

رکتیفایر ۳۶ پالسه جدید با نرخ کیلو ولت آمپر کم به منظور کاهش اعوجاج هارمونیک جریان ورودی

روح اله عبداللهی^۱ مرتضی عبدالحسینی^۲

۱- مربی - گروه مهندسی برق - دانشگاه فنی و حرفه ای - تهران - ایران
abdollahi@tvu.ac.ir

۲- مربی - گروه مهندسی برق - دانشگاه فنی و حرفه ای - تهران - ایران
morteza_ab86@yahoo.com

چکیده: همواره افزایش تعداد پالس در رکتیفایرهای چندپالسه منجر به کاهش اعوجاج های هارمونیکي جریان می شود، اما این افزایش تعداد پالس منجر به افزایش نرخ کیلو ولت آمپر، هزینه و پیچیدگی رکتیفایر چند پالسه می گردد. در نتیجه در کاربردهای صنعتی عمدتاً رکتیفایرهای ۱۲ پالسه بدلیل ساختار ترانسفورماتور ساده، نرخ کیلو ولت آمپر و هزینه کمتر نسبت به سایر رکتیفایرهای چندپالسه مورد استفاده قرار می گیرد. لازم به ذکر است رکتیفایرهای ۱۲ پالسه توانایی برآورده نمودن محدودیت ها و الزامات استاندارد IEEE Std. 519 یعنی اعوجاج هارمونیکي جریان ورودی کمتر از ۵٪ را ندارد لذا نیازمند استفاده از فیلترهای فعال و یا غیر فعال به منظور برآورده نمودن الزامات استاندارد می باشد. در سال های اخیر به منظور افزایش تعداد پالس در رکتیفایرهای ۱۲ پالسه و کاهش اعوجاج هارمونیک جریان ورودی، بدون افزایش هزینه و پیچیدگی، تکنیک چند برابر کننده های تعداد پالس مطرح شده است. در این مقاله به منظور ارتقا ساختار رکتیفایر ۱۲ پالسه به ۳۶ پالسه، یک مدار سه برابر کننده تعداد پالس با نرخ کیلو ولت آمپر بسیار ناچیز (کیلو ولت آمپر معادل ۱/۳۴ درصد بار نامی) ارائه شده است. همچنین اتوترانسفورماتور ۱۲ فازه مورد استفاده در ساختار پیشنهادی مبتنی بر اتصال چند وجهی با نرخ کیلو ولت آمپر بسیار کم می باشد. در نتیجه نرخ کیلو ولت آمپر کل رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی حدود ۲۴ درصد کیلو ولت آمپر بار نامی می باشد که در مقایسه با ساختارهای مشابه بسیار کمتر است. همچنین با توجه به نتایج شبیه سازی، اعوجاج هارمونیکي کل جریان ورودی در رکتیفایر پیشنهادی، کمتر از ۳٪ می باشد.

واژه های کلیدی: رکتیفایر ۳۶ پالسه، مدار سه برابر کننده تعداد پالس، اعوجاج هارمونیکي کل جریان

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.81

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

نام نویسنده ی مسئول: روح اله عبداللهی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - تهران - میدان ونک - خیابان برزیل شرقی - پلاک ۴ - ساختمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه ای

۱- مقدمه

رکتیفایر ۴۰ پالسه [۹]، شامل یک رکتیفایر ۲۰ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور ۱۰ فازه با جابجایی فاز ۱۸ درجه و اتصال T و یک مدار مسدودکننده توالی صفر به منظور تضمین عملکرد مستقل پل‌های دیودی و یک مدار دوبرابر کننده تعداد پالس متعارف به منظور ارتقا رکتیفایر ۲۰ پالسه به ۴۰ پالسه می‌باشد. لازم به ذکر است ساختار اتوترانسفورماتور ۱۰ فازه، بسیار پیچیده و نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر ۴۰ پالسه [۹] بسیار زیاد و معادل ۶۴٪ بار نامی است. در نتیجه در کاربردهای صنعتی عمدتاً رکتیفایرهای ۱۲ پالسه بدلیل سبک بودن و ساده بودن ترانسفورماتور و در نتیجه نرخ کیلو ولت آمپر و هزینه کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، اعوجاج هارمونیک کل جریان ورودی در رکتیفایرهای ۱۲ پالسه متعارف از لحاظ تئوری حدود ۱۵ درصد است و بدون فیلتر الزامات استانداردهای IEEE Std. 519 and IEC Std. 1000-3 را نمی‌توانند برآورده نماید. به منظور کاهش هارمونیک‌ها و برآورد نمودن الزامات استانداردها با رویکرد کاهش وزن، ابعاد و نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر چندپالسه، چندین روش مبتنی بر مدار کمکی فعال یا غیرفعال در رکتیفایرهای ۱۲ پالسه در مراجع [۱۱-۱۲] گزارش شده است.

در مراجع [۱۳-۲۱] چندین مدار کمکی فعال نصب شده در لینک DC رکتیفایر چندپالسه به عنوان یک روش کارآمد در جهت کاهش هارمونیک ارائه شده است. در [۱۴] یک سلف سر وسط فعال با مدار کمکی که شامل عنصر ذخیره‌سازی انرژی است، در [۱۵] یک مدار تزریق جریان سمت DC و در [۱۶-۱۷] یک سلف سر وسط فعال برای کاهش هارمونیک‌ها استفاده شده است. با این وجود این روش‌ها نمی‌توانند تعداد پالس ولتاژ بار را افزایش دهند. در [۱۸، ۱۹] تکنیک‌های سلف سر وسط فعال نیازمند سیم‌پیچ ثانویه اضافی متصل با یک مدار مدولاسیون پهنای باند کمکی می‌باشند، که منجر به افزایش پیچیدگی، تلفات و هزینه کلی می‌شود. یکی دیگر از تکنیک‌های استفاده از فیلتر قدرت فعال [۲۰] و رکتیفایر ویثنا [۲۱] است که می‌تواند کیفیت توان رکتیفایرهای چندپالسه را افزایش دهد. با این حال، این روش‌ها محدودیت‌هایی مانند پیچیدگی محاسباتی، استراتژی‌های کنترلی پیچیده و دقت در اندازه‌گیری متغیرهای کنترلی را دارند.

در [۲۲-۲۴]، رکتیفایر ۱۲ پالسه با استفاده از مدار کمکی پسو نصب شده در لینک DC ارائه شده است. در این روش، سلف سر وسط با یک سلف تپ‌دار جایگزین شده است. در [۲۳] یک یکسوساز ۱۲ پالسه متصل شده به صورت موازی با یک سلف دوتپ و دو دیود پیشنهاد شده است. هنگامی که از سلف دوتپ استفاده می‌شود، مجموع جریان عبوری از دو دیود متصل شده به سلف دوتپ معادل جریان بار است که در جریان‌های بار بزرگ منجر به افزایش تلفات عبوری از دیودها می‌گردد. به منظور بهبود شاخص‌های کیفیت توان در [۲۵]، یک رکتیفایر ۲۰ پالسه پیشنهاد شده است که البته نرخ کیلو ولت آمپر آن ۳۵/۳٪ کیلو ولت آمپر بار است.

با توسعه مبدل‌های الکترونیک قدرت، اکثر محرک‌های DC با محرک‌های موتورالقایی فرکانس متغیر جایگزین شده است. محرک‌های موتور القایی به‌طور گسترده در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. یکسوکنده پل دیودی ۶ پالسه مورد استفاده در محرک‌های موتور القایی فرکانس متغیر، به دلیل فرایند کلیدزنی مشکلاتی مانند کاهش ضریب توان و تزریق هارمونیک به جریان خط اصلی را موجب می‌شود. این هارمونیک‌های جریان با عبور از امپدانس منبع ایجاد اعوجاج ولتاژ در شکل موج ولتاژ خواهد کرد. هارمونیک‌ها به‌طور کلی مشکلات زیادی را در سیستم قدرت و بر روی تجهیزات، بارهای الکتریکی و بخصوص دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترلی ایجاد می‌کنند. استاندارد‌هایی نظیر IEEE-519 و IEC61000-3-2 برای کاهش هارمونیک جریان اصلی شکل گرفتند تا اغتشاشات جریان و ولتاژ را محدود کنند. به منظور کاهش هارمونیک‌ها دو روش استفاده از فیلتر و روش چند پالسه کردن مبدل‌ها مطرح شده است. کیفیت توان با به کارگیری فیلترهای فعال و غیر فعال می‌تواند بهبود یابد اما استفاده از فیلترهای غیر فعال مشکلاتی نظیر تلفات زیاد، فضای مورد نیاز زیاد، پیچیدگی در طراحی، وابستگی کارایی به تغییرات فرکانس و همچنین فیلترهای فعال نیز مشکلاتی نظیر پیچیدگی و هزینه بسیار بالا و وابستگی به نرخ بار را به همراه دارد. بنابراین روش افزایش تعداد پالس در مبدل می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد هم در بهبود شاخص‌های کیفیت توان، کاهش جریان عبوری از ادوات الکترونیک قدرت و هم در کاهش نرخ کیلو ولت آمپر ترانسفورماتور مطرح و مورد استفاده قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، رکتیفایرهای چندپالسه به علت اعوجاج هارمونیک پایین، ریپل ولتاژ خروجی پایین، پیکربندی ساده، استحکام قوی و اصلاح ضریب توان ذاتی، به منظور بهبود شاخص‌های کیفیت توان در نقطه اتصال مشترک در کاربردهای صنعتی مانند سیستم نیروی محرکه کشتی، سیستم مبدل قدرت هواپیما و انتقال ولتاژ بالای DC با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۳]. طرح‌های مختلفی از رکتیفایرهای ۱۲ پالسه و ۱۸ پالسه به منظور کاهش هارمونیک جریان خط در کاربردهای صنعتی در مراجع [۴-۶] گزارش شده است، اما این طرح‌ها، الزامات استاندارد IEEE Std. 519 را برآورده نمی‌نماید. افزایش تعداد پالس در رکتیفایرهای چندپالسه با استفاده از افزایش تعداد فاز خروجی ترانسفورماتور شیفت فاز، راهکار اصلی طراحی رکتیفایرهای چندپالسه جهت بهبود شاخص‌های کیفیت توان است. با این حال، رکتیفایرهای با تعداد پالس بیشتر نیازمند ترانسفورماتور با تعداد دور سیم‌پیچی زیاد، ابعاد و وزن هسته زیاد و در نتیجه نرخ کیلو ولت آمپر بیشتر، همچنین افزایش تعداد قطعات، پیچیدگی طراحی و در نتیجه افزایش هزینه رکتیفایر چند پالسه می‌شود [۷-۱۰ و ۳۳].

۲- طراحی رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول اتوترانسفورماتور ۱۲ پالسه مبتنی بر اتصال چند وجهی و بخش دوم مدار سه برابر کننده به منظور ارتقا ساختار رکتیفایر ۱۲ پالسه به ۳۶ پالسه می‌باشد.

۲-۱- طراحی اتوترانسفورماتور ۶ فازه مبتنی بر اتوترانسفورماتور چندوجهی

رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی مبتنی بر اتوترانسفورماتور چندوجهی ۶ فازه در شکل ۱ نشان داده شده است. حداقل جابجایی فاز مورد نیاز برای حذف مناسب هارمونیک‌ها به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود:

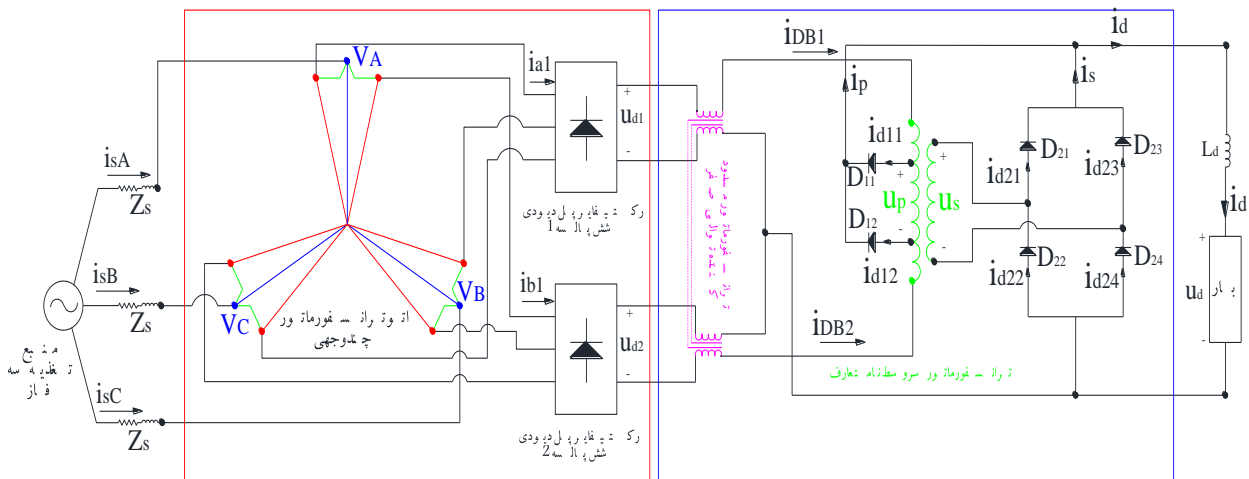
$$(1) \quad \text{تعداد رکتیفایر شش پالس متعارف} / 60^\circ = \text{درجه} = \text{جابجایی فاز}$$

با توجه به اینکه در رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی، دو رکتیفایر ۶ پالسه متعارف استفاده شده است، لذا با توجه به رابطه (۱) جابجایی فاز بین دو سری از ولتاژها می‌بایست ۳۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. اتوترانسفورماتورهای پیشنهادی، ۲ مجموعه ۳ فاز با جابجایی فاز ۳۰ برای هر پل دیودی شش پالس تولید می‌نمایند. نحوه اتصالات و دیگرام برداری اتوترانسفورماتور چندوجهی مورد استفاده در رکتیفایر ۳۶ پالسه در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ساختار و تعداد دور سیم‌پیچی اتوترانسفورماتور در رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی بسیار ساده‌تر و سبک‌تر از ساختار اتوترانسفورماتور مورد استفاده در رکتیفایر ۳۶ پالسه متعارف [۲۸] می‌باشد، که منجر به سادگی ساختار و همچنین کاهش نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در مقایسه با رکتیفایر های ۳۶ پالسه متعارف می‌گردد.

در [۲۶]، یک رکتیفایر ۴۴ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور چندوجهی ۲۲ فازه ارائه شده است. این ساختار به ۴۴ دیود و ترانسفورماتور بسیار پیچیده با تعداد دور زیاد نیاز دارد. همچنین این یکسو کننده دارای ابعاد زیاد، هسته سنگین و همچنین دارای نرخ کیلو ولت آمپر بسیار بالایی و حدود ۴۲٪ است. بنابراین، پیشنهاد شده است که برای برآورده نمودن الزامات استاندارد IEEE-519 می‌بایست از رکتیفایرهای چندپالسه ساده‌تر و سبک‌تر با پیچیدگی و نرخ کیلو ولت آمپر کمتر استفاده شود.

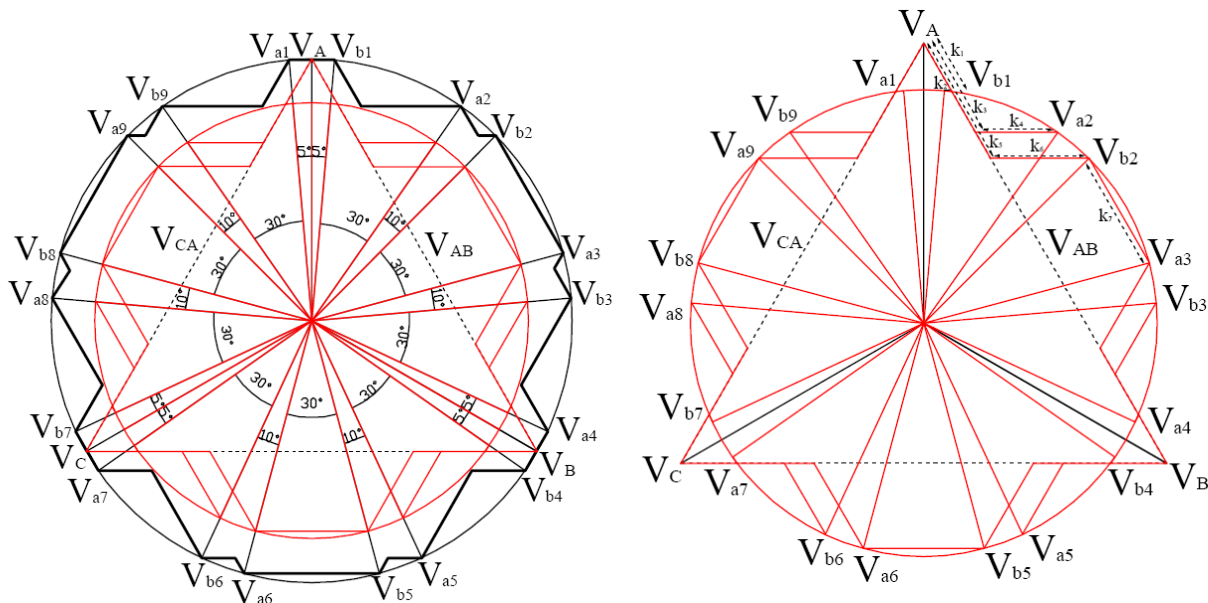
لذا روش کاهش هارمونیک با استفاده از مدارهای چند برابر تعداد پالس یک روش ساده و آسان و ارزان قیمت برای تحقق هدف فوق است. علاوه بر این، با توجه به اینکه قسمت مغناطیسی ترانسفورماتور مورد استفاده در رکتیفایرهای چندپالسه، بخش عمده‌ای از ابعاد، وزن و هزینه رکتیفایرهای چندپالسه را تشکیل می‌دهد لذا در اکثر کاربردهای غیر ایزوله از اتوترانسفورماتور به علت کاهش قسمت مغناطیسی حدود ۸۰٪ نسبت به ترانسفورماتور و در نتیجه کاهش ابعاد، وزن، تلفات و هزینه رکتیفایر چندپالسه استفاده می‌شود. با این رویکرد، در این مقاله یک رکتیفایر ۱۲ پالسه بر مبنای اتوترانسفورماتور چندوجهی با نرخ کیلوولت آمپر، پیچیدگی و هزینه بسیار کم طراحی شده است و سپس با استفاده از مدار سه برابر کننده تعداد پالس با پیچیدگی و هزینه اندک به یک رکتیفایر ۳۶ پالسه بهینه از لحاظ شاخص‌های فنی و اقتصادی نسبت به رکتیفایرهای ۳۶ پالسه موجود [۲۷-۲۹] ارتقا یافته است.



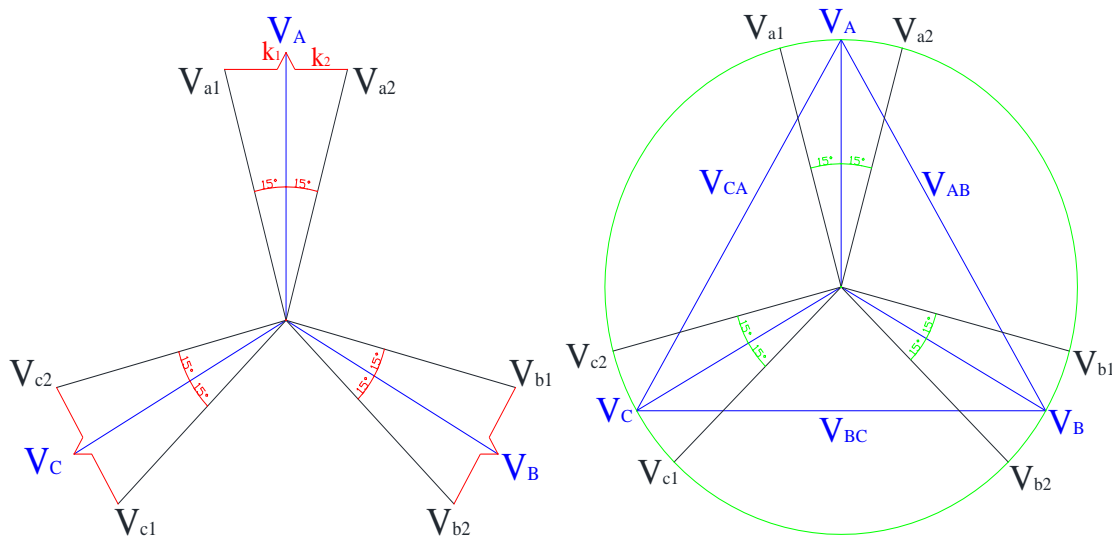
رک ت ی ف ای ر ۱۲ پ ا ل سه

مدار سه برابر رک ت ی ف ای ر ۱۲ پ ا ل سه

شکل (۱): ساختار رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی مبتنی بر اتوترانسفورماتور چندوجهی و مدار سه برابر کننده تعداد پالس



(الف)



(ب)

شکل (۲): نحوه اتصالات و دیاگرام فازوری اتوترانسفورماتور چندوجهی (الف) رکتیفایر ۳۶ پالسه متعارف [۲۸] (ب) رکتیفایر ۳۶ پالسه

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_S \angle 15^\circ, V_{b1} = V_S \angle -105^\circ, V_{c1} = V_S \angle 135^\circ \\ V_{a2} &= V_S \angle -15^\circ, V_{b2} = V_S \angle -135^\circ, V_{c2} = V_S \angle 105^\circ \end{aligned} \quad (۳)$$

ولتاژها برای دو رکتیفایر شش پالسه متعارف عبارتند از :

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_A + K_1 V_{CA} - K_2 V_{BC} \\ V_{a2} &= V_A - K_1 V_{AB} + K_2 V_{BC} \end{aligned} \quad (۴)$$

برای رسیدن به شیفت فاز مطلوب با توجه به معادلات بالا مقادیر ثابت $K_1 - K_2$ محاسبه می شود. بدلیل عملکرد ۳۶ پالسه رکتیفایر پیشنهادی ولتاژ لینک DC حدود ۱/۰۳ برابر مقدار ولتاژ لینک DC رکتیفایر ۶ پالسه متعارف می شود. برای استفاده از مبدل پیشنهادی در

دو رکتیفایر شش پالسه متعارف (پل ۳ پایه ی دیودی) به ۲ مجموعه ۳ فازه خروجی اتوترانسفورماتور که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده اند متصل می شود. این ۲ مجموعه با زاویه ۳۰ درجه از یکدیگر و در زاویه $\pm 15^\circ$ درجه از فاز A قرار داده شده اند.

تعداد دور هر سیم پیچ بوسیله یک تابعی از ولتاژ فاز V_S تعیین می شود. برای رکتیفایر شش پالسه متعارف ۱ و (V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}) برای رکتیفایر شش پالسه متعارف ۲ فرض می شود که ولتاژ سه فاز اعمال شده به سیم پیچها برابر است با:

$$V_A = V_S \angle 0^\circ, V_B = V_S \angle -120^\circ, V_C = V_S \angle 120^\circ \quad (۲)$$

دو سری ولتاژ مورد نیاز برای دو رکتیفایر شش پالسه متعارف عبارتند از :

شکل ۳، شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی اتوترانسفورماتور چندوجهی پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور دو سری ولتاژ با زاویه فاز ۳۰ درجه می‌باشد این دو سری ولتاژ به دو پل دیودی شش پالسه متعارف متصل می‌شود که منجر به ایجاد یک رکتیفایر ۱۲ پالسه می‌گردد سپس این رکتیفایر ۱۲ پالسه با استفاده از مدار سه برابر کننده تعداد پالس به یک رکتیفایر ۳۶ پالسه ارتقا می‌یابد.

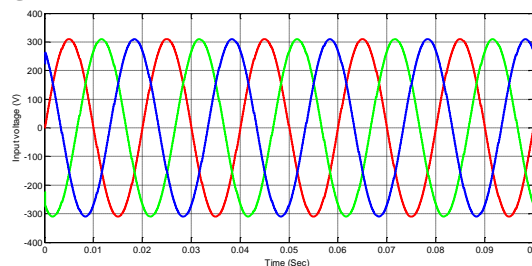
۲-۲- طراحی مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی، به منظور سه برابر کردن تعداد پالس در یکسو کننده ۱۲ پالسه و تبدیل آن به یک یکسوساز ۳۶ پالسه مورد استفاده قرار گرفته است. مدار سه برابر کردن تعداد پالس شامل یک ترانسفورماتور سروسط نامتعارف به همراه دو دیود در سیم پیچ اولیه و چهار دیود متصل به سیم پیچ ثانویه می‌باشد. هنگامی $u_p > 0$ ، دیود D_{11} وصل است و هنگامی که $u_p < 0$ ، دیود D_{12} وصل می‌باشد. همچنین هنگامی که $|u_s| < u_d$ ، دیودهای D_{21} ، D_{22} ، D_{23} و D_{24} در بایاس معکوس و قطع می‌باشند. هنگامی که $u_s > u_d$ ، دیودهای D_{21} و D_{24} در بایاس مستقیم و وصل و دیودهای D_{22} و D_{23} در بایاس معکوس و قطع می‌باشند. هنگامی که $-u_s > u_d$ ، دیودهای D_{21} و D_{24} در بایاس معکوس و قطع و دیودهای D_{22} و D_{23} در بایاس مستقیم و وصل می‌باشند. بنابراین بر مبنای نکات فوق، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی دارای شش حالت عملکردی می‌باشد.

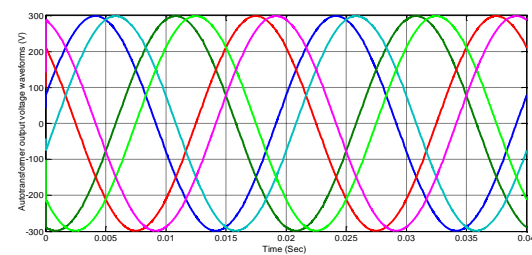
کاربردهای جایگزین (کاربردهایی که دقیقاً به ولتاژ لینک DC برابر با رکتیفایر ۶ پالسه دیودی نیاز دارد) طراحی مبدل پیشنهادی باید به طور مناسب اصلاح گردد، برای این منظور، سطح ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور چندوجهی باید به اندازه ۰/۰۳ کاهش یابد. با توجه روابط (۲) تا (۴) مقادیر اصلاح شده ضرایب برای عملکرد مبدل پیشنهادی در کاربردهای جایگزین به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$K_1 = 0.0472, K_2 = 0.1201 \quad (5)$$

معادلات بالا مقادیر ثابت های $K_1 - K_2$ (تعداد دور سیم‌پیچی) را به صورت کسری از ولتاژ موثر عبوری اتوترانسفورماتور نشان می‌دهد، که این مقادیر برای شبیه‌سازی و ساخت اتوترانسفورماتور استفاده می‌شود.

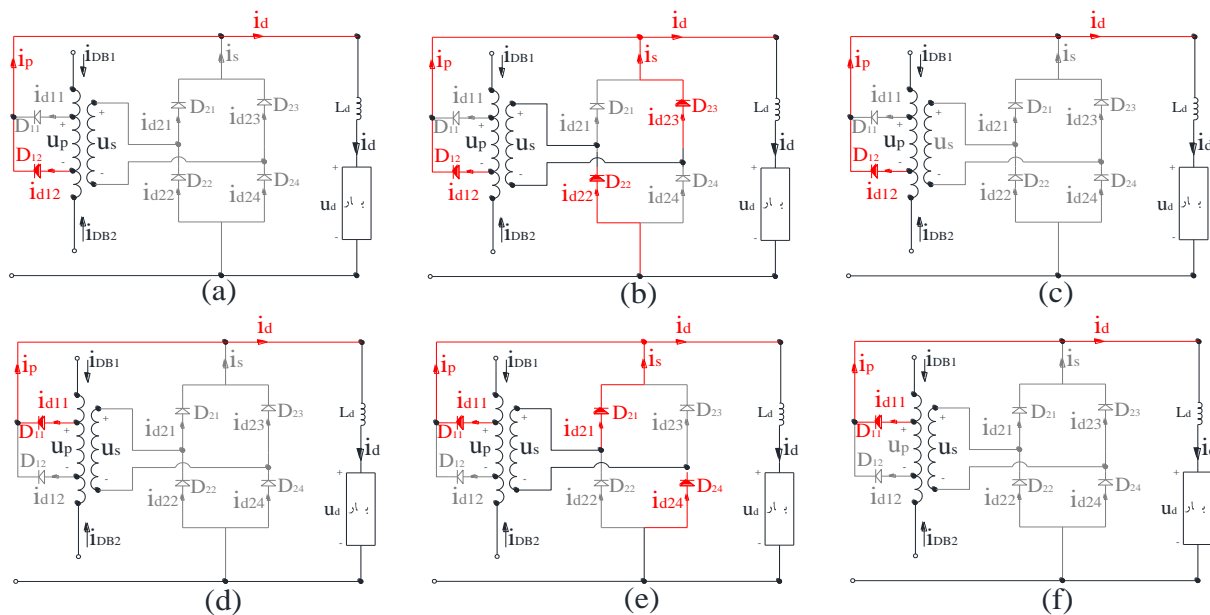


(الف)



(ب)

شکل (۳): (الف) شکل موج ولتاژ ورودی و (ب) ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور چند وجهی

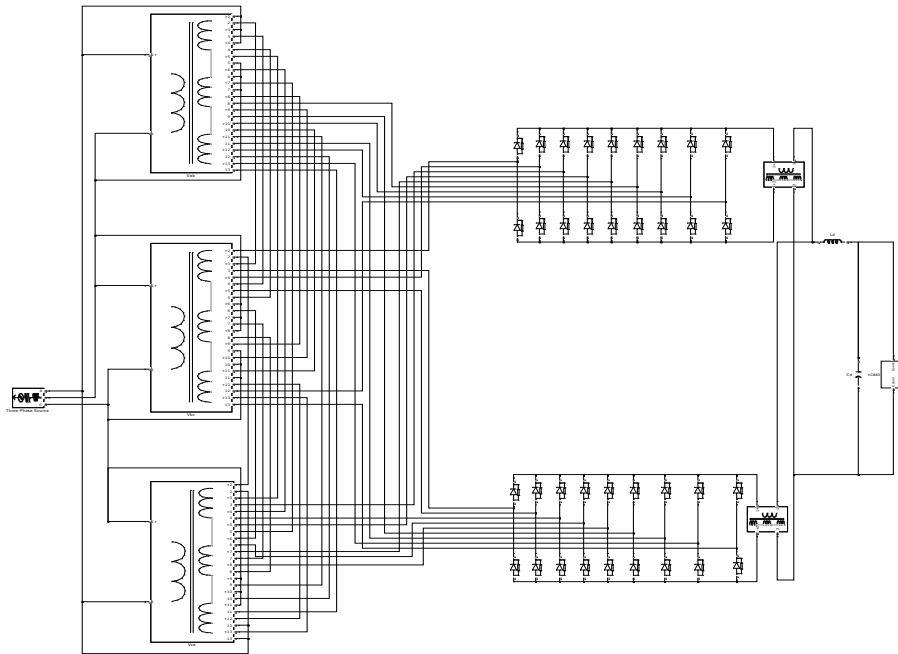


شکل (۴): حالت های عملکرد مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی

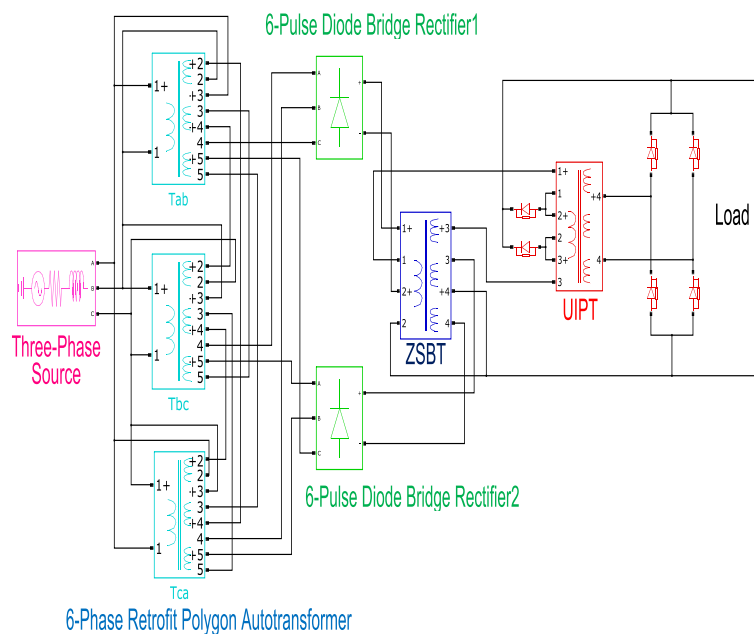
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود ساختار اتوترانسفورماتور رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی (۵-ب) بسیار ساده‌تر و سبک‌تر و با نرخ کیلو ولت آمپر کمتر نسبت به رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف (شکل ۵-الف) می‌باشد. همچنین تعداد دیودهای مورد استفاده در ساختار رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی کمتر و در نتیجه تلفات هدایت در رکتیفایر پیشنهادی نسبت به رکتیفایر ۳۶ پالسه متعارف کمتر می‌باشد.

۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در نرم‌افزار متلب - سیمولینک

این بخش شامل مدل‌سازی و شبیه‌سازی نرم افزاری اتوترانسفورماتور ۶ فازه مبتنی بر اتصال چند وجهی و همچنین مدار سه برابر کننده پیشنهادی برای دستیابی به رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در نرم افزار متلب - سیمولینک می‌باشد.

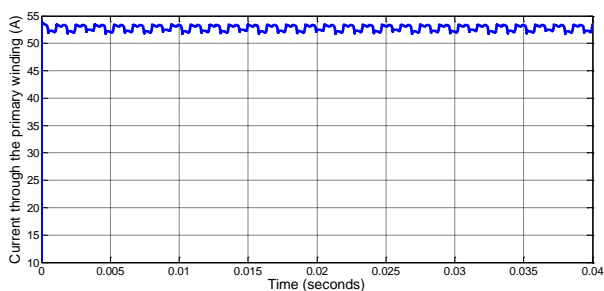


(الف)

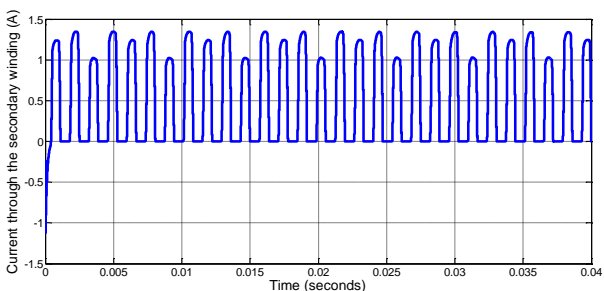


(ب)

شکل (۵): مدل متلب - سیمولینک رکتیفایر ۳۶ پالسه، (الف) متعارف [۲۷]، (ب) پیشنهادی

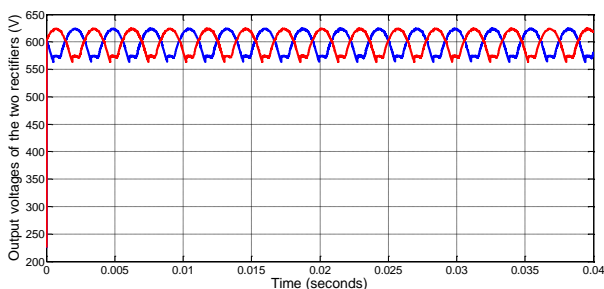


(الف)

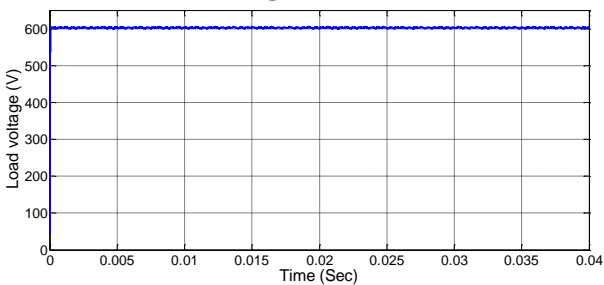


(ب)

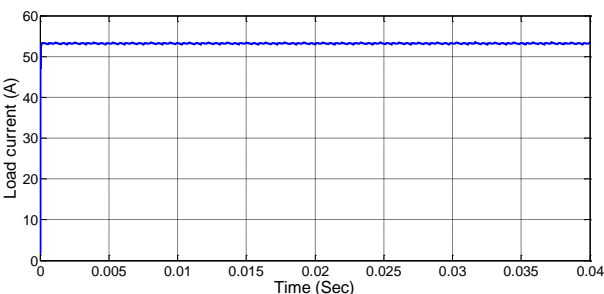
شکل (۷): شکل موج جریان ورودی و خروجی مدار سه برابر کننده تعداد پالس



شکل (۸): شکل موج ولتاژ خروجی دو پل دیودی شش پالسه



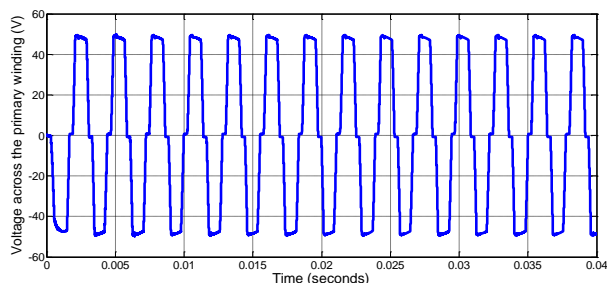
(الف)



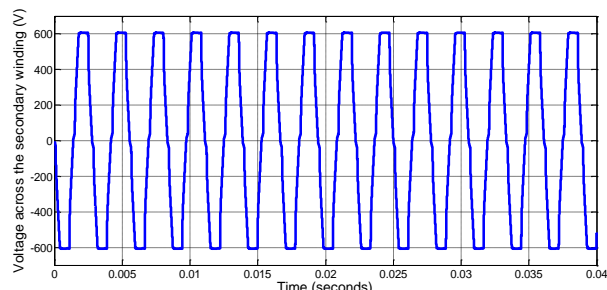
(ب)

شکل (۹): شکل موج (الف) ولتاژ و (ب) جریان خروجی رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به طور کامل عملکرد بخش‌های مختلف طرح پیشنهادی (عملکرد اتوترانسفورماتور ۶ فازه و همچنین عملکرد مدار سه برابر کننده تعداد پالس) را به طور کامل تایید می‌نماید. در شکل‌ها ۶ و ۷ به ترتیب شکل موج ولتاژ و جریان ورودی و خروجی مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی نشان داده شده است. لازم به ذکر است در مدار سه برابر کننده تعداد پالس نسبت دور سیم‌پیچی ترانسفورماتور با سروسوسط نامتعارف، تقریباً معادل ۱۲ می‌باشد (شکل ۶)، که منجر به کاهش جریان عبوری از سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور با سروسوسط نامتعارف می‌گردد (شکل ۷-ب). این اشکال تایید کننده صحت طراحی و مدل‌سازی مدار سه برابر کننده تعداد پالس پیشنهادی می‌باشد. شکل موج ولتاژ خروجی دو پل دیودی شش پالسه متعارف با اختلاف فاز ۳۰ درجه در شکل ۸، همچنین شکل موج ولتاژ و جریان خروجی رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود ولتاژ و جریان DC خروجی رکتیفایر پیشنهادی، دارای ۳۶ پالس در خروجی و تقریباً صاف و با ریبیل بسیار ناچیز می‌باشد که تایید کننده عملکرد بخش‌های مختلف رکتیفایر پیشنهادی می‌باشد. شکل ۱۰ شکل موج جریان و ولتاژ ورودی و طیف هارمونیک رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی را نشان می‌دهد همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود اعوجاج هارمونیک ولتاژ معادل ۱/۰۳ درصد و اعوجاج هارمونیک جریان معادل ۱/۴ درصد می‌باشد که تایید کننده توانایی بالای مدار سه برابر کننده تعداد پالس و همچنین رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در کاهش میزان اعوجاج هارمونیک جریان و ولتاژ ورودی می‌باشد.

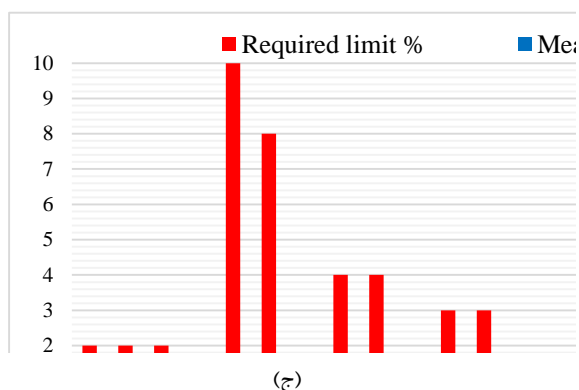
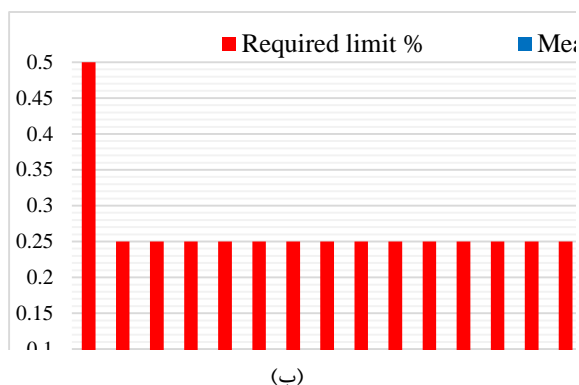
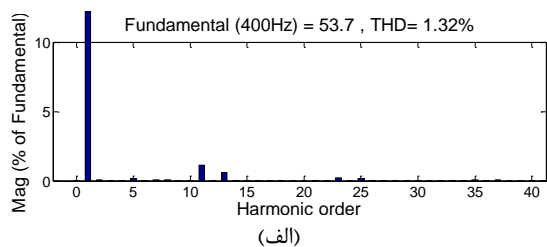
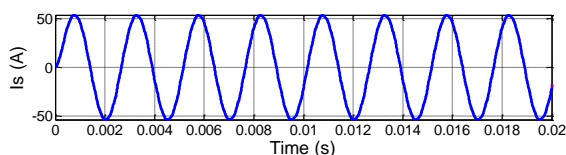


(الف)



(ب)

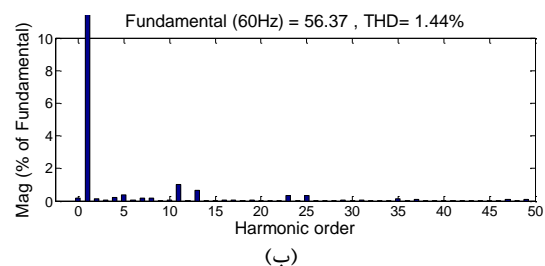
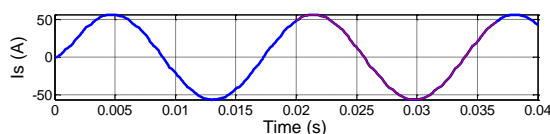
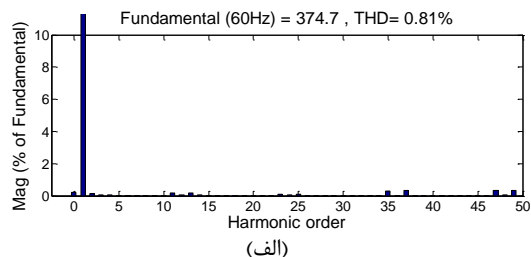
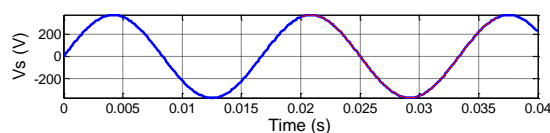
شکل (۶): شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی مدار سه برابر کننده تعداد پالس



شکل (۱۱): (الف) نتایج شبیه سازی جریان خط ورودی به همراه طیف هارمونیک آن در فرکانس منبع ۴۰۰ هرتز، (ب) هارمونیک های مرتبه زوج و (د) هارمونیک های مرتبه فرد در مقایسه با محدودیت استاندارد DO-160G

۴- نرخ کیلو ولت آمپر

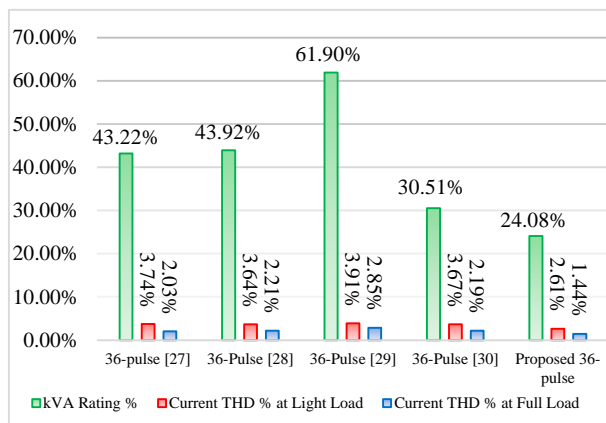
در جدول ۱ مقادیر موثر ولتاژ و جریان سیم پیچی اتوترانسفورماتور چندوجهی (T_{AB} , T_{BC} and T_{CA})، مدار مسدود کننده توالی صفر (ZSBT) که جهت ایزوله نمودن ولتاژهای خروجی دو رکتیفایر شش پالسه استفاده شده است و همچنین مقادیر موثر ولتاژ و جریان سیم پیچی ترانسفورماتور با سروسط نامتعارف (UIPT) برای بار ۱۰ کیلو ولت آمپر ارائه شده است.



شکل (۱۰): شکل موج و طیف هارمونیک (الف) ولتاژ و (ب) جریان ورودی مبدل ۳۶ پالسه پیشنهادی در بار کامل

به منظور کاهش اعوجاج هارمونیک در کاربردهای هواپیماهای، در [۳۱] یک رکتیفایر ۲۰ پالسه مبتنی بر اتوترانسفورماتور با اتصال T ارائه شده است. این رکتیفایر به منظور برآورده نمودن الزامات استاندارد DO-160G نیازمند استفاده از فیلتر می باشد و در مقایسه با رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی هزینه بیشتری دارد. در [۳۲]، نیز یک رکتیفایر ۱۸ پالسه مبتنی بر ترانسفورماتور برای کاهش اعوجاج هارمونیک در کاربردهای هواپیمایی ارائه شده است. در این رکتیفایر ۱۸ پالسه، اعوجاج هارمونیک کل جریان ورودی تحت بار کامل ۶/۷۴٪ و نرخ کیلو ولت آمپر ۳۴٪ می باشد. رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در مقایسه با این رکتیفایر ۱۸ پالسه، دارای اعوجاج هارمونیک کل جریان ورودی کمتر از ۳٪ و نرخ کیلو ولت آمپر معادل ۲۴/۰۸٪ می باشد. به منظور بررسی قابلیت امکان استفاده از رکتیفایر پیشنهادی در کاربردهای هواپیمایی، نتایج اعوجاج هارمونیک جریان به تفکیک مرتبه های هارمونیک فرد و زوج و با در نظر گرفتن مقادیر مجاز استاندارد DO-160G، در شکل ۱۱ برای فرکانس منبع ۴۰۰ هرتز و در شکل ۱۲ برای فرکانس منبع ۸۰۰ هرتز نشان داده شده است. همانطور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود، رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی توانایی برآورده نمودن الزامات استاندارد DO-160G، هم در هارمونیک های مرتبه زوج و بخصوص در هارمونیک های مرتبه فرد را بدون نیاز به فیلتر دارا می باشد. نتایج تایید کننده قابلیت کارایی بالای رکتیفایر پیشنهادی در کاربردهای هواپیمایی نیز می باشد.

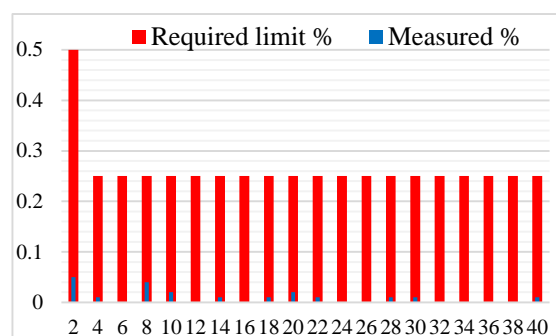
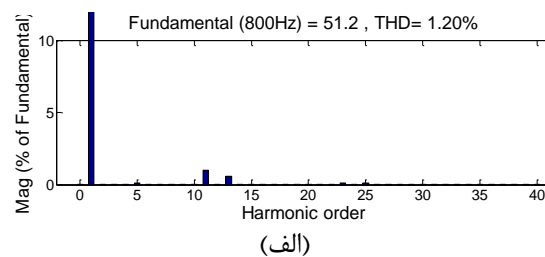
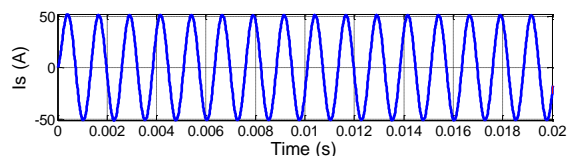
در شکل ۱۳ مقایسه رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی با رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف [۲۷-۳۰] از نظر نرخ کیلو ولت آمپر و درصد اعوجاج هارمونیکی کل جریان در بار کامل و در بار سبک (معادل ۲۰٪ بار کامل) نشان داده شده است، همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر پیشنهادی به مراتب کمتر از رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف می‌باشد. نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر پیشنهادی، به ترتیب تقریباً ۱۹/۱۴٪، ۱۹/۸۴٪، ۳۷/۸۲٪ و ۶/۴۳٪ از نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایرهای ۳۶ پالسه [۲۷]، [۲۸]، [۲۹] و [۳۰] کمتر است. علاوه بر آن، اعوجاج هارمونیکی جریان در رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف [۲۷-۳۰] در بار سبک بیش از ۳٪ می‌باشد در صورتیکه در رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی اعوجاج هارمونیکی جریان همواره کمتر از ۳٪ و منطبق بر استانداردهای MIL-STD 704F و IEEE-519 می‌باشد که نتایج تایید کننده قابلیت‌های فنی و اقتصادی بالای رکتیفایر پیشنهادی در مقایسه با رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف می‌باشد.



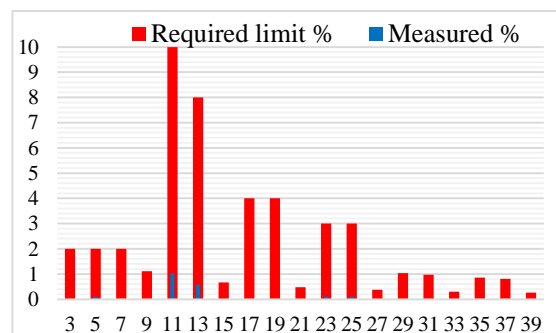
شکل (۱۳): مقایسه کیلو ولت آمپر و اعوجاج هارمونیکی جریان در رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی با رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی مبتنی بر اتوترانسفورماتور ۶ فازه چندوجهی با نرخ کیلو ولت آمپر کم علاوه یک مدار سه برابر کننده تعداد پالس با نرخ کیلو ولت آمپر کم ارائه شده است. این دو مزیت منجر به صرفه جویی در اندازه، حجم، وزن و هزینه رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در مقایسه با سایر رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اعوجاج هارمونیکی در جریان خط ورودی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. اعوجاج هارمونیکی جریان ورودی همواره کمتر از ۳٪ مطابق با عملکرد رکتیفایر پیشنهادی منطبق بر الزامات استاندارد DO-160G MIL-STD و IEEE 519 است. همچنین نتایج تایید کننده در کاربردهای هواپیمایی بدون نیاز به فیلتر نیز می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): (الف) نتایج شبیه‌سازی جریان خط ورودی به همراه طیف هارمونیکی آن در فرکانس منبع ۸۰۰ هرتز، (ب) هارمونیکی‌های مرتبه زوج و (ج) هارمونیکی‌های مرتبه فرد در مقایسه با محدودیت استاندارد DO-160G

بر مبنای این مقادیر و رابطه (۶) نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر پیشنهادی محاسبه می‌شود.

$$S = 0.5 \sum V_{winding} I_{winding} \quad (۶)$$

نرخ کیلو ولت آمپر اتوترانسفورماتور چندوجهی معادل ۱۸۰۹/۳۹ ولت آمپر، ZSBT معادل ۴۶۴/۷۲ و UIPT معادل ۱۳۴/۷۷ می‌باشد که در مجموع با در نظر گرفتن بار نامی ۱۰ کیلو ولت آمپر، نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی معادل ۲۴/۰۸ بار نامی می‌باشد.

جدول (۱): مقادیر موثر ولتاژ و جریان بخش های مختلف رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی

Transformer	rms values	W1	W2	W3	W4	W5	VA rating
T _{AB}	Vrms (V)	17.92	17.92	45.59	45.59	379.6	660.43
	Irms (A)	6.04	6.10	6.06	6.10	1.13	
T _{BC}	Vrms (V)	17.92	17.92	45.58	45.58	379.6	601.45
	Irms (A)	6.06	6.20	6.06	6.10	1.13	
T _{CA}	Vrms (V)	17.92	17.92	45.6	45.6	379.6	602.49
	Irms (A)	6.06	6.10	6.04	6.20	1.13	
ZSBT	Vrms (V)	31.7	31.7	31.7	31.7		464.72
	Irms (A)	7.33	7.33	7.33	7.33		
UIPT	Vrms (V)	10.17	10.94	10.17	388.4		134.77
	Irms (A)	7.33	3.20	7.33	0.22		

- [9] Abdollahi, R., Gharehpetian, G., B., "Inclusive Design and Implementation of Novel 40-Pulse AC-DC converter for retrofit application and harmonic mitigation," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.63, no.2, pp.667-677, Feb. 2016
- [10] Abdollahi, R., "a Simple Harmonic Reduction Method in 20-Pulse AC-DC Converter," Vol. 28, No. 01, pp.1950013, 2019, Journal of Circuits, Systems, and Computers, DOI: 10.1142/S0218126619500130, 2018.
- [11] Sandoval, J., Krishnamoorthy, H. S., N. Enjeti, Sewan Choi, P., "Reduced active switch front-end multipulse rectifier with medium-frequency transformer isolation," IEEE Trans. Power Electron., vol.32, no.10, pp.7458-7468, Oct. 2017.
- [12] Li, X., Xu, Wilsun., Ding, Tianyu., "Damped high passive filter—a new filtering scheme for multipulse rectifier systems," IEEE Trans. Power Deli., vol.32, no.1, pp.117-124, Feb. 2017.
- [13] Meng, F., Gao, L., Yang, S., Yang, W., "Effect of Single-Phasing on Multipulse Rectifier with Active Interphase Reactor," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 30, no. 5, pp. 2549-2555, May 2015.
- [14] Bai, S., Lukic, S. M., "New Method to Achieve AC Harmonic Elimination and Energy Storage Integration for 12-Pulse Diode Rectifiers," IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 60, no. 7, pp. 2547-2554, July 2013.
- [15] Sheelvant, V., Kalpana, R., Singh, B., Saravana, P. P., "Improvement in Harmonic Reduction of a Zigzag Autoconnected Transformer Based 12-Pulse Diode Bridge Rectifier by Current Injection at DC Side," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 53, no. 6, pp. 5634-5644, Nov.-Dec. 2017.
- [16] Meng, F., Yang, W., Yang, S., Gao, L., "Active harmonic reduction for 12-pulse diode bridge rectifier at dc side with two-stage auxiliary circuit," IEEE Trans. Ind. Inform., vol.11, no.1, pp.64-73, Feb.2015
- [17] Young, C. M, Chen, M. H, Lai, C. H., Shih, D. C., "A novel active interphase transformer scheme to achieve three-phase line current balance for 24-pulse converter," IEEE Trans. Power Electron., vol.27, no.4, pp.1719-1731, Apr. 2012
- [18] Choi, S., N. Enjeti, P., Lee, H. H., J. Pitel, I., "A new active interphase reactor for 12-pulse rectifiers provides clean power utility interface," IEEE Trans. Ind., Appl., vol.32, no.6, pp.1304-1311, Nov./Dec.1996.

نرخ کیلو ولت آمپر رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی ۲۴/۰۸٪ بار نامی می باشد. در مجموع رکتیفایر ۳۶ پالسه پیشنهادی در مقایسه با سایر رکتیفایرهای ۳۶ پالسه متعارف موجود هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی دارای برتری می باشد.

مراجع

- [1] Singh, B., Gairola, S., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad K., "Multi-pulse AC-DC converters for improving power quality: a review," IEEE Trans. Power Electron., vol.23, no.1, pp.260-281, Jan. 2008
- [2] Solanki, I., Fröhleke, N., Böcker, J., Averbeg, A., Wallmeier, P., "High-current variable-voltage rectifiers: state of the art topologies," IET Power Electronics, vol. 8, no. 6, pp. 1068-1080, 2015
- [3] Yang, T., Bozhko, S., Asher, G., "Functional modeling of symmetrical multipulse autotransformer rectifier units for aerospace applications," IEEE Trans. Power Electron., vol.30, no.9, pp.4704-4713, Sep. 2015
- [4] Fernandes, R. C., da Silva Oliveira, P., de Seixas, F. J. M., "A family of autoconnected transformers for 12- and 18-pulse converters-Generalization for delta and wye topologies," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no.7, pp. 2065-2078, Jul. 2011.
- [5] Meng, F., Gao, L., Yang, S., Yang, W., "Effect of phase-shift angle on a delta-connected autotransformer applied to a 12-pulse rectifier," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.62, no.8, pp.4678-4690, Aug. 2015.
- [6] Swamy, M. M., "An electronically isolated 12 pulse autotransformer rectification scheme to improve input power factor and lower harmonic distortion in variable frequency drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.51, no.5, pp. 3986-3994, Sep./Oct. 2015.
- [7] Abdollahi, R., Jalilian, A., "24-Pulse Fork Autotransformer Based Converter for Improvement of Power Quality Indices", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 11, no. 1, pp. 29-36, 2014.
- [8] S. P. P, Kalpana, R., Singh, Bhuvaneswari, B. G., "A 20-Pulse Asymmetric Multi-Phase Staggering Autoconfigured Transformer for Power Quality Improvement," IEEE

signal design.” Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 17, no. 2, pp. 1-12, 2020;

- [19] Meng, F., Yang, W., Zhu, Y., Gao, L., Yang, S., “Load adaptability of active harmonic reduction for 12-pulse diode bridge rectifier with active interphase reactor,” IEEE Trans. Power Electron., vol.30, no.12, pp.7170-7179, Dec.2015.
- [20] Hamad, M. S., Masoud, M. I., Williams, B. W., Finney, S., “Medium voltage 12-pulse converter: ac side compensation using a shunt active power filter in a novel front end transformer configuration,” IET Power Electron., vol. 5, no. 8, pp. 1315-1323, September 2012.
- [21] Izadinia, R., Karshenas, H. R., “Current Shaping in a Hybrid 12-Pulse Rectifier Using a Vienna Rectifier,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 33, no. 2, pp. 1135-1142, Feb. 2018.
- [22] Meng, F., Xu, X., Gao, L., “A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices,” IEEE Trans. on Ind. Informat., vol. 13, no. 5, pp. 2680-2692, Oct. 2017.
- [23] Fangang, M., Shiyang, Y., Wei, Y., “Modeling for a multitap interphase reactor in a multipulse diode bridge rectifier,” IEEE Trans. Power Electron., vol.24, no.9, pp.2171-2177, Sep.2009.
- [24] Yang, S., Wang, J., Yang, W., “A Novel 24-Pulse Diode Rectifier with an Auxiliary Single-Phase Full-Wave Rectifier at DC Side,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 32, no. 3, pp. 1885-1893, March 2017.
- [25] Prakash, S., Kalpana, R., Singh, B., “Inclusive Design and Development of Front-End Multi-Phase Rectifier with Reduced Magnetic Rating and Improved Efficiency,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no 3, pp. 2989-3000, Sep. 2020
- [26] Abdollahi R., “Multi-Phase Shifting Autotransformer Based Rectifier,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 38-45, 2020. doi: 10.1109/OJIES.2020.2984715, 2020.
- [27] Singh, B., Gairola, S., “Design and Development of a 36-Pulse AC-DC Converter for Vector Controlled Induction Motor Drive,” in Proc. IEEE Conf. Power Electron. Drives Syst. PEDS’07, pp. 694–701, 2007.
- [28] Abdollahi, R., “Design and construction of a polygon-connected autotransformer-based 36-pulse AC-DC converter for power quality improvement in retrofit applications,” Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 63, no. 2, 2015.
- [29] Abdollahi, R., “Technical and economical comparison of different autotransformer based 36 pulse AC-DC Converters”, Journal of Power Technologies, vol. 99, no. 4, pp. 281–288, 2019.
- [30] Prakash, S., Kalpan, R., Chethana, K. S., Singh, B., “A 36-Pulse AC-DC Converter with DC Side Tapped Interphase Bridge Rectifier for Power Quality Improvement”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, Jan.-Feb. 2021.
- [31] Abdollahi, R., Gharehpetian, G. B., “A 20-pulse Autotransformer Rectifier Unit for More Electric Aircrafts”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, DOI: 10.1109/JESTPE.2020.2990670, 2020.
- [32] Chen, J., Shen, J., Chen, J., Shen, P., Song, Q., Gong, C., “Investigation on the Selection and Design of Step-Up/Down 18-Pulse ATRUs for More Electric Aircrafts,” IEEE Trans. Transport. Electric., vol. 5, no. 3, pp. 95-811, 2019.
- [33] bagheri A, Alizadeh M, khodabakhshi N. “The Capacitor Voltage Balancing for a four-switch three-phase rectifier using a space vector modulation technique and auxiliary