

مبدل ۲۴ AC-DC پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی به منظور بهبود شاخص های کیفیت توان

روح الله عبدالله^۱ علیرضا جلیلیان^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

rohollah.abdollahi@yahoo.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

jalilian@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتوری چنگالی به منظور بهبود شاخص های کیفیت توان طراحی، مدلسازی و شبیه سازی شده است. استفاده از ساختار اتوترانسفورماتور باعث کاهش نرخ کیلوولت آمپر طرح پیشنهادی نسبت به طرح مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی می شود. بدلیل انعطاف پذیری مناسب اتوترانسفورماتور پیشنهادی، می توان از این مبدل در کاربردهای جایگزین نیز به آسانی استفاده نمود. همچنین مبدل پیشنهادی در مقایسه با مبدل های ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور موجود عملکرد مناسب تری را در بهبود شاخص های کیفیت توان از خود نشان می دهد به طوری که اعوجاج هارمونیکی کل جریان در مبدل پیشنهادی بین ۵٪ در بار سبک تا ۲٪ در بار کامل تغییر می نماید در صورتی که این فاکتور در مبدل های ۲۴ پالسه اتوترانسفورماتوری موجود بین ۴٪ تا ۸٪ تغییر می نماید. در این مقاله یک سری از شاخص های کیفیت توان و نرخ کیلو ولت آمپر و در نتیجه هزینه مورد نیاز برای ساخت مبدل ۲۴ پالسه ترانسفورماتوری و اتوترانسفورماتور چنگالی، مورد مقایسه قرار گرفته است. مبدل های مورد بررسی در تغذیه محرکه موتور القایی در محیط نرم افزار MATLAB و با استفاده از SIMULINK و توسط بلوک ترانسفورماتور چند سیم بیچه، مدلسازی و شبیه سازی شده اند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مبدل پیشنهادی در خصوص بهبود شاخص های کیفیت توان نتایجی یکسان با مبدل مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی و مناسب تر از مبدل های اتوترانسفورماتوری موجود از خود نشان می دهد و توانایی برآورده نمودن ملزومات استاندارد IEEE-519 ($THDi < 5\%$) را در بارهای متغیر دارد، همچنین ضریب توان را در رنج وسیعی از عملکرد مبدل به نزدیکی مقدار واحد می رساند. با این تفاوت که نرخ کیلوولت آمپر مورد نیاز برای مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی حدود ۱۴۶/۶۲٪ بشد در صورتی که این نرخ در مبدل پیشنهادی برابر ۸۷/۱۲٪ بار نامی است که منجر به کاهش اندازه، وزن و در نهایت هزینه مبدل پیشنهادی نسبت به مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور می گردد.

کلمات کلیدی: اتوترانسفورماتور چنگالی (Fork)، شاخص های کیفیت توان، مبدل ۲۴ AC-DC پالسه، محرکه موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۹/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۰۴/۱۷

نام نویسندهی مسئول: علیرضا جلیلیان

نشانی نویسندهی مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکدهی برق



۱- مقدمه

ساختارهای متفاوت مبدل‌های AC-DC، ۱۲ پالسه اتوترانسفورماتوری در دستیابی به محدودیت اعوجاج هارمونیکی کل (THD) در جریان تغذیه به کمتر از ۵٪ که در استاندارد IEEE-519 تعیین شده، موفق نبوده‌اند، که برای دستیابی به محدودیت استاندارد IEEE-519 نیاز به استفاده از یک فیلتر موازی اضافی شده است. افزایش تعداد پالس نتایج دیگری نیز در بهبود شاخص‌های کیفیت توان به همراه دارد از جمله ضریب اعوجاج و ضریب توان را نیز بهبود می‌بخشد [۱۰].

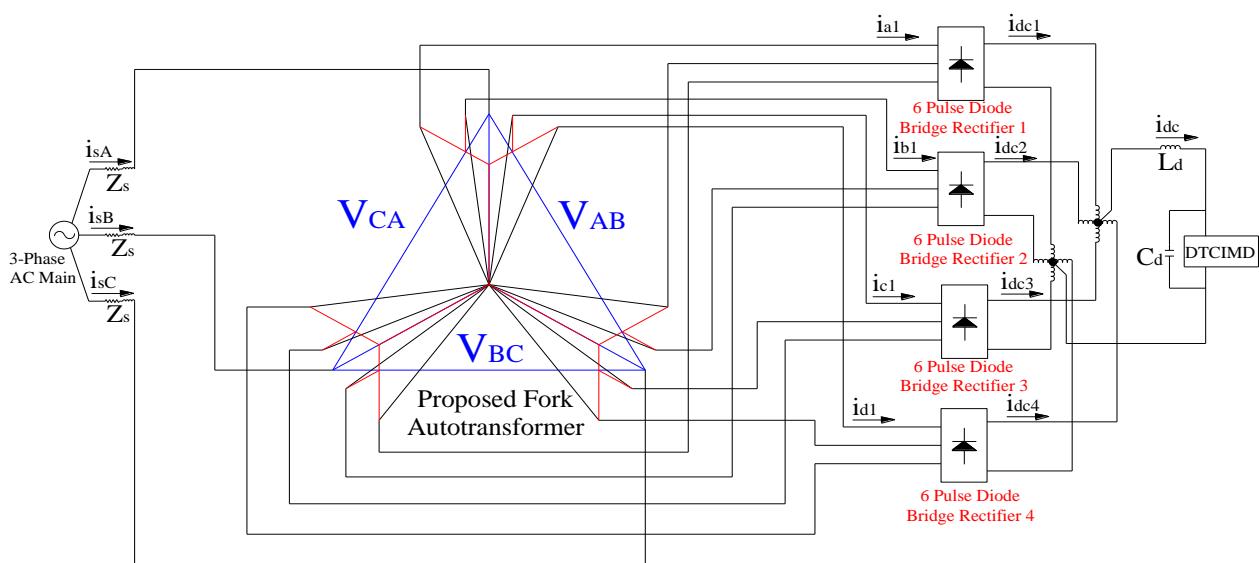
در مراجع [۱۱] تا [۱۴] مبدل‌های AC-DC ۱۸ پالسه مبتنی بر ساختارهای اتوترانسفورماتور چندوجهی، شش گوشه، ستاره و T، به ترتیب ارائه شده است که اعوجاج هارمونیکی کل جریان در بار کامل حدود ۵٪ و در بار سبک ۲۰٪ (بار کامل) حدود ۹٪ می‌باشد. همچنین در مراجع [۱۵] تا [۱۸] مبدل‌های AC-DC ۲۴ پالسه بر مبنای اتوترانسفورماتور چندوجهی، شش گوشه، ستاره و T ارائه شده است که اعوجاج هارمونیکی کل جریان در بار کامل حدود ۴٪ و در بار سبک ۸٪ می‌باشد. که در بار سبک ملزمات استاندارد IEEE-519 (THD < 5٪) را برآورده نمی‌نماید.

در مرجع [۱۹] یک مبدل ۲۴ پالسه بر مبنای ترانسفورماتور چنگالی با نرخ کیلوولت آمپر بالا ارائه شده است به منظور کاهش نرخ کیلوولت آمپر در این مقاله یک مبدل ۲۴ پالسه، مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی طراحی شده است. برای مدل‌سازی مبدل‌ها از ترانسفورماتور چندسیم پیچه استفاده شده است. مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی با مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور [۱۹] در تغذیه محرکه موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور در نرم افزار MATLAB و در محیط SIMULINK شبیه‌سازی و از دیدگاه شاخص‌های کیفیت توان و نرخ کیلو ولت آمپر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

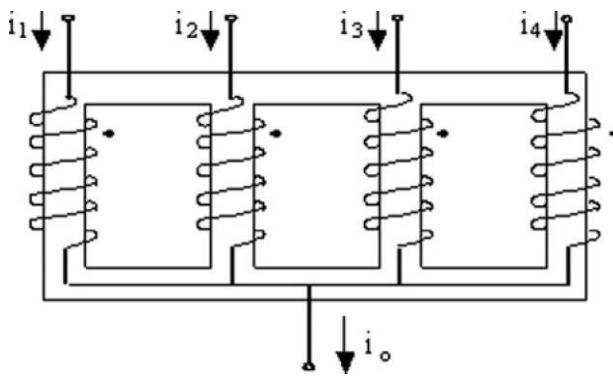
محرکه‌های موتور القایی به طور گسترده در کاربردهای نظیر تهویه مطبوع هوا، دمنده‌ها، پمپ‌ها و غیره استفاده می‌شود [۱]. محرکه موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور از اینورتر منبع ولتاژ مبتنی بر IGBT که معمولاً از یک پل دیودی یکسوکننده شش پالسه تغذیه می‌شود، استفاده می‌نماید [۲ و ۳]. یکسوکننده پل دیودی ۶ پالسه، مشکلاتی مانند ضریب توان پایین و تزریق هارمونیک به جریان خط اصلی را موجب می‌شود. استانداردهای نظیر IEEE-519 برای کاهش هارمونیک جریان اصلی شکل گرفته‌اند تا اغتشاشات جریان و ولتاژ را محدود کنند [۴].

روش‌های متفاوتی بر مبنای قاعده افزایش تعداد فاز در مبدل‌های AC-DC در مجلات و مقالات گزارش شده است. این روش‌ها از دو یا تعداد بیشتری مبدل با شیفت فاز مناسب استفاده می‌نمایند، به طوری که هارمونیک‌های تولیدی به وسیله یک مبدل را توسط مبدل‌های دیگر حذف می‌نمایند. در مراجع [۵] و [۶] مبدل‌های چند پالسه بر

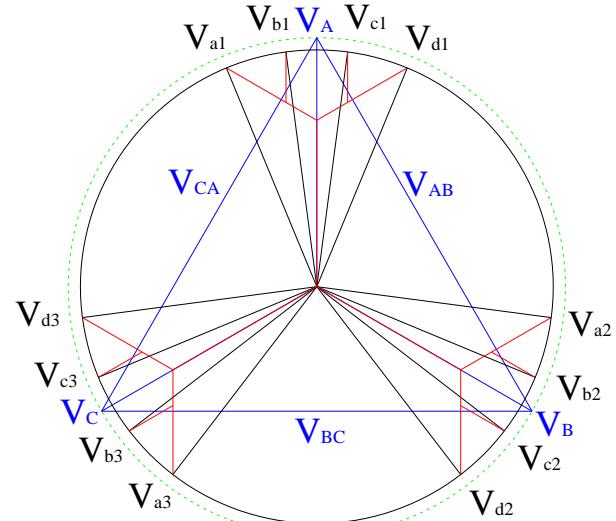
مبنا اتوترانسفورماتور با نرخ کیلو ولت آمپر بالا ارائه شده اند. در مرجع [۷] یک مبدل چند پالسه با استفاده از ترانسفورماتور چند وجهی و با نرخ کیلو ولت آمپر کاهش یافته ارائه شده است. برای کاهش نرخ کیلو ولت آمپر ترانسفورماتور، مبدل‌های چند پالسه بر اتوترانسفورماتور اتصال سیم پیچ‌ها با یکدیگر در مجاورت با مواد مغناطیسی فقط با نسبت کم از کیلو ولت آمپر نامی انجام می‌پذیرد. این طرح اتوترانسفورماتوری اندازه و وزن ترانسفورماتور را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.



شکل (۱): ساختار مبدل DC-AC ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی (Fork)



شکل (۴): ساختار سیم پیچی ترانسفورماتور با سروسط برای مبدل پیشنهادی [۲۱]



شکل (۳): نحوه اتصالات و دیاگرام فازوری اتوترانسفورماتور چنگالی برای کاربردهای جایگزین

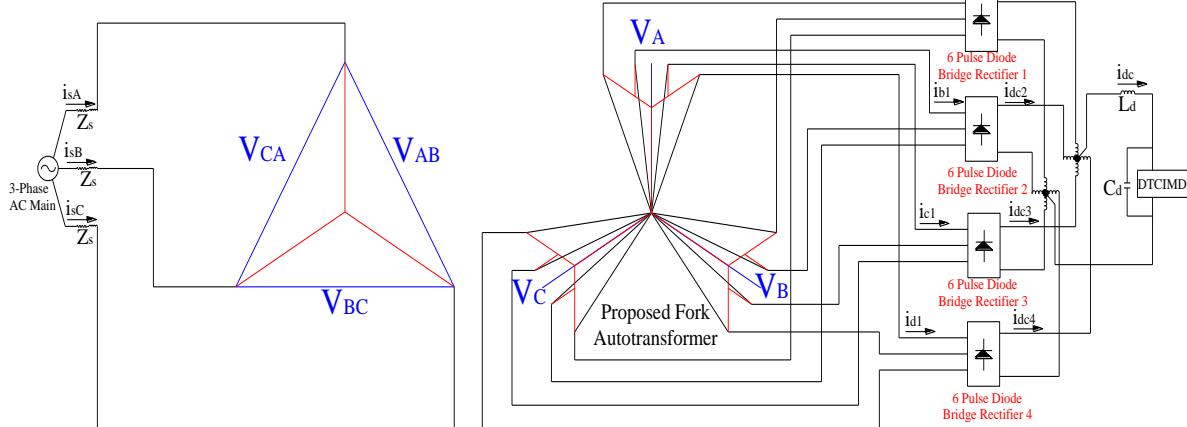
۳- طراحی مبدل برای کاربردهای جایگزین

بدلیل عملکرد ۲۴ پالسه مبدل پیشنهادی ولتاژ لینک DC حدود ۱۰۵٪ برابر مقدار ولتاژ لینک DC مبدل ۶ پالسه دیوودی می شود. برای استفاده از مبدل پیشنهادی در کاربردهای جایگزین (کاربردهای که دقیقاً به ولتاژ لینک DC برابر با مبدل ۶ پالسه دیوودی نیاز دارند) طراحی مبدل پیشنهادی باید به طور مناسب اصلاح گردد، برای این منظور سطح ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور چنگالی باید به اندازه ۰۰۵ کاهش یابد. با توجه به شکل (۳) و روابط (۱) تا (۳) مقادیر اصلاح شده ضرلیب برای عملکرد مبدل پیشنهادی در کاربردهای جایگزین به صورت زیر محاسبه می شود.

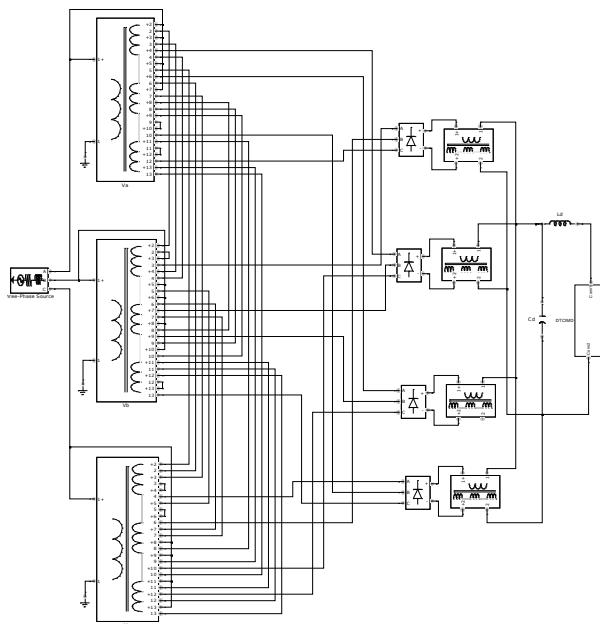
$$K_1 = 0.3309, K_2 = 0.1434, K_3 = 0.2771, K_4 = 0.2029 \quad (6)$$

۵- شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB

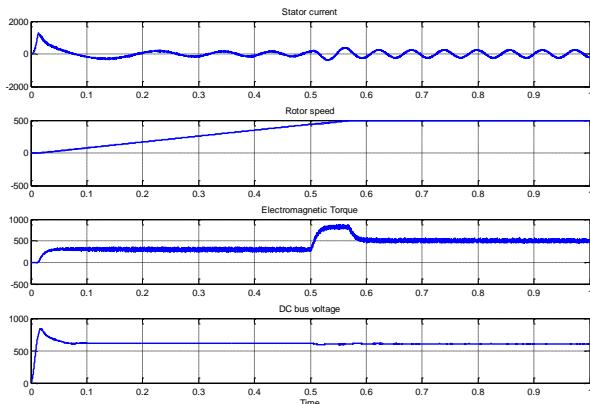
در شکل (۵) ساختار مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی در ارائه شده در مرجع [۱۹] به منظور مقایسه با ساختار پیشنهادی آورده شده است.



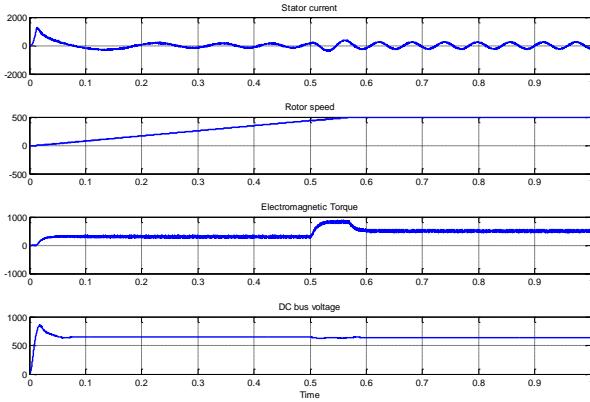
شکل (۵): ساختار مبدل ۲۴ AC-DC ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی [۱۹]



شکل (۷): مدل MATLAB مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی



شکل (۸): پاسخ دینامیکی مبدل ۶ پالسه دیود به عنوان تغذیه کننده DTCIMD برای بار متغیر

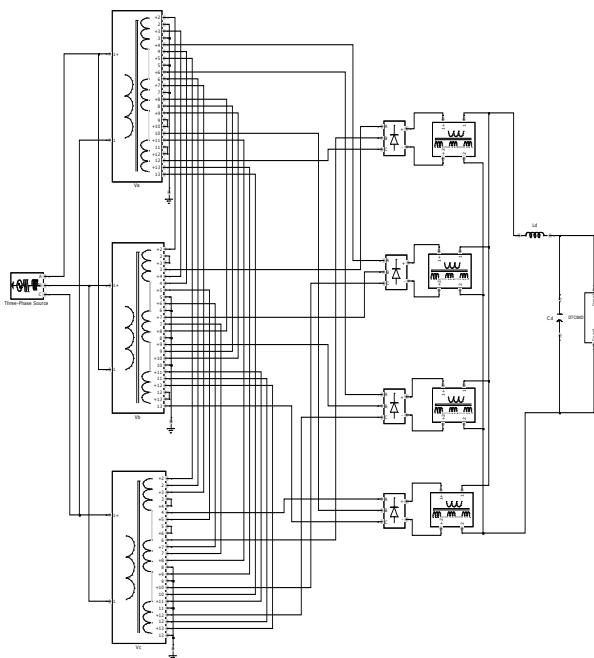


شکل (۹): پاسخ دینامیکی مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی به عنوان تغذیه کننده DTCIMD برای بار متغیر

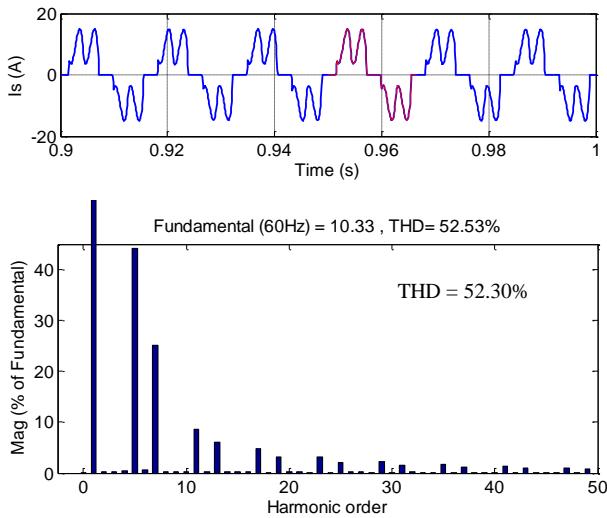
مبدل ۲۴، AC-DC، ۲۴ پالسه پیشنهادی و مبدل مبتنی بر ترانسفورماتور [۱۹] در تغذیه DTCIMD توسط متلب و با استفاده از ترانسفورماتور Power system (PSB) چندسیم پیچه در محیط سیمولینک و باکس (block) چنانچه در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده، شبیه سازی شده است.

این شکل ها مدل اتصال منبع تغذیه سه فاز به مبدل های ۲۴ پالسه AC-DC را نشان می دهد. این مبدل های AC-DC، ۲۴ پالسه به یک فیلتر LC در خط DC که توان VSI بر پایه IGBT را تامین می نماید، وصل شده اند. پالس های ورودی اینورتر به وسیله کنترل مستقیم گشتاور تولید می شوند، که از سرعت موتور و جریان به عنوان ورودی استفاده می کند. سیستم مبدل AC-DC از ۴۶۰ V ۶۰ HZ AC و ۴ P، ۵۰ HP موتور سه فاز ۴۶۰ و اتصال ستاره می باشد.

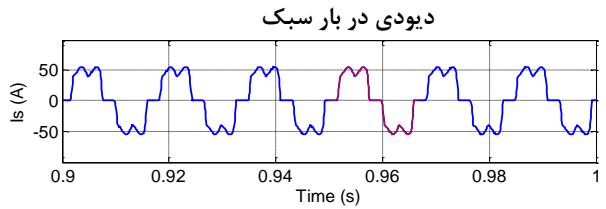
پاسخ دینامیکی (شکل موج آسا جریان منبع، سرعت، گشتاور الکترومغناطیسی، ولتاژ DC) مبدل ۶ پالسه دیودی و مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی در شکل های (۸) و (۹) به ترتیب نشان داده شده است که نشان دهنده عملکرد مشابه مبدل پیشنهادی و مبدل ۶ پالسه دیودی در بحث کنترلی می باشد. همچنین نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی در مورد مبدل پیشنهادی نسبت به مبدل ۶ پالسه دیودی کاهش یافته که باعث بهبود عملکرد دینامیکی محرکه موتور القایی می گردد.



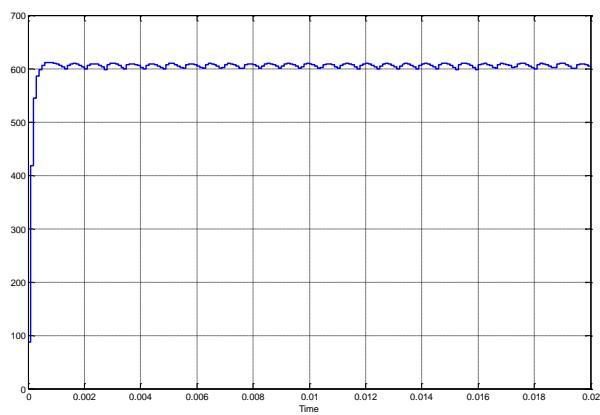
شکل (۶): مدل MATLAB مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی



شکل (۱۱): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۶ پالسه



شکل (۱۲): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۶ پالسه دیوودی در بار کامل



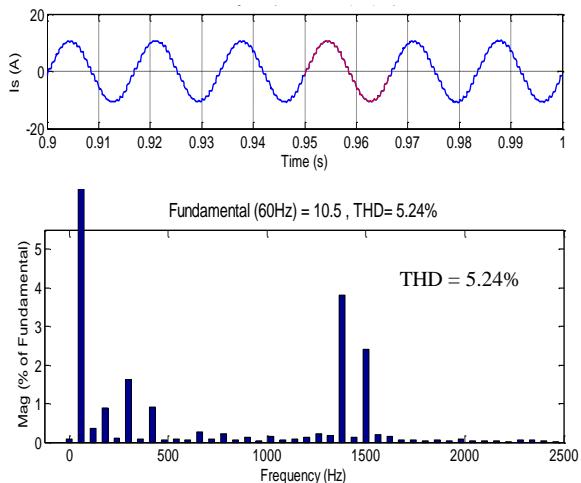
شکل (۱۰): شکل موج ولتاژ خروجی مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی

شکل (۱۰) شکل موج ولتاژ خروجی مبدل ۲۴ پالسه را نشان می دهد، که تایید کننده روش استفاده شده به منظور مدلسازی و شبیه سازی در این مقاله می باشد. فهرست شاخص های کیفیت توان نظری THD جریان تغذیه (THD_i)، THD ولتاژ تغذیه (THD_v)، فاکتور اغتشاش (DF)، فاکتور جابجایی توان (PDF) و فاکتور توان کلی (TPF)، بدست آمده از شبیه سازی مبدل های AC-DC ۲۴ پالسه پیشنهادی و مبدل ۶ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی در تغذیه محرك موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور در جدول (۱) نشان داده شده است.

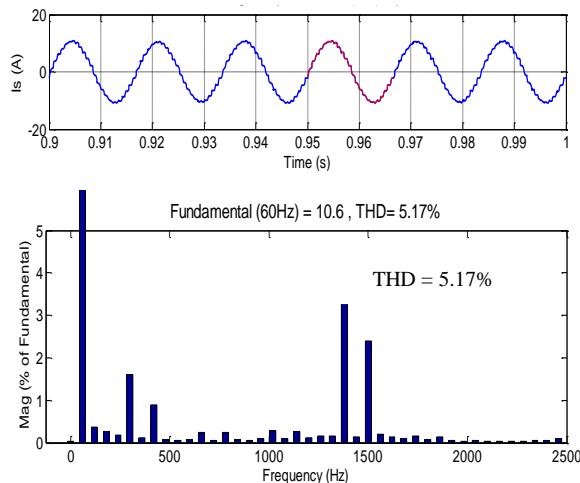
شکل های (۱۱) و (۱۲) شکل موج جریان ورودی و طیف هارمونیکی مبدل ۶ پالسه به ترتیب در کم باری (معادل ۲۰٪ بار نامی) و بار کامل نشان می دهد، که به روشنی هارمونیک های غالب ۵ و ۷ و سایر هارمونیک های $6n \pm 1$ که n یک عدد طبیعی است را نشان می دهد.

جدول (۱): مقایسه ای بین شاخص های کیفیت توان مبدل ۶ پالسه و ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی و اتوترانسفورماتور چنگالی در تغذیه DTCIMD

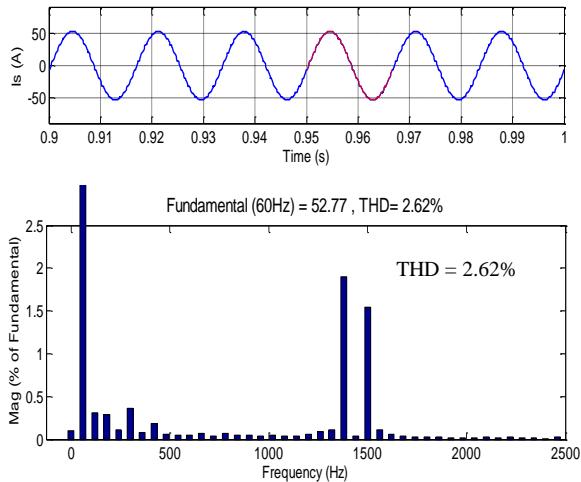
DC ولتاژ		ضریب توان کلی		ضریب توان جابجایی		ضریب اعوجاج		اعوجاج هارمونیکی کل جریان شبکه٪		جریان خط AC		اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ شبکه٪		ساختار مبدل
بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	بار کامل	بار سبک	
۶۰۷/۶	۶۱۶/۶	۰/۹۴۸	۰/۸۷۲	۰/۹۸۸۱	۰/۹۸۵	۰/۹۵۹۹	۰/۸۸۴۰	۲۸/۵۳	۵۲/۵۳	۵۲/۶۹	۱۰/۳۳	۵/۶۳	۶ پالسه	
۶۳۸/۳	۶۴۶/۶	۰/۹۹۱	۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۴۸	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۶	۲/۶۰	۵/۱۷	۵۲/۶۸	۱۰/۶۳	۱/۹۲	۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی	
۶۰۷/۲	۶۱۶/۴	۰/۹۹۱	۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۴۸	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۶	۲/۶۲	۵/۲۴	۵۲/۶۲	۱۰/۵۱	۱/۹۲	۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی	



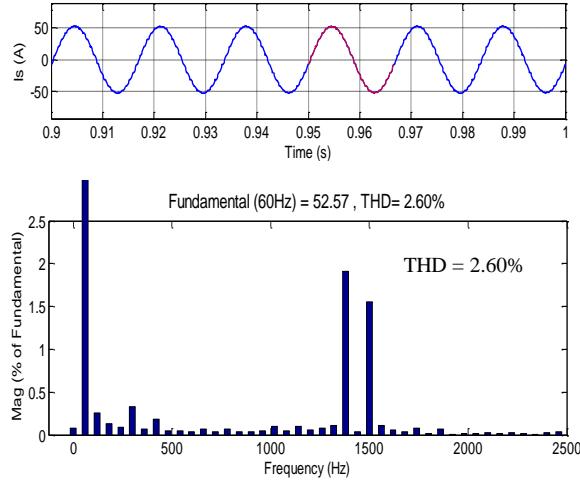
شکل (۱۵): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی در بار سبک



شکل (۱۳): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی در بار سبک



شکل (۱۶): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی در بار کامل



شکل (۱۴): شکل موج و طیف هارمونیکی جریان ورودی مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی در بار کامل

جدول (۲): مقایسه ای بین کیلوولت آمپر مورد نیاز مبدل-AC، ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتوری و اتوترانسفورماتور چنگالی

نرخ مغناطیس- شوندگی کل (٪/بار)	نرخ ترانسفورماتور سر وسط (٪/بار)	نرخ ترانسفورماتور اصلی (٪/بار)	ساختمان ۲۴ پالسه مبتنی بر
۱۴۶/۶۲	۱۰/۵۹	۱۳۶/۰۳	ترانسفورماتور چنگالی
۸۷/۱۳	۱۰/۹۲	۷۶/۲۱	اتوترانسفورماتور چنگالی

اعوجاج هارمونیکی کل جریان در مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی در بار سبک (۲۰٪ بار کامل) و بار کامل (شکل های (۱۳) و (۱۴)) به ترتیب ۵/۱۷٪ و ۲/۶۰٪ می باشد، مقدار اعوجاج هارمونیکی کل جریان در مورد مبدل پیشنهادی در بار سبک و بار کامل شکل های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب ۵/۲۴٪ و ۲/۶۲٪ می باشد که نشان دهنده کارایی بالا و یکسان مبدل پیشنهادی در بهبودی شاخص های کیفیت توان در مقایسه با مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی البته با نرخ کیلوولت آمپر کمتر می باشد. ضریب توان کلی در مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی در بار کامل برابر ۰/۹۹۳۵٪ و در بار سبک برابر ۰/۹۹۱۸٪ می باشد که نشان دهنده توانایی بالای مبدل پیشنهادی در نزدیک نمودن مقدار ضریب توان به مقدار واحد می باشد. مقایسه کیلو ولت آمپر مورد نیاز مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور و اتوترانسفورماتور چنگالی در جدول (۲) ارائه شده است.

۶- نتیجه گیری

- [11] B. Singh, and V. Garg, "Eighteen-Pulse AC-DC Converter for Harmonic Mitigation in Vector Controlled Induction Motor Drives," in Proc. IEEE Conf. Power Electron. Drives Syst.
- [12] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "Autotransformer Based Nine-Phase AC-DC Converter for Harmonic Mitigation in Induction Motor drives," in IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2006.
- [13] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "Harmonic Mitigation in AC-DC Converters for Vector Controlled Induction Motor Drives" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, no. 3, pp. 637 - 646, Sept. 2007.
- [14] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "A novel T-connected autotransformer based 18-pulse AC-DC converter for harmonic mitigation in adjustable speed induction motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 5, pp. 2500-2511, Oct. 2007.
- [15] B. Singh, G. Bhuvaneswari, V. Garg, and S. Gairola, "Pulse multiplication in ac-dc converters for harmonic mitigation in vector controlled induction motor drives," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 21, no. 2, pp.342-352, Jun. 2006.
- [16] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "Polygon-Connected Autotransformer-Based 24-Pulse AC-DC Converter for Vector-Controlled Induction-Motor Drives" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 1, pp.197-208, January 2008.
- [17] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "Harmonic Mitigation in AC-DC Converters for Vector Controlled Induction Motor Drives" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, no. 3, pp. 637 - 646, Sep. 2007.
- [18] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "Harmonic Mitigation in AC-DC Converters for Vector Controlled Induction Motor Drives" in Proc. IEEE Conf. Power Electron. Drives Syst. PEDS, 2005.
- [19] B. Singh, and S. Gairola, "A Fork Connected Transformer Based 24-Pulse AC-DC Converter" in Proc. IEEE Conf. Power Electronics. IICPE, 2006.
- [20] G. Seguier, Power Electronic Converters AC/DC Conversion. NewYork: McGraw-Hill, 1986.
- [21] V. Garg, B. Singh, and G. Bhuvaneswari,, "24-pulse ac-dc converter for harmonic mitigation" in IET Power Electronics, 2008.
- در این مقاله یک مدل AC-DC ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی با نرخ کیلوولت آمپر کاهش یافته و مناسب برای کاربردهای جایگزین طراحی، مدلسازی و شبیه سازی شده است. روش طراحی استفاده شده در مورد اتوترانسفورماتور، انعطاف‌پذیری مناسبی را در تغییر ولتاژهای خروجی از خود نشان می‌دهد، به طوری که ولتاژ لینک DC مدل پیشنهادی و مبدل ۶ پالسه دیوید در شرليط بار متغیر يكسان می باشد و می توان به راحتی از مبدل پیشنهادی در کاربردهای جایگزین استفاده نمود.
- مبدل ۲۴ پالسه پیشنهادی یک کیفیت بهبود یافته و مشابه مبدل می‌باشد که بر ترانسفورماتور چنگالی را در خصوص شاخص‌های کیفیت توان در مقایسه با مبدل ۶ پالسه معمول از خود نشان می‌دهد. حربیان ورودی برای مبدل‌های ۲۴ پالسه در بارهای متغیر حدود ۵٪ شده است که ملزمات استاندارد IEEE-519 را برآورده می‌نماید.
- نرخ کیلو ولت آمپر مورد نیاز برای مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چنگالی $146/62\%$ بار نامی در صورتی که برای مبدل ۲۴ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چنگالی $87/12\%$ بار نامی می‌باشد که نشان دهنده کاهش نرخ کیلو ولت آمپر و در نتیجه کاهش ظرفیت، اندازه، وزن و در نهایت هزینه در مبدل پیشنهادی می‌باشد.

مراجع

- [1] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 1998.
- [2] B. K. Bose, "Recent advances in power electronics," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, no. 1, pp. 2-16, Jan. 1992.
- [۳] جعفر سلطانی، حمیدرضا امینی، حسین ابوتراپی زارچی، "کنترل مستقیم SVM گشتاور و شار موتور سنتکرون رلوکتانسی سه فاز تغذیه شده با اینورتر دو سطحی سه فاز چهارکلیدی با بکارگیری کنترل کننده لغزشی" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳۸۵، شماره ۱.
- [4] IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters, IEEE Std. 519-1992, 1992.
- [5] D. A. Paice, "Transformers for multipulse AC/DC converters," U.S. Patent 6 101 113, Aug. 8, 2000.
- [6] G. L. Skibinski, N. Guskov, and D. Zhou, "Cost effective multi-pulse transformer solutions for harmonic mitigation in AC drives," in Conf. Rec. IAS Annu. Meeting, Oct. 2003, vol. 3, pp. 1488-1497.
- [7] S. Choi, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier type utility interface," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, no. 5, pp. 680-689, Sep. 1996.
- [8] D. A. Paice, Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power. New York: IEEE Press, 1996.
- [9] D. A. Paice, "Multipulse converter system," U.S. Patent 4 876 634, Oct. 24, 1989.
- [10] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "Harmonic Mitigation Using 12-Pulse AC-DC Converter in Vector-Controlled Induction Motor Drives," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 21, no. 3, July.2006.