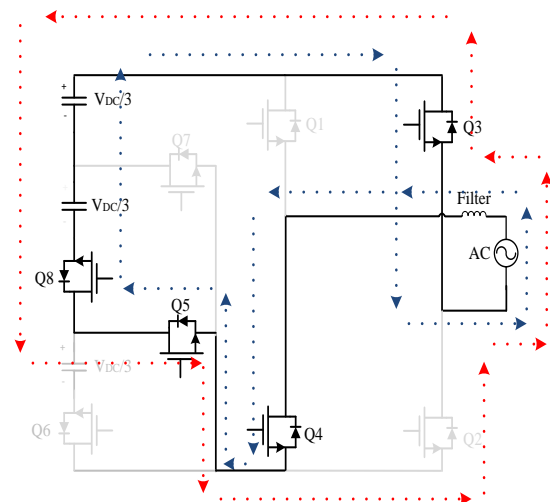
نتایج شبیه سازی در شکل های (۱۷) تا (۱۹) آورده شده است. شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر قبل از فیلتر و بعد از فیلتر در شکل های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. شکل (۱۹) نیز نشان دهنده جریان خروجی مبدل به ازای بار ۲۰ اهم و بار سلفی ۳۰ میلی هانری است. بر اساس [۲۴-۲۶] باید میزان THD ولتاژ خروجی کمتر از ۵ درصد باشد. به علت کاربرد عنوان شده برای اینورتر پیشنهادی، بار مورد نظر خاصیت سلفی شدیدی دارد که این عامل سبب کاهش میزان THD جریان خروجی نیز می شود.



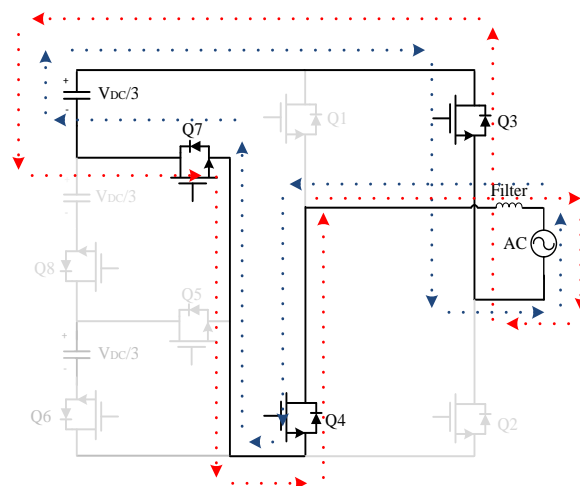
شکل (۱۵) روش مدولاسیون استفاده شده در اینورتر هفت سطحی پیشنهادی.

جدول (۳) مقایسه با پیکربندی های مختلف هفت سطحی.

تعداد کلید	پیکربندی
۱۲	MLDC-MLI
۱۰	SSPS-MLI
۱۰	SCSS-MLI
۱۰	MLM-MLI
۸	پیکربندی پیشنهادی



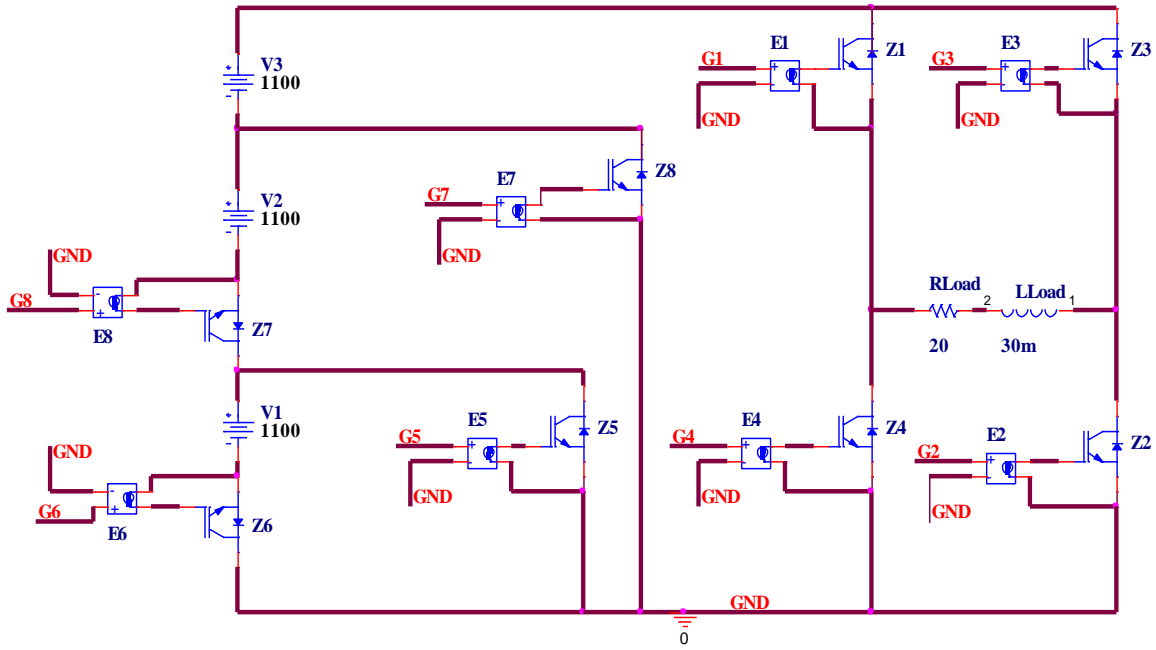
شکل (۱۳) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح ۲-.



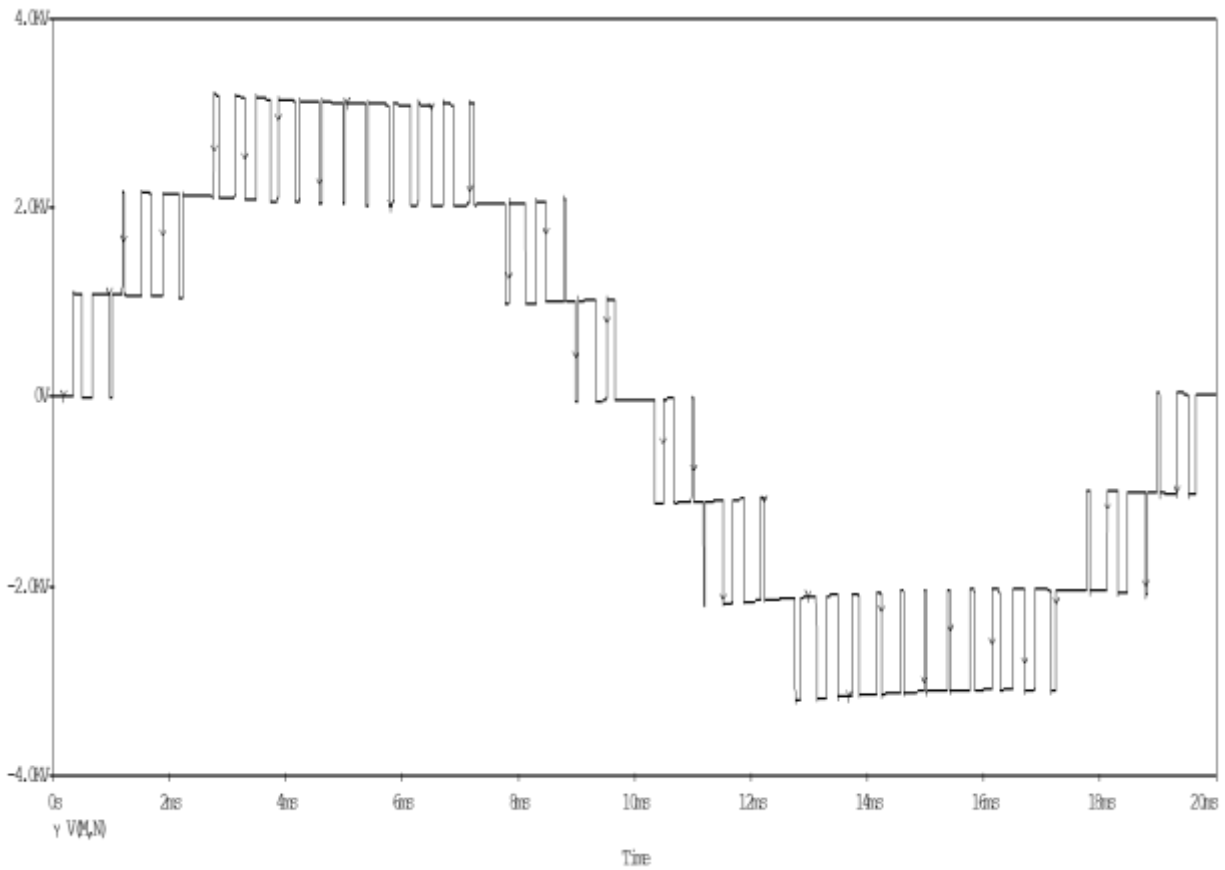
شکل (۱۴) مسیر جریان در مبدل پیشنهادی برای سطح ۱-.

جدول (۲) ترتیب عمل کرد کلیدها.

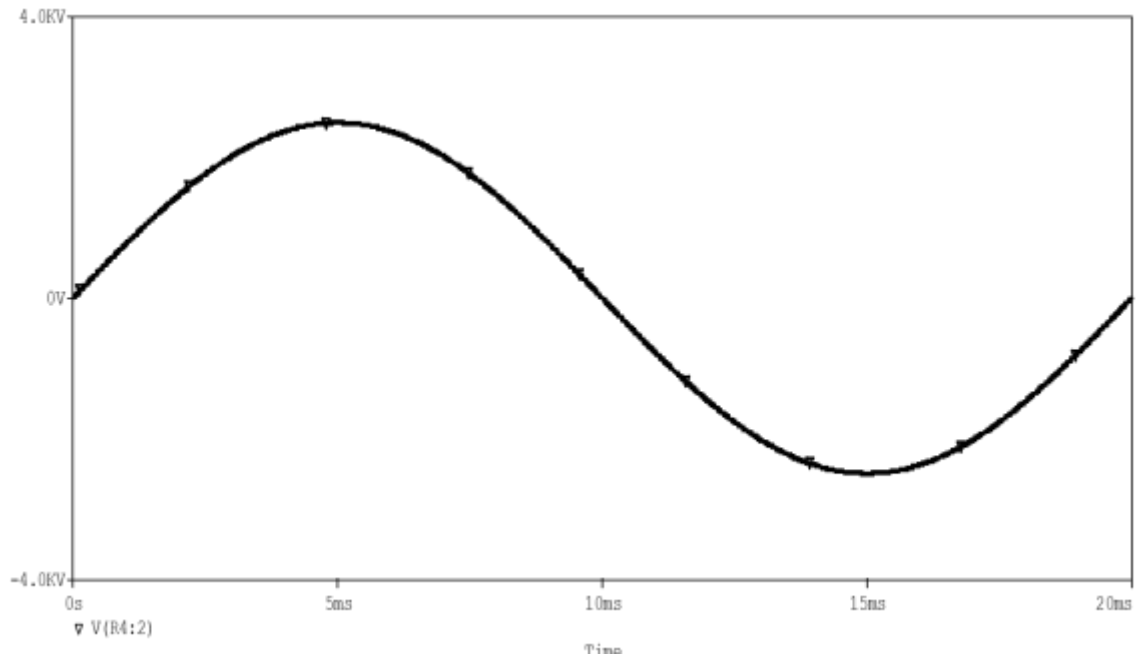
	+۳	+۲	+۱	۰	-۱	-۲	-۳	۰
Q1	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
Q2	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
Q3	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
Q4	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
Q5	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
Q6	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
Q7	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰
Q8	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰



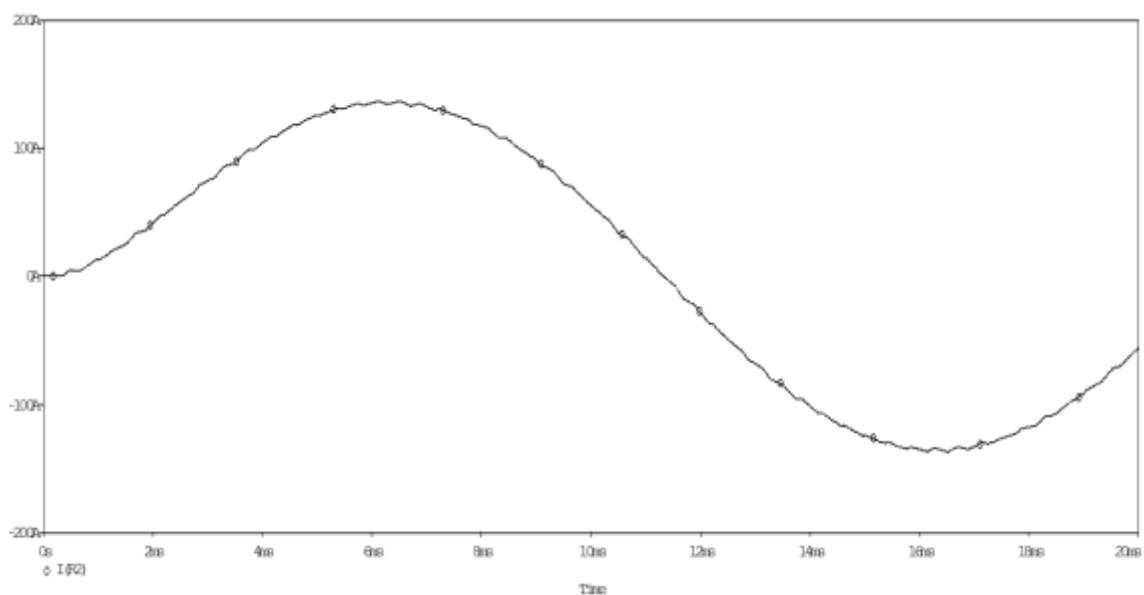
شکل (۱۶) مدار شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار PSpice.



شکل (۱۷) ولتاژ خروجی مبدل هفت‌سطحی قبل از فیلتر.



شکل (۱۸) ولتاژ خروجی مبدل هفت‌سطحی بعد از فیلتر.



شکل (۱۹) سیگنال جریان خروجی مبدل هفت‌سطحی.

۵ - نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا چند پیکربندی و مقایسه آن‌ها با رویکرد کاربرد در نیروی محرکه الکتریکی کشتی بررسی شده است. با توجه به استانداردهای موجود برای سیستم تحرک الکتریکی یک شناور، مقایسه بین پیکربندی‌ها انجام گردید. معایب و مزیت‌های هر کدام از ساختارها بررسی شد. سپس نمونه‌ای از مدار پیشنهادی با ولتاژ ۳۳۰۰ ولت و جریان ۱۲۰ آمپر در نرم‌افزار PSpice شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، پیکربندی ارائه شده دارای مزایایی از جمله

جدول (۴) پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار یا نوع
ولتاژ ورودی	$1100\text{VDC} \times 3$
نوع IGBT	CM200DY-34A
فرکانس کلیدزنی	۵ kHz
میزان بار خروجی	$20\ \Omega - 30\ \text{mH}$
میزان ولتاژ خروجی	۶۶۰۰ V _{pp}
میزان جریان خروجی	۲۴۰ A _{pp}
میزان THD ولتاژ خروجی قبل از فیلتر	٪۱۵,۱
میزان THD ولتاژ خروجی بعد از فیلتر	٪۲,۴

- Converter for High Power Applications”, In ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), IEEE, pp.1028-1033, 2013
- [10] Pulikanti, S. R. Konstantinou, G. and Agelidis, V. G., “Hybrid Seven-Level Cascaded Active Neutral-Point-Clamped-based Multilevel Converter Under SHE-PWM”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.60, pp.4794-4804, 2013.
- [11] Hiller, M., Krug, D., Sommer, R. and Rohner, S., “A New Highly Modular Medium Voltage Converter Topology for Industrial Drive Applications”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009.
- [12] Naderi, R. Khoshkbar-Sadigh, A. and Smedley, K., “Dual Flying Capacitor Active Neutral Point Clamped Multilevel Converter”, pp.6476-6484, 2016.
- [13] Ceglia, G., Guzman, V. Sanchez, C., Ibanez, F., Walter, J., and Gimenez, M. I., “A New Simplified Multilevel Inverter Topology for DC&# 8211; AC Conversion”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.21, pp.1311-1319, 2006.
- [14] “SHIPS ELECTRICAL STANDARDS,” 2008.
- [15] Barnum, S. R., and Bridges, J. A., “Naval Engineering in the 21st Century”, Naval Engineers Journal, 2011.
- [16] Harrington, R. L., “Marine Engineering: Society of Naval Architects &, 1992.
- [17] Patel, M. R. Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy: CRC Press, 2012.
- [18] Blank, D. A., “Introduction to Naval Engineering: Naval Inst Pr, 1986.
- [19] Rodríguez, J. Bernet, S. Wu, B. Pontt, J. O., and Kouro, S., “Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.54, pp.2930-2945, 2007.
- [20] Babaei, E., Kangarlu, M. F. and Hosseinzadeh, M., “Asymmetrical Multilevel Converter Topology with Reduced Number of Components”, Power Electronics, IET, Vol.6, pp.1188-1196, 2013.
- [21] Andler, D., Kouro, S., Perez, M. Rodríguez, J. and Wu, B., “Switching Loss Analysis of Modulation Methods Used in Neutral Point Clamped Converters” in Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE IEEE, pp.2565-2571, 2009.
- [22] Hiller, M. Sommer, R. and Beuermann, M., “Converter Topologies and Power Semiconductors for Industrial Medium Voltage Converters”, in Industry Applications Society Annual Meeting, IAS’08 IEEE, pp.1-8, 2008
- [23] Krug, D., and Dieckerhoff, S., “Comparison of State-of-the-Art Voltage Source Converter Topologies for Medium Voltage Applications”, in Industry Applications Conference, 38th IAS
- میزان THD ۲,۴٪ در جریان خروجی ۱۲۰ آمپر است که در مقایسه با ساختارهای مشابه، بهبود قابل قبولی محسوب می‌شود.
- از مزیت‌های دیگر ساختار پیشنهادی، ساده بودن و تعداد کلیدهای کم است. از این رو، کنترل آن ساده و قابلیت اطمینان بیشتری نیز نسبت به ساختارهای مشابه خود دارد که سبب می‌شود هزینه کنترل و نگهداری آن کاهش یابد. به علت این که منابعی که در این پیکربندی استفاده می‌شوند، نیاز به ترانس‌های مجزا برای خط تغذیه ورودی ندارند، حجم مبدل کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Rodriguez, J., Lai, J.S. and Peng F. Z., “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.49, pp.724-738, 2002.
- [2] Filsecker, F., Alvarez, R., and Bernet, S., “The Investigation of a 6.5-kV, 1-kA SiC Diode Module for Medium Voltage Converters”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.29, pp.2272-2280, 2014.
- [3] Debnath, S. and Saeedifard, M. “A New Hybrid Modular Multilevel Converter for Grid Connection of Large Wind Turbines”, Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol.4, pp.1051-1064, 2013.
- [4] Gupta, K. K., Ranjan, A. P., Bhatnagar, L. Sahu, K. and Jain, S. “Multilevel Inverter Topologies with Reduced Device Count: a Review”. Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.31, pp.135-151, 2016.
- [5] Sakthisudhursun, B. Pandit, J. K. and Aware, M., “Simplified Three-Level Five-Phase SVPWM”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.31, pp.2429-2436, 2016.
- [6] Abu-Rub, H., Holtz, J., Rodriguez, J. and Baoming, G., “Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.57, pp.2581-2596, 2010.
- [7] Rodriguez, J., Bernet, S. Steimer, P. K. and Lizama, I. E., “A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.57, pp.2219-2230, 2010.
- [8] Krug, D. Bernet, S. Fazel, S. S. Jalili, K. and Malinowski, M., “Comparison of 2.3-kV Medium-Voltage Multilevel Converters for Industrial Medium-Voltage Drives,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.54, pp.2979-2992, 2007.
- [9] Kouro, S., Perez, M., Rodriguez, J., and Wu, B., “Four-Level Medium Voltage Multilevel

- Annual Meeting. Conference Record of the , pp.168-175, 2003
- [24] Blooming, T. M. and Carnovale, D. J., "Application of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits", in Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of Annual, pp.1-9, 2006.
- [25] "MIL-STD-2036A", 1993.
- [26] "MIL-PRF-32168", 2004.
- [27] Lezana, P., Pou, J. Meynard, T. A., Rodriguez, J. Ceballos, S. and Richardeau, F., "Survey on Fault Operation on Multilevel Inverters", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.57, pp.2207-2218, 2010.
- [28] Galván, J. I. L. and Franquelo, L., "Multilevel Converters: Topologies, Modeling, Space Vector Modulation Techniques and Optimizations", phd, Tese de Doutorado apresentada para a Universidade de Sevilla, 2006.
- [29] Bin, W., "High Power Converters and AC Drives", Jon Willy & Sons, 2006.
- [30] Steimer, P. K. and Manjrekar, M. D., "Practical Medium Voltage Converter Topologies for High Power Applications", in Industry Applications Conference, 36 IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, pp.1723-1730, 2001.
- [31] Bruckner, T. and Bernet, S., "The Active NPC Converter for Medium-Voltage Applications", in Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record, pp.84-91, 2005.
- [32] Narimani, M. Yaramasu, V., Wu, B., Zargari, N., Cheng, G., and Moschopoulos, G., "A Simple Method for Capacitor Voltages Balancing of Diode-Clamped Multilevel converters using space vector modulation," in Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, pp. 310-315, 2013.
- [33] Zabaleta, M. Burguete, E., Madariaga, D., Zubimendi, I., Zubiaga, M. and Larrazabal, I., "LCL Grid Filter Design of a Multimegawatt Medium-Voltage Converter for Offshore Wind Turbine Using SHEPWM Modulation", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.31, pp.1993-2001, 2016.