

بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک اینورترهای چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث

سیده زهرا حسینی ملایی^۱، علیرضا نمدمالان^{۲*}، احمد بهزادی نژاد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول -

خوزستان - ایران

hosseini93@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول - خوزستان - ایران

namadmalan@jsu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول -

خوزستان - ایران

ahmadbehzadinezhad@jsu.ac.ir

چکیده: در اینورترهای چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث، حضور هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ و جریان چرخشی در حلقه مثلث باعث بروز تلفات اضافی می‌شود. در این مقاله، روش بهینه‌سازی فرکانس پایین برای کاهش هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ در اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث پیشنهاد شده است. با این روش، علاوه بر کاهش این هارمونیک‌ها، مقدار انحراف هارمونیک کل (THD) نیز در حد مطلوب حفظ می‌شود و الزامات استاندارددهایی مانند EN50160 WG36-05 و IEC61000-3-6 نیز رعایت می‌شود. در این روش با استفاده از روش کلیدزنی حداقل‌سازی بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک کل (OMTHDⁱⁱ)، مقادیر بهینه‌ی زوایای کلیدزنی و منابع DC با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSOⁱⁱⁱ) به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی، مؤثر بودن روش پیشنهادی را در کاهش هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ و جریان چرخشی همراه با حفظ مقدار THD در حد مطلوب نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کلیدی: اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث، هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ، اعوجاج

هارمونیک کل، منابع DC متغیر.

۱- مقدمه

ولتاژ متوسط و توان بالا هستند. از جمله این کاربردها، تجهیزات انتقال انعطاف‌پذیر متناوب، جبران‌سازهای استاتیک سنکرون و منابع انرژی تجدیدپذیر هستند [۱]. از میان ساختارهای مختلف اینورترهای چندسطحی، به اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پل به دلیل برخی ویژگی‌ها و مزایا نسبت به دیگر ساختارها بیشتر توجه شده است. مدولاریته، ساختار توسعه‌پذیر و بی‌نیازی به دیودهای مهار دیودی و خازن‌های متعادل‌کننده ولتاژ از جمله این ویژگی‌ها و مزایا هستند [۲، ۳]. روش‌های کلیدزنی فرکانس پایین دارای مزایای بسیاری مانند به‌کارگیری بهتر از مبدل، افزایش بازده مبدل و

اینورترهای چندسطحی به دلیل مزایای فراوان نسبت به مبدل‌های متداول دو سطحی، انتخاب مناسبی برای کاربردهای

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۲۹

نام نویسنده مسئول: علیرضا - نمدمالان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خوزستان - دزفول - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک اینورترهای چندسطحی آبدشاری تمام‌پل با اتصال مثلث

فیلتر بین خوشه‌های مثلث است. این سلف فیلتر اختلاف ولتاژ بین فازهای مبدل را کنترل می‌کند و جریان چرخشی در اتصال مثلث را کاهش می‌دهد [۱۷، ۱۱]. همچنین اندازه این سلف‌های فیلتر در عملکرد سیستم تأثیرگذار است و بزرگ انتخاب کردن این سلف‌ها باعث ایجاد تلفات در سیستم می‌شود [۱۳].

در این مقاله از روش کلیدزنی فرکانس پایین OMTD برای کاهش اثر هارمونیک‌های جریان چرخشی در اینورتر چندسطحی آبدشاری تمام‌پل با اتصال مثلث استفاده شده است. همچنین الگوریتم PSO به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی در روش کلیدزنی OMTD برای حداقل کردن تابع هدف به کار رفته است. در روش OMTD زوایای کلیدزنی به گونه‌ای انتخاب شدند تا مقدار THD و هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ بهینه شوند. با کاهش هارمونیک‌های جریان چرخشی از طریق بهینه‌سازی، سلف‌های فیلتری کوچک‌تری برای حداقل کردن جریان چرخشی به کار گرفته می‌شود؛ در نتیجه، با کوچک‌تر شدن سلف‌های فیلتری تلفات مدار کاهش می‌یابد و مقدار THD در حد مطلوب حفظ می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب، ثابت می‌کند با این روش، هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ که عامل تولید جریان چرخشی در اتصال مثلث‌اند کاهش پیدا می‌کنند و مقدار THD نیز در حد مطلوب حفظ می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهند با این روش برای اینورتر آبدشاری با اتصال مثلث با سه سلول مازولار در هر شاخه و سه لبه روی شکل‌موج ولتاژ خروجی میزان جریان چرخشی به ۳/۹ درصد از مقدار نامی خود می‌رسد. همچنین، هارمونیک‌های شکل‌موج ولتاژ خروجی، استانداردهای EN50160، WG36-05 و IEC61000-3-6 را رعایت می‌کنند. در واقع این استانداردها برای حفظ کیفیت توان متناسب با نیازهای کاربر معرفی می‌شوند که در هر استاندارد، پارامترها و محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شود؛ برای مثال، در استاندارد EN50160 پارامترهای ولتاژ مانند هارمونیک ولتاژ و فاکتور THD معرفی می‌شوند [۱۸].

بخش‌های بعدی مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، فرمول‌بندی جریان چرخشی در اتصال مثلث بیان شده است. در بخش سوم، نحوه کنترل اینورتر آبدشاری با اتصال مثلث بررسی شده است. در بخش چهارم، شبیه‌سازی‌های مربوط به

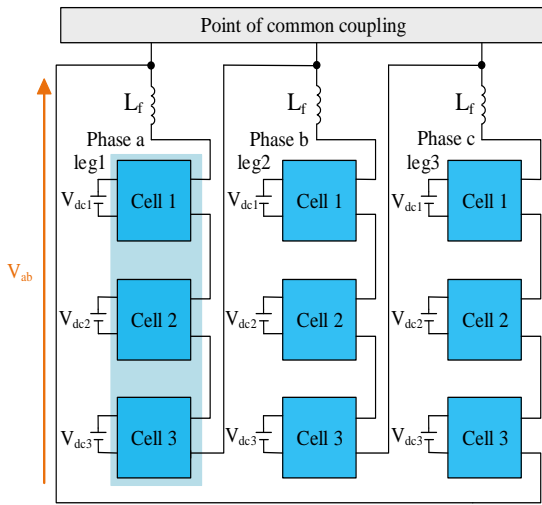
کاهش تلفات کلیدزنی‌اند [۴]. معمولاً در روش‌های کلیدزنی با فرکانس کلیدزنی پایین، منابع DC به‌صورت ثابت یا متغیر در نظر گرفته می‌شوند. با در نظر گرفتن سطوح ولتاژ ورودی ثابت، زوایای کلیدزنی بهینه را برای اینورتر چندسطحی به دست می‌آورند که در سطوح پایین، مقدار THD بالایی دارند [۵]. ولتاژهای متغیر منابع DC به تولید سطوح متفاوت ولتاژ در شکل‌موج خروجی اینورتر چندسطحی منجر می‌شوند. این تفاوت در سطوح ولتاژ باعث کاهش THD شکل‌موج ولتاژ خروجی به‌میزان شایان توجه می‌شود. زوایای کلیدزنی و سطوح متفاوت ولتاژ DC هر دو در بهبود انحراف هارمونیک ولتاژ خروجی تعیین‌کننده‌اند [۶-۸].

اینورترهای چندسطحی آبدشاری تمام‌پل براساس نحوه اتصال بین فازها به دو نوع اتصال ستاره و مثلث تقسیم‌بندی می‌شوند. در مقایسه با اتصال ستاره اینورترهای چندسطحی آبدشاری تمام‌پل، اینورترهای آبدشاری تمام‌پل با اتصال مثلث بهترین گزینه برای جبران جریان توالی منفی و تضمین تعادل ولتاژ لینک DC هستند [۹-۱۱].

همچنین، حضور هارمونیک‌های توالی صفر در اینورتر چندسطحی آبدشاری تمام‌پل با اتصال مثلث باعث به وجود آمدن جریان چرخشی در حلقه مثلث می‌شود. هارمونیک‌های توالی صفر با فرکانس پایین، یک جریان چرخشی بزرگ و هارمونیک‌های توالی صفر با فرکانس بالا، یک جریان چرخشی کوچک را بوجود می‌آورند [۱۲]. هارمونیک‌هایی که در جریان چرخشی حضور دارند مشکلاتی مانند افزایش تلفات توان و کاهش طول عمر مبدل را ایجاد می‌کنند. همچنین اگر این هارمونیک‌های جریان چرخشی کنترل نشوند، باعث ناپایداری در وضعیت گذرا می‌شوند و بهره‌وری سیستم را نیز کاهش می‌دهند [۱۳، ۱۴]. این هارمونیک‌های جریان چرخشی در راستای بهبود کارایی سیستم و کاهش نرخ جریان وسایل کلیدزنی باید حذف شوند یا به مقدار حداقل برسند [۱۳-۱۵]. برای از بین بردن این هارمونیک‌ها باید ولتاژهای به‌وجودآورنده این جریان هارمونیک را از بین برد [۱۶]. روش‌های قدیم ارائه‌شده برای کاهش جریان‌های چرخشی دارای مشکلاتی مثل محدودیت در قابلیت حذف، محدودیت کاربردهای مساحتی و عملکرد پیچیده‌اند [۱۴].

یک راه مقابله با این جریان چرخشی، استفاده از سلف

شاخه (leg1) یک اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل، بدون در نظر گرفتن ولتاژ سلف فیلتر است.



شکل (۲): اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل با اتصال مثلث

سری فوریه شکل موج ولتاژ خروجی یک شاخه مثلث (leg1) از رابطه (۲) به دست می آید.

$$V_{lg1}(\theta) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\theta) \quad h = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

که در آن هارمونیک های ولتاژ شکل موج خروجی با V_h نشان داده شده و θ زاویه کلیدزنی مرتبط با هر سلول است. با افزودن لبه روی سطوح ولتاژ خروجی تعداد زوایای کلیدزنی افزایش می یابد. افزایش زوایای کلیدزنی، انحراف هارمونیک ولتاژ خروجی را بیشتر کاهش می دهد. هارمونیک های ولتاژ یک اینورتر هفت سطحی برای یکی از حالات سه لبه روی سطوح ولتاژ خروجی از رابطه (۳) به دست می آید.

$$V_h = \frac{4V_{dc}}{h\pi} [\cos(h\theta_1) - \cos(h\theta_2) + \cos(h\theta_3) + \cos(h\theta_4) - \cos(h\theta_5) + \cos(h\theta_6) + \cos(h\theta_7) - \cos(h\theta_8) + \cos(h\theta_9)] \quad (3)$$

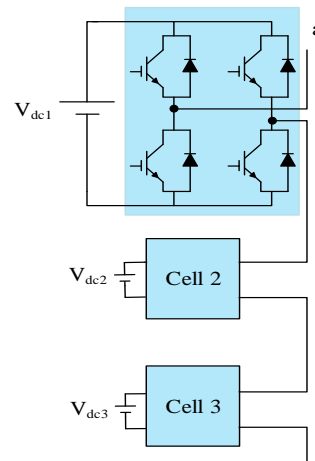
$$h = 1, 3, 5, \dots$$

با توجه به رابطه (۳) برای حالت سه لبه ولتاژ سلول ها برابر و ثابت در نظر گرفته شد تا ماژولار بودن سلول ها حفظ شود. ماژولار بودن سلول ها یکسان بودن توپولوژی، کنترل و مدولاسیون را نتیجه می دهد و این امکان را فراهم می کند که در صورت ایجاد خطا در هر سلول بتوان به راحتی و به سرعت آن را با سلول سالم تعویض کرد [۲]. به ازای هر لبه روی

روش بهینه سازی ولتاژ هارمونیک های فرد مضرب سه برای اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل ارائه شده است. در بخش پنجم، نتایج عملی روش پیشنهادی بیان شده اند. در نهایت، نتیجه گیری در بخش شش مطرح شده است.

۲- محاسبه جریان چرخشی در اینورتر چند سطحی آبدشاری تمام پیل با اتصال مثلث

اینورتر چند سطحی آبدشاری تمام پیل از اتصال سری سلول های تمام پیل در هر فاز تشکیل شده است. شکل (۱) یک فاز اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل را نشان می دهد.



شکل (۱): ساختار تک فاز اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل

این اینورتر از سه سلول سری در هر فاز تشکیل شده است. تعداد سطوح ولتاژ فاز خروجی اینورتر چند سطحی آبدشاری تمام پیل از رابطه (۱) به دست می آید [۱۹].

$$S = 2N + 1 \quad (1)$$

که در آن N ، تعداد سلول ها در یک فاز و S ، تعداد سطوح ولتاژ خروجی را نشان می دهد.

اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل با اتصال مثلث در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، سه فاز a، b و c در اتصال مثلث وجود دارد که هر فاز از سه سلول اینورتر تمام پیل تشکیل شده است.

در این مقاله از اینورتر هفت سطحی آبدشاری تمام پیل با اتصال مثلث استفاده شده است. همچنین ولتاژ بین فاز a و b و V_{ab} و با در نظر گرفتن ولتاژ سلف فیلتر مشخص شد. ولتاژ

بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک اینورترهای چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث

$$V_{3rd}(\theta) = \frac{V_{lg1}(\theta) + V_{lg2}(\theta) + V_{lg3}(\theta)}{3} \quad (۹)$$

برای محاسبه این جریان چرخشی با در نظر گرفتن جریان مبنای برابر با 1 pu مقدار امپدانس مبنا را از رابطه (۱۰) به دست می‌آوریم.

$$Z_b = \frac{V_l}{I_b} \quad I_b = 1pu \quad (۱۰)$$

که در آن V_1 مؤلفه اصلی ولتاژ یک شاخه (leg) است. در این کاربرد، اندازه اندوکتانس سلف فیلتر را ۵٪ مقدار امپدانس مبنا در نظر می‌گیریم [۲۱] که به صورت رابطه (۱۱) است.

$$0.05Z_b = L_f \omega \quad \omega = 2\pi f \quad (۱۱)$$

که در آن f بیان‌کننده فرکانس سیستم و برابر 50HZ است و اندازه سلف فیلتر از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$L_f = \frac{0.05Z_b}{2\pi \times 50} \quad (۱۲)$$

شکل (۳) مدار معادل ولتاژ یک اینورتر هفت‌سطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث با حضور جریان چرخشی و سلف فیلتر را نمایش می‌دهد. در این شکل، جریان چرخشی با i_{lp} نمایش داده شد و ولتاژ بین فاز a و b است. ولتاژ هر شاخه (leg) از مثلث بعد از قرارگیری در حلقه مثلث به دو بخش ولتاژ V_{ab} و مجموع هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ تقسیم شده است. ولتاژ سلف فیلتر با پلاریته برعکس ولتاژ هارمونیک‌های فرد مضرب سه لحاظشد تا نشان داده شود این سلف فیلتر به محدودکردن هارمونیک‌های فرد مضرب سه کمک می‌کند. ولتاژ V_{ab} در اتصال مثلث که با در نظر گرفتن ولتاژ سلف است، از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$V_{ab}(\theta) = V_{lg1}(\theta) - V_{3rd}(\theta) \quad (۱۳)$$

با در نظر گرفتن مقاومت کمی در سلف فیلتر و عملکرد این سلف برای حذف هارمونیک‌های فرد مضرب سوم ولتاژ رابطه (۱۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$V_{3rd} = L_f \frac{di_{lp}}{dt} + n i_{lp} \quad (۱۴)$$

می‌توان رابطه (۱۴) را بر حسب اعداد طبیعی n به صورت رابطه (۱۵) گسترش داد و جریان چرخشی را به دست آورد.

سطوح ولتاژ خروجی در ربع سیکل دو زاویه کلیدزنی به زوایای کلیدزنی اضافه می‌شود. در این حالت ۹ زاویه کلیدزنی در یک ربع سیکل وجود دارد که رابطه بین زوایای کلیدزنی به صورت رابطه (۴) است.

$$0 < \theta_1 < \dots < \theta_9 < \frac{\pi}{2} \quad (۴)$$

همچنین در این مقاله روی سطوح ولتاژ خروجی اینورتر هفت‌سطحی ۵ لبه ایجاد شد. هارمونیک‌های ولتاژ برای یک اینورتر هفت‌سطحی آبشاری تمام‌پل برای یکی از حالات اعمال پنج لبه روی سطوح ولتاژ خروجی از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$V_h = \frac{4}{h\pi} [V_{dc1}(\cos(h\theta_1) - \cos(h\theta_2) + \cos(h\theta_3)) + V_{dc2}(\cos(h\theta_4) - \cos(h\theta_5) + \cos(h\theta_6)) - \cos(h\theta_7) + \cos(h\theta_8)] + V_{dc3}(\cos(h\theta_9)) - \cos(h\theta_{10}) + \cos(h\theta_{11}) - \cos(h\theta_{12}) + \cos(h\theta_{13})] \quad (۵)$$

$$h = 1, 3, 5, \dots$$

در این حالت، ولتاژ سلول‌ها متغیر در نظر گرفته شد. در این حالت، رابطه بین ۱۳ زاویه کلیدزنی که در یک ربع سیکل وجود دارد، از رابطه (۶) به دست می‌آید.

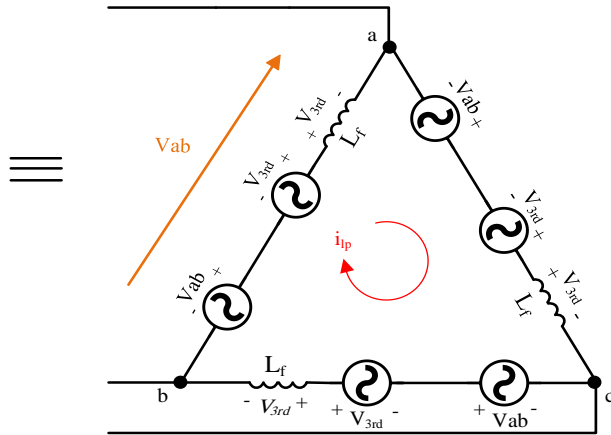
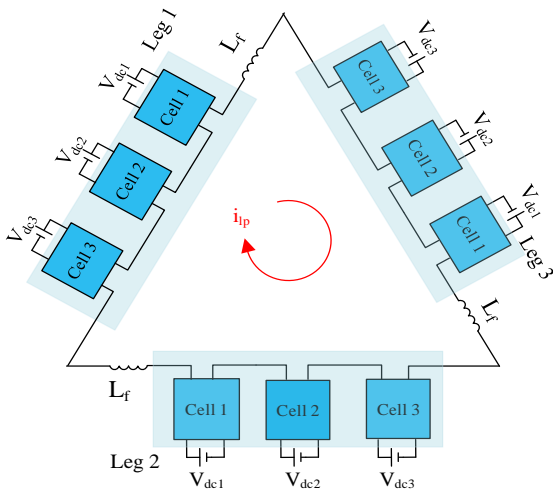
$$0 < \theta_1 < \dots < \theta_{13} < \frac{\pi}{2} \quad (۶)$$

سری فوریه ولتاژ شاخه (leg) دوم و سوم اینورتر آبشاری با اتصال مثلث به ترتیب از رابطه (۷) و (۸) به دست می‌آید. این ولتاژها برابر با ولتاژ شاخه (leg) اول با شیفیت فازی 120° و $120^\circ +$ هستند.

$$V_{lg2}(\theta) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h(\theta - \frac{2\pi}{3})) \quad h = 1, 3, 5, \dots \quad (۷)$$

$$V_{lg3}(\theta) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad h = 1, 3, 5, \dots \quad (۸)$$

در سیستم سه‌فاز، هارمونیک‌های فرد مضرب سه در هر فاز به دلیل یکسان‌بودن زاویه فاز، توالی صفر را به وجود می‌آورند. هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ در اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث به صورت جریان چرخشی در حلقه مثلث حضور دارند [۲۰]. مجموع هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ از رابطه (۹) به دست می‌آید.



شکل (۳): مدار معادل یک اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با اتصال مثلث با حضور سلف فیلتر و جریان چرخشی

روش، برای تغییر ولتاژ خروجی مبدل فرض بر این است ورودی سلولها به طور پیوسته تغییر پذیر است که در کاربردهای درایو این کار با یکسوسازهای کنترل شونده سمت ورودی دست یافتنی است.

۴- نتایج شبیه سازی

با توجه به اینکه هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ بالاتر به راحتی با استفاده از سلف فیلتری کوچکی حذف می شود، در این مقاله به بهینه سازی هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ پایین تر پرداخته شد. در این مقاله برای بهینه کردن هارمونیک های فرد مضرب سه از روش کلیدزنی فرکانس پایین OMTHD استفاده شده است. در این روش با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی، مقادیر بهینه زوایای کلیدزنی و منابع DC برای بهبود هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ و مقدار THD به دست می آید.

در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی PSO در نرم افزار MATLAB برای بهینه سازی تابع هدف استفاده شده است. الگوریتم PSO از مهم ترین الگوریتم های بهینه سازی است. جمعیت ذرات در الگوریتم PSO با شبیه سازی رفتار اجتماعی حرکت دسته جمعی پرندگان یا ماهی ها، برای یافتن راه حل ها در فضای مسئله همکاری و تعامل دارند [۲۴، ۲۵]. تابع هدفی که برای بهینه سازی هارمونیک های شکل موج خروجی اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با اتصال مثلث با سه لبه

$$i_{ip}(n+1) = \frac{V_{3nd}(n+1)\Delta t + i_{ip}(n)L_f}{L_f + r\Delta t} \quad i_{ip}(1) = 0 \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، مقدار اولیه جریان چرخشی، صفر در نظر گرفته شده است. مقدار مؤثر جریان چرخشی به دست آمده، از رابطه (۱۶) نتیجه می شود.

$$i_{ipms} = 100 \times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{ip}^2 dt} \quad (16)$$

T یک دوره زمانی از شکل موج جریان خروجی است. در این مقاله، برای محدود کردن جریان چرخشی و هارمونیک های فرد مضرب سوم ولتاژ از روش بهینه سازی هارمونیک استفاده شد. انحراف هارمونیک کل مؤلفه های هارمونیک بعد از بهینه سازی از رابطه (۱۷) به دست می آید.

$$THD = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{hab}^2}}{V_{lab}} \quad (17)$$

که در آن V_{hab} هارمونیک ها و V_{lab} مؤلفه اصلی ولتاژ V_{ab} هستند.

۳- کنترل اینورتر چند سطحی با اتصال مثلث

با متغیر بودن و کنترل ولتاژ ورودی سلول های اینورتر، تلفات کلیدزنی اینورتر های چند سطحی نسبت به حالت ثابت بودن ولتاژ ورودی سلولها کمتر است [۲۲، ۲۳]. در این

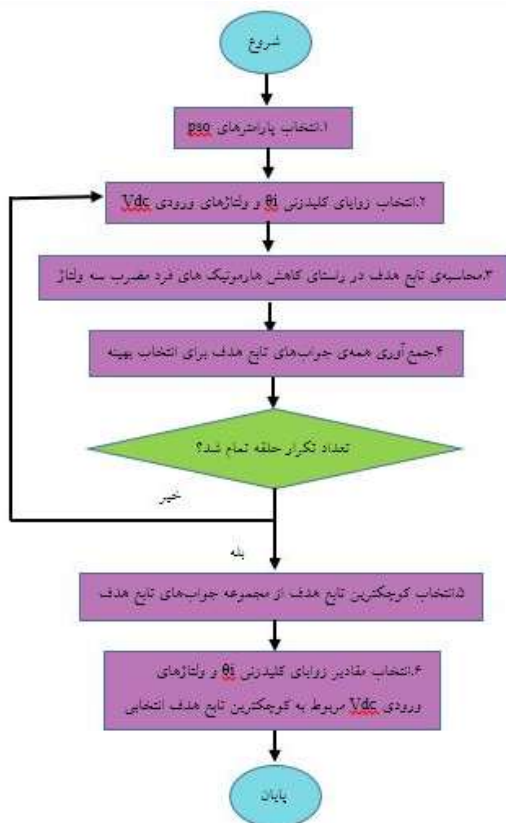
بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک اینورترهای چندسطحی آبخاری تمام‌پل با اتصال مثلث

برای حالتی که روی شکل موج ولتاژ خروجی سه لبه ایجاد شد، الزامات دو استاندارد کیفیت توان EN50160 و WG36-05 در نظر گرفته شده است. برای این حالت، انحراف هارمونیک کل از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$THD_{25^{th}} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{25} V_{hab}^2}}{V_{1ab}} \quad (19)$$

با بهینه‌سازی حالات مختلف اعمال سه لبه روی سطوح ولتاژ خروجی، یکی از حالات اعمال سه لبه که در آن فرکانس کلیدزنی سلول‌ها با هم برابرند، در نظر گرفته شد. مقدار THD و هارمونیک‌ها برای سنجیدن نتایج آن با الزامات دو استاندارد بالا محاسبه شده‌اند.

با در نظر گرفتن توابع هدف به‌کاررفته، الگوریتم بهینه‌سازی استفاده‌شده در این مقاله به‌صورت فلوچارت کلی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): فلوچارت کلی الگوریتم بهینه‌سازی

در طی مرحله ۳ فلوچارت شکل (۴)، ضریبی (β) که در تابع هدف وجود دارند، به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که

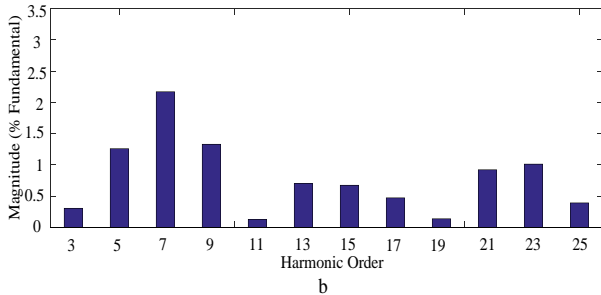
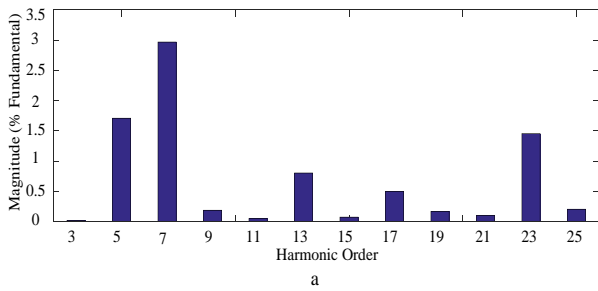
استفاده شده، به‌صورت رابطه (۱۸) است.

$$obj\ function = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{25} \beta_h V_h^2}}{V_1} \quad (18)$$

β_h ضریب پناستی هارمونیک‌های ولتاژ است. با مقداردهی این ضرایب، هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ و سایر هارمونیک‌های ولتاژ خروجی بهینه‌سازی شده است؛ در نتیجه، هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ با کاهش مواجه می‌شوند و انحراف هارمونیک ولتاژ در حد مطلوب حفظ می‌شود. در این مقاله برای حالت سه لبه روی شکل موج خروجی بهینه‌سازی هارمونیک تابع هدف تا هارمونیک ۲۵ در نظر گرفته شد. علت بهینه‌سازی تابع هدف تا هارمونیک ۲۵ بررسی الزامات تعدادی از استانداردها با نتایج شبیه‌سازی است. در این مقاله از استانداردهای جدول (۱) استفاده شده است.

جدول (۱): استانداردهای بین‌المللی و منطقه‌ای

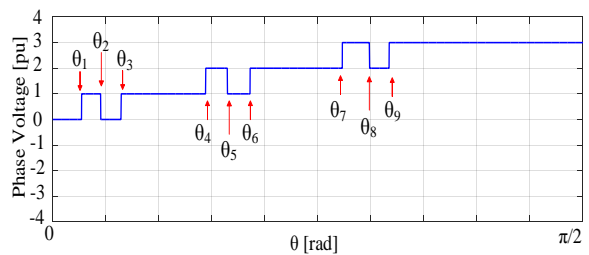
Order (h)	IEC 61000-3-6 1996 1 to 35 kv	CENELEC EN50160:1 999 1 to 35 kv	CIGR WG 36-05 1 to 50 kv
3	4	5	5
5	5	6	6
7	4	5	5
9	1.2	1.5	1.5
11	3	3.5	3.5
13	2.5	3	3
15	0.3	0.5	0.5
17	1.6	2	2
19	1.2	1.5	1.5
21	0.2	0.5	0.5
23	1.2	1.5	1.5
25	1.2	1.5	1.5
27	0.2	-	-
29	1.06	-	-
31	1.01	-	-
33	0.2	-	-
35	0.91	-	-
37	0.85	-	-
39	0.2	-	-
41	0.81	-	-
43	0.78	-	-
45	0.2	-	-
47	0.73	-	-
49	0.71	-	-
THD	6.5% up to 40 th	8% up to 25 th	8% up to 25 th



شکل (۶): طیف هارمونیک اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با سه لبه روی شکل موج خروجی a. با بهینه کردن هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ b. با بهینه کردن رابطه THD

هارمونیک های فرد مضرب سوم ولتاژ که عامل تولید جریان چرخشی در حلقه مثلث اند، بیشتر بهینه شوند. در واقع ضرایب هارمونیک های فرد مضرب سوم ولتاژ، بزرگ تر از ضرایب سایر هارمونیک ها و در حدود ۱/۵ برابر آنها انتخاب شده اند. انتخاب ضرایب تابع هدف به صورت دستی انجام شد؛ به نحوی که علاوه بر کاهش هارمونیک های فرد مضرب سوم و جریان چرخشی، استانداردهای کیفیت توان نیز رعایت شود.

بعد از بهینه سازی با این روش، شکل موج ولتاژ خروجی برای ربع سیکل در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): شکل موج ولتاژ خروجی برای اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با سه لبه

جدول (۳): نتایج حاصل از شبیه سازی

مقدار مؤثر هارمونیک های فرد مضرب سوم ولتاژ تا هارمونیک ۵۰ (٪ از مؤلفه اصلی ولتاژ)	مقدار مؤثر جریان چرخشی (pu)	مقدار مؤثر هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ
۳/۸۲	۰/۰۲۶	بهینه سازی هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ
۵/۹	۰/۰۵۴	بهینه سازی THD

با توجه به جدول (۳)، با این روش مقدار مؤثر جریان چرخشی از ۰/۰۵۴ به ۰/۰۲۶ پریونیت کاهش پیدا کرده و همچنین مقدار THD در حد مطلوب نیز حفظ شده است. شکل موج مربوط به جریان چرخشی و ولتاژ هارمونیک های فرد مرتبه سوم در دو حالت در شکل (۷) نشان داده شده است. برای از بین بردن مؤلفه DC جریان چرخشی، شکل موج آن در سیکل ده نمایش داده شده است؛ در نتیجه، با سلف فیلتری با اندازه ۰/۳۵ میلی هانری می توان این جریان چرخشی باقی مانده در حلقه مثلث را با جاری شدن جریان چرخشی متناظر از بین برد. با توجه به طیف هارمونیک و مقدار THD مشخص می شود علاوه بر کاهش جریان چرخشی الزامات دو استاندارد

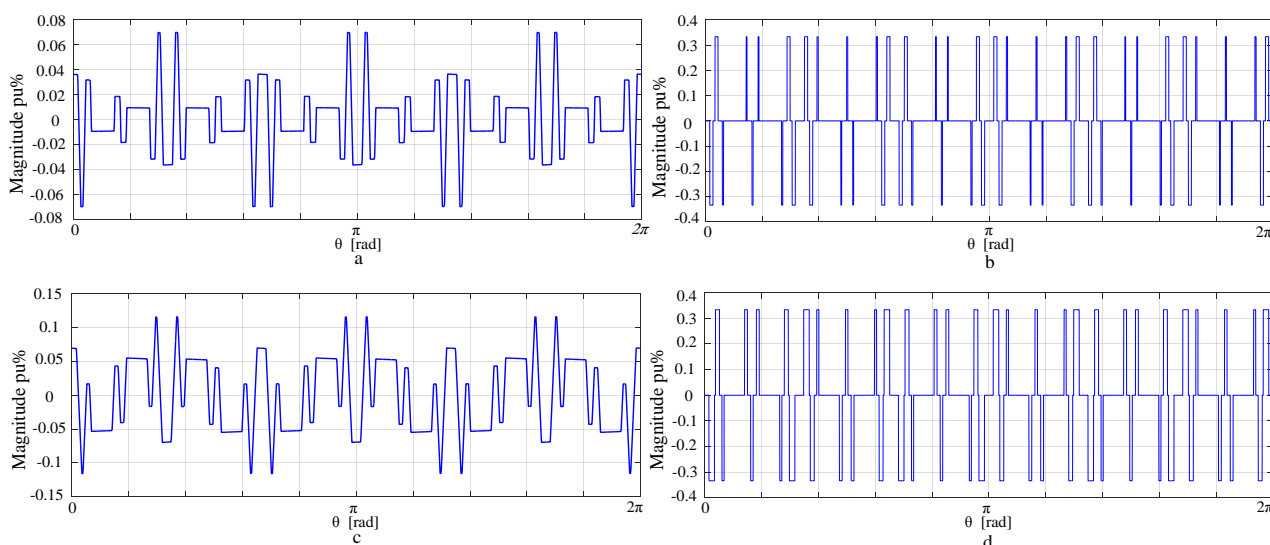
طیف هارمونیک ولتاژ خروجی در شکل a- (۶) نشان داده شده است. در این شکل، هارمونیک ها از هارمونیک ۳ تا ۲۵ مشخص شده اند. برای نشان دادن میزان کاهش هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ بعد از بهینه سازی با این روش، طیف هارمونیک ولتاژ خروجی در حالتی که فقط تابع THD بهینه شده و بر بهینه سازی بیشتر هارمونیک های مضرب سوم ولتاژ تمرکز نشده، در شکل b- (۶) نشان داده شده است. مقایسه طیف هارمونیک در حالتی که بهینه سازی هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ انجام شده و طیف هارمونیک در حالتی که رابطه THD بهینه شده است نشان می دهد هارمونیک های فرد مرتبه سوم با کاهش مواجه شده اند. مقدار زوایای کلیدزنی و مقدار THD، سلف فیلتر در حالت بهینه سازی هارمونیک های فرد مضرب سه ولتاژ در جدول (۲) مشخص شده اند. در این حالت ولتاژ هر سه سلول یک فاز برابر با مقدار 1 pu در نظر گرفته شده است. مقدار مؤثر جریان چرخشی و مقدار مؤثر هارمونیک های فرد مضرب سوم ولتاژ تا هارمونیک ۵۰ در حالت بهینه سازی هارمونیک های فرد مضرب سه و بهینه سازی THD در جدول (۳) نشان داده شده است.

بهینه‌سازی اعوجاج هارمونیک اینورترهای چندسطحی آبشاری تمام پل با اتصال مثلث

شکل b-۸، هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ با جاری شدن جریان چرخشی متناظر حذف شدند. شکل موج و ولتاژ خروجی و هارمونیک‌های آن بعد از حذف جریان چرخشی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل

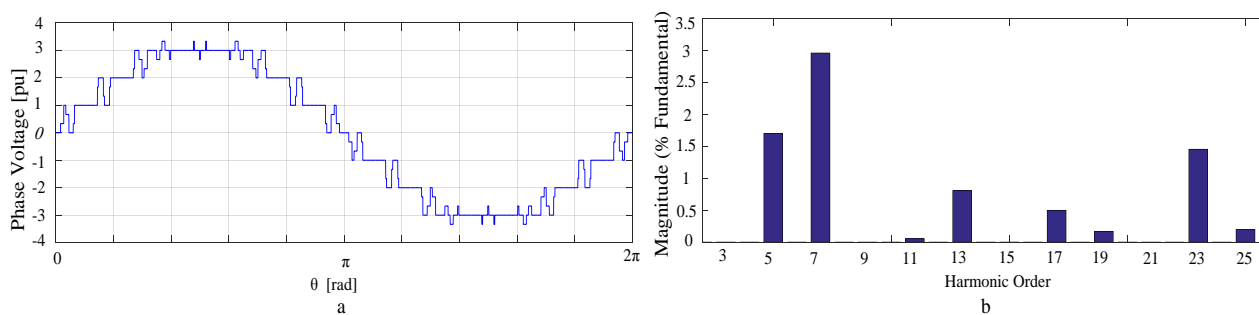
جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی

θ_1 (deg)	θ_2 (deg)	θ_3 (deg)	θ_4 (deg)	θ_5 (deg)	θ_6 (deg)	θ_7 (deg)	θ_8 (deg)	θ_9 (deg)	thd up to 25 th	L_f (mh)
4.58	8.02	11.4	25.7	29.2	33.2	48.7	53.2	56.7	3.85	0.35



شکل (۷): a. شکل موج جریان چرخشی در سیکل دهم برای بهینه‌سازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ b. شکل موج ولتاژ چرخشی برای بهینه‌سازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ c. شکل موج جریان چرخشی در سیکل دهم برای بهینه‌سازی THD d. شکل موج ولتاژ

چرخشی برای بهینه‌سازی THD



شکل (۸): a. شکل موج ولتاژ خروجی بعد از حذف جریان چرخشی در حلقه‌ی مثلث b. طیف هارمونیک بعد از حذف جریان چرخشی

خروجی یکی از حالات برای بهینه‌سازی و بررسی الزامات استاندارد انتخاب شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده برای این حالت، به صورت رابطه (۲۰) است.

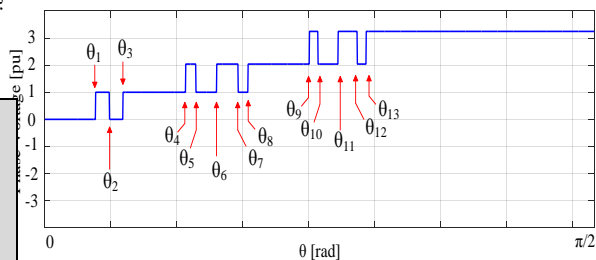
برای آنکه استاندارد با الزامات سختگیرانه‌تر رعایت شود، باید روی سطوح ولتاژ، خروجی تعداد لبه‌ها را افزایش داد. در این حالت، پنج لبه روی سطوح شکل موج خروجی ولتاژ اینورتر هفت سطحی با اتصال مثلث اعمال شده است. بعد از بهینه‌سازی حالات مختلف پنج لبه روی سطوح ولتاژ

تا هارمونیک ۵۰ مشخص شده‌اند. مانند حالت قبل برای نشان دادن میزان کاهش هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ بعد از بهینه‌سازی با این روش، طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی در حالتی که فقط تابع THD بهینه شد، در شکل b- (۱۰) نشان داده شد. مشابه حالت اعمال سه لبه، مقایسه طیف هارمونیکی حالتی که هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ بهینه و طیف هارمونیکی که در آن رابطه THD بهینه شده است، نشان می‌دهد هارمونیک‌های فرد مرتبه سوم ولتاژ با کاهش مواجه شده‌اند. مقدار زوایای کلیدزنی، THD و سلف فیلتر بعد از بهینه‌سازی در جدول (۴) مشخص شده‌اند. در این حالت، ولتاژ یک سلول، ثابت و برابر 1 pu و ولتاژ دو سلول دیگر، متغیر در نظر گرفته شد که مقدار آنها با بهینه‌سازی به دست می‌آید.

مقدار مؤثر جریان چرخشی و مقدار مؤثر هارمونیک‌های فرد مضرب سوم ولتاژ تا هارمونیک ۵۰ در حالت بهینه‌سازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه و بهینه‌سازی THD در جدول (۵) نشان داده شده است

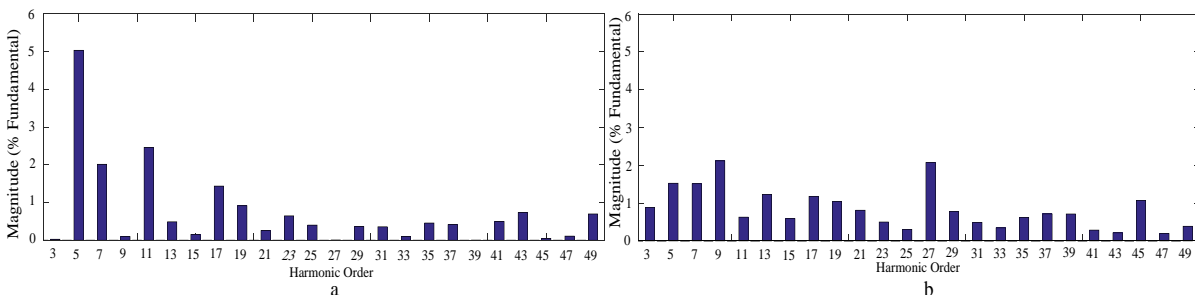
جدول (۵): نتایج حاصل از شبیه‌سازی

بهبودسازی	مقدار مؤثر جریان چرخشی (pu)	مقدار مؤثر هارمونیک‌های فرد مضرب سوم ولتاژ تا هارمونیک ۵۰ (٪ از مؤلفه اصلی ولتاژ)
بهبودسازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ	۰/۰۲۳۲	۰/۳۳
بهبودسازی THD	۰/۱۰۸	۲/۵۳



شکل (۹): شکل موج ولتاژ خروجی برای اینورتر هفت‌سطحی آبشاری تمام‌پل با پنج لبه طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی بعد از بهینه‌سازی

هارمونیک‌های فرد مضرب سوم در شکل a- (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، هارمونیک‌ها از هارمونیک ۳



شکل (۱۰): طیف هارمونیکی اینورتر هفت‌سطحی آبشاری تمام‌پل با پنج لبه روی شکل موج خروجی a. با بهینه‌کردن هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ b. با بهینه‌کردن رابطه THD

جدول (۴): نتایج حاصل از شبیه‌سازی

θ_1 (deg)	θ_2 (deg)	θ_3 (deg)	θ_4 (deg)	θ_5 (deg)	θ_6 (deg)	θ_7 (deg)	θ_8 (deg)	θ_9 (deg)	θ_{10} (deg)	θ_{11} (deg)	θ_{12} (deg)	θ_{13} (deg)	V_{dc2} (pu)	V_{dc3} (pu)	thd up to 40 th	L_f (mh)
8.02	10.3	12.6	22.9	24.6	28	31.5	33.2	42.9	44.1	47.5	50.9	52.1	1.05	1.20	6.31	0.38

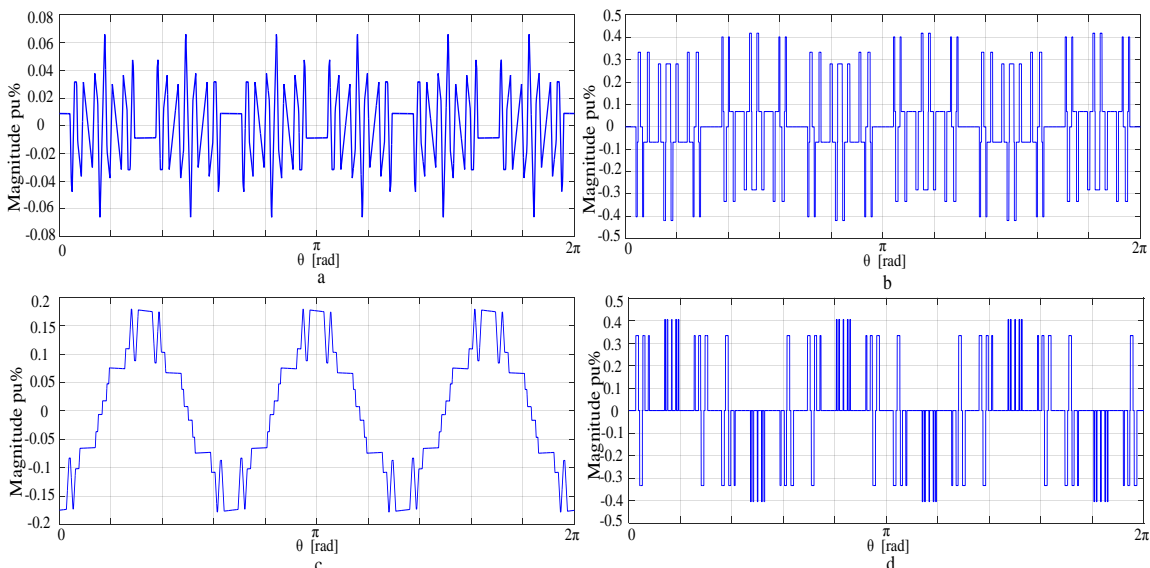
حذف می‌شود؛ در این صورت، شکل موج ولتاژ خروجی و طیف هارمونیک در شکل (۱۲) نمایش داده می‌شوند. همان‌طور که از شکل b-(۱۲) مشخص است، هارمونیک‌های فرد مضرب سه با سلف کوچکی حذف شدند.

با توجه به اینکه با اعمال پنج لبه روی شکل موج ولتاژ خروجی، نتایج مطلوب و در حد استاندارد حاصل شد، در این مقاله، تعداد لبه‌ها بیش از پنج لبه لحاظ نشد؛ زیرا باعث افزایش فرکانس کلیدزنی می‌شود.

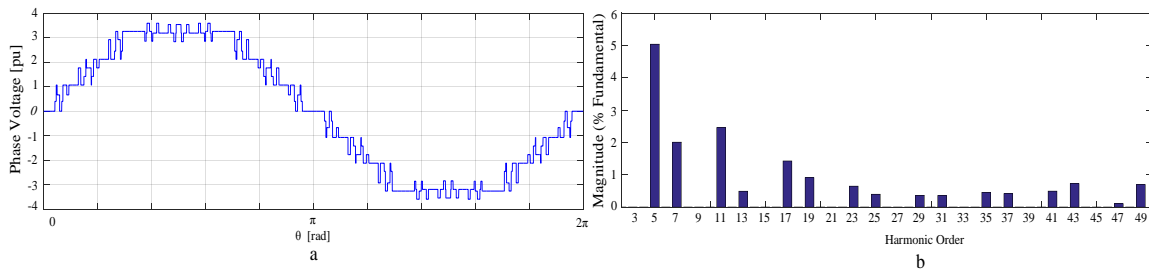
در مراجع [۱۵، ۱۲] با استفاده از روش کلیدزنی فرکانس بالا هارمونیک‌های مضرب سوم ولتاژ و در نتیجه، جریان چرخشی کاهش پیدا کرده است. در این مقاله، با اینکه از روش کلیدزنی فرکانس پایین استفاده شد، نتایج آن همچون روش‌هایی با کلیدزنی فرکانس بالا به کاهش چشمگیر جریان چرخشی منجر شده است.

با توجه به جدول (۵)، مقدار مؤثر جریان چرخشی با این روش از ۰/۱۰۸ به ۰/۰۲۳۲ پریونیت کاهش پیدا کرده است. شکل موج مربوط به جریان چرخشی و ولتاژ هارمونیک‌های فرد مرتبه سوم در دو حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. برای از بین بردن مؤلفه DC جریان چرخشی، شکل موج آن در سیکل ده نمایش داده شده است؛ در نتیجه، با سلف فیلتری کوچکی به اندازه ۰/۳۸ میلی‌هانری می‌توان این جریان چرخشی باقی‌مانده در حلقه مثلث را حذف کرد. با توجه به طیف هارمونیک و مقدار THD علاوه بر کاهش جریان چرخشی، الزامات استاندارد IEC61000-3-6 رعایت می‌شود. با توجه به اینکه الزامات دو استاندارد EN50160 و WG36-05 آزرانده‌تر از الزامات IEC61000-3-6 است؛ در نتیجه، این دو استاندارد نیز رعایت می‌شوند.

مشابه حالت سه لبه بعد از قرارگیری در حلقه مثلث این جریان چرخشی کاهش یافته به دلیل جریان چرخشی متناظر



شکل (۱۱): a. شکل موج جریان چرخشی در سیکل دهم برای بهینه‌سازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ b. شکل موج ولتاژ چرخشی برای بهینه‌سازی هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ c. شکل موج جریان چرخشی در سیکل دهم چرخشی برای بهینه‌سازی THDd. شکل موج ولتاژ چرخشی برای بهینه‌سازی THD



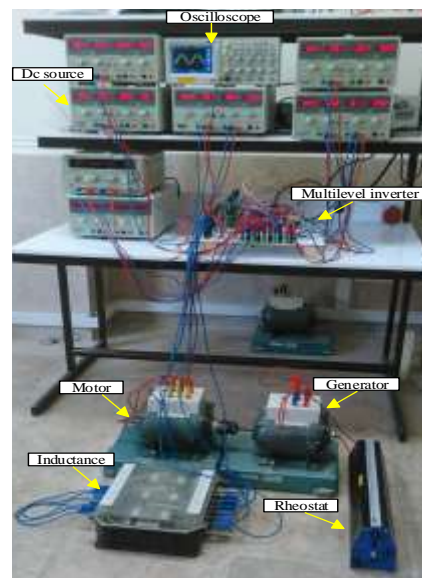
شکل (۱۲): a. شکل موج ولتاژ خروجی بعد از حذف جریان چرخشی در حلقه‌ی مثلث b. طیف هارمونیک بعد از حذف جریان چرخشی

منابع DC دارای دو خروجی تنظیم شده با حداکثر ولتاژ ۳۰ ولت و جریان ۶ آمپر و یک خروجی ثابت ۵ ولت است. کلیدهای IRF540 به همراه درایورهای ماسفت قدرت نیم‌پلکار می‌کند که سیگنال‌های سطح TTL مبدل را به ولتاژ و جریان خروجی بالاتر تبدیل می‌کند. فرکانس منبع روی ۲۰ هرتز تنظیم شده است. برای پیاده‌سازی روش کلیدزنی فرکانس پایین در این آزمایش تجربی، از میکروکنترلر ATMEGA-32 برای کنترل زوایای کلیدزنی استفاده شده است. این زوایا در این میکروکنترلر ذخیره می‌شوند و برای تمام کلیدها پالس ON و OFF تولید می‌کنند. خروجی هر سلول با دو بیت میکروکنترلر تعیین می‌شود. برای جداکردن جریان از میکروکنترلر از اپتوکوپلر 6N137 استفاده می‌شود. در این اینورتر سه فاز هفت سطحی با اتصال مثلث، ۱۸ بیت میکروکنترلر برای تولید شکل موج ولتاژ خروجی و جریان چرخشی درگیر می‌شوند. همچنین رثوستا به‌عنوان بار خروجی از طریق موتور و ژنراتور به خروجی اینورتر سه فاز متصل شد. مقدار این بار مقاومتی در این آزمایش ۳/۴۶ اهم است. داده‌های تجربی با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال TDS2014C ضبط و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شوند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی براساس زوایای کلیدزنی است که در جدول (۲) برای حالت اعمال سه لبه روی شکل موج خروجی اینورتر هفت سطحی ارائه شده‌اند.

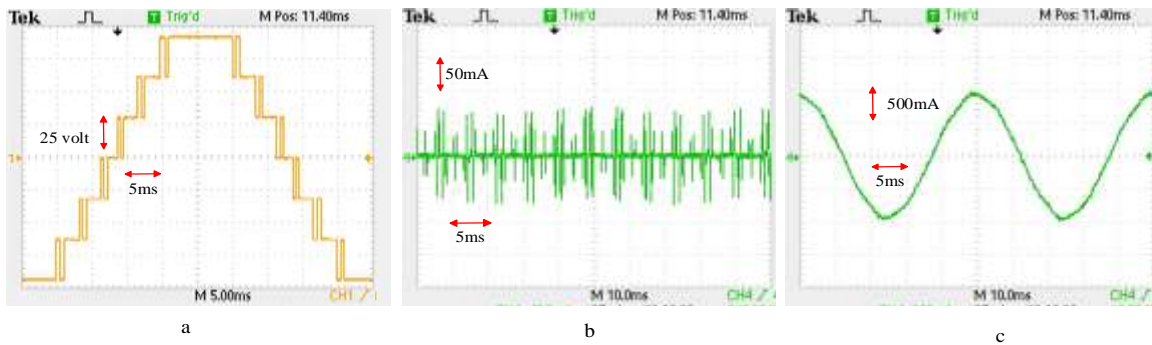
شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پل با اعمال سه لبه در یک سیکل در شکل a-(۱۴) نشان داده شده است. مقدار THD ولتاژ شکل موج خروجی تا هارمونیک ۲۵ با بررسی نتایج عملی در نرم‌افزار متلب ۳/۷۸ درصد است که تأییدی بر مقدار THD به دست آمده در شبیه‌سازی است.

۵- نتایج تجربی

شبیه‌سازی‌های تئوری ارائه شده در بخش قبل با استفاده از نرم‌افزار متلب، لازم است با آزمایشات تجربی تأیید شوند؛ در نتیجه، یک نمونه آزمایشگاهی اینورتر سه فاز هفت سطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث ساخته شد. این نمونه آزمایشگاهی در شکل (۱۳) نشان داده شد. این نمونه آزمایشگاهی شامل منابع DC ورودی، اسیلوسکوپ، موتور، ژنراتور، اندوکتانس به‌عنوان سلف فیلتر، رثوستا به‌عنوان بار خروجی و اینورتر سه فاز هفت سطحی است که در هر فاز سه سلول وجود دارد. حداکثر ولتاژی که هر سلول می‌تواند تحمل کند، ۱۰۰ ولت است. این ولتاژ حداکثر بر اساس حداکثر استرس روی کلیدها مشخص می‌شود.



شکل (۱۳): نمونه آزمایشگاهی اینورتر سه فاز هفت سطحی آبشاری تمام‌پل با اتصال مثلث



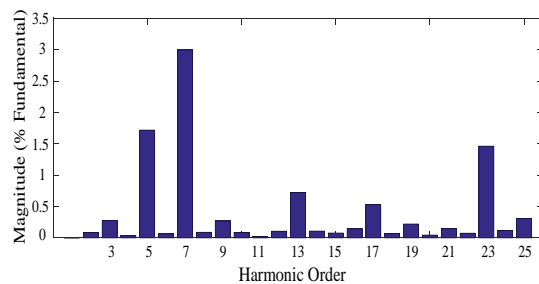
شکل (۱۴): a. شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر هفت‌سطحی آبخاری تمام‌پل با اعمال سه لبه روی شکل موج در یک سیکل b. شکل موج جریان چرخشی در حلقه مثلث بعد از بهینه‌سازی در دو سیکل c. شکل موج جریان بار موتور در دو سیکل

مضرب سه ولتاژی پیشنهاد می‌کند که در اینورتر چندسطحی آبخاری تمام‌پل با اتصال مثلث، تولید جریان چرخشی می‌کنند. این راهکار مبتنی بر روش کلیدزنی فرکانس پایین برای بهینه‌سازی هارمونیک‌ها است که در آن، میزان هارمونیک‌های فرد مضرب سه ولتاژ کاهش می‌یابد و مقدار THD نیز در حد مطلوب حفظ می‌شود. این بهینه‌سازی در دو حالت روی شکل موج خروجی یک اینورتر هفت‌سطحی آبخاری تمام‌پل با اتصال مثلث بررسی شده است. کاهش جریان چرخشی باعث کاهش اندوکتانس سلف فیلتر در هر شاخه از مثلث و کاهش تلفات در سیستم است. شبیه‌سازی‌ها و نتایج آزمایشگاهی کارایی روش پیشنهادی برای کاهش جریان چرخشی را تأیید می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهند علاوه بر کاهش جریان چرخشی و کوچک‌شدن اندوکتانس سلف فیلتر الزامات تعدادی از استانداردهای کیفیت توان نیز رعایت می‌شوند.

مراجع

- [1] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, and J. I. Leon, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
- [2] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez and M. A. Perez, "A survey on cascaded multilevel inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, pp. 2197–2206, Jul. 2010.
- [3] J. Rodriguez, J. S. Lai and F. Z. Peng,

شکل موج جریان چرخشی موجود در حلقه مثلث بعد از بهینه‌سازی و همچنین جریان بار موتور در دو سیکل به ترتیب در شکل b- (۱۴) و c- (۱۴) نشان داده شده است. همچنین طیف هارمونیک شکل موج خروجی نتیجه عملی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۵): طیف هارمونیک شکل موج خروجی نتیجه عملی

ولتاژ ورودی سلول‌ها برابر ۲۵ ولت در نظر گرفته شد. مقدار مؤثر این جریان چرخشی در نتایج تجربی با در نظر گرفتن سلف ۸ میلی‌هائری که معادل ۰/۰۱۸ پرینیت امپدانس است، به مقدار ۳۹ میلی‌آمپر می‌رسد که این مقدار ۳/۹ درصد مقدار نامی خواهد بود. میزان جریان بار موتور از نتایج تجربی برابر با ۰/۴ پرینیت است. نتایج عملی تأییدی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبنی بر عملکرد درست این روش در راستای کاهش میزان جریان چرخشی در حلقه مثلث است.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله، راهکاری برای کاهش هارمونیک‌های فرد

- Huerta, and F. J. Rodriguez, "Circulating current elimination in modular multilevel converter with repetitive controllers," In Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE, pp. 6476-6481, 2016.
- [14] L. He, K. Zhang, J. Xiong and S. Fan, "A repetitive control scheme for harmonic suppression of circulating current in modular multilevel converters," IEEE transactions on power electronics, Vol.30, No. 1, pp. 471-481, 2015.
- [15] Y. Sun, C. A. Teixeira, D. Gr. Holmes, B. McGrath and J. Zhao, "Low-order circulating current suppression of PWM-based modular multilevel converters using DC-link voltage compensation," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 1, pp. 210-225, 2018.
- [16] B. Chen, Y. Chen, C. Tian, J. Yuan and X. Yao, "Analysis and suppression of circulating harmonic currents in a modular multilevel converter considering the impact of dead time," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 7, pp. 3542-3552, 2015.
- [17] S. Du, J. Liu, J. Lin, and Y. He, "A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, pp. 101-111, 2013.
- [18] Copper Development Association, "Voltage disturbances. Standard EN 50160 voltage characteristics in public distribution systems," pp. 3-7, 2004.
- [19] M. Ebadi, M. Joorabian, J. S. Moghani "A new cascaded transformerless multilevel inverter to connect DG sources to network, with load harmonics compensation capability" Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 1-16, 2015.
- [20] G. Carpinelli and A. Testa, "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 452-465, 1996.
- [21] P. Sochor and H. Akagi, "Theoretical comparison in energy-balancing capability between star-and delta-configured modular multilevel cascade inverters for utility-scale photovoltaic systems," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No.3, pp 1980-1992, 2016.
- [22] L. K. Haw, M. S. A. Dahidah, and H. A. F. Almurib, "SHE-PWM cascaded multilevel inverter with adjustable DC voltage levels "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 4, pp.724-738, Aug. 2002.
- [4] A. Edpuganti and A. K. Rathore, "A survey of low switching frequency modulation techniques for medium-voltage multilevel converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5, pp. 4212-4228, Sept-Oct. 2015.
- [5] L. Yiu, H. Hong and A. Q. Huang, "Real-time calculation of switching angles minimizing THD for multilevel inverters with step modulation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, pp 285-293, 2009.
- [6] M. S. A. Dahidah, G. Konstantinou, and V. G. Agelidis, "A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: formulations, solving algorithms, implementation and applications," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 8, pp. 4091-4106, 2015.
- [7] N. Yousefpoor, H. S. Fathi, N. Farokhnia, and A. H. Abyaneh, "Application of OMTD on the line voltage of cascaded multi-level inverters with adjustable DC sources," 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Taichung, Taiwan, pp. 498-503.
- [8] R. Khamooshi and A. Namadmalan, "Converter utilisation ratio assessment for total harmonic distortion optimisation in cascaded H-bridge multi-level inverters," IET Power Electronics, Vol. 10, No. 9, pp. 2103-2110, 2016.
- [9] R. Luo, Y. He, and J. Liu, "Research on the unbalanced compensation of Delta-connected cascaded H-bridge multilevel SVG," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018.
- [10] E. Behrouzian and M. Bongiorno, "Investigation of negative-sequence injection capability of cascaded H-bridge converters in star and delta configuration," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 2, pp. 1675-1683, 2017.
- [11] P. Wu, Y. Chen, and P. Cheng, "The delta-connected cascaded H-bridge converter application in distributed energy resources and fault ride through capability analysis," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-8, 2016.
- [12] Chen, Tsung-Po, "Zero-sequence circulating current reduction method for parallel HEPWM inverters between AC bus and DC bus," IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 59, No. 1, pp. 290-30, 2012.
- [13] M. Moranchel, I. Sanz, E. J. Bueno, F.

- control for STATCOM applications,*” IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 29, No. 12, pp.6433-6444, 2014.
- [23] N. Farokhnia, S. H. Fathi, N. Yousefpoor and M. K. Bakhshizadeh, “*Minimisation of total harmonic distortion in a cascaded multilevel inverter by regulating voltages of dc sources* ,” IET Power Electronics, Vol. 5, No. 1, pp. 106-114, 2011.
- [24] Y. J. Gong, J. J. Li, Y. Zhou, Y. Li, H. S. -H. Ghung, Y. -H. Shi, and J. Zhang, “*Genetic learning particle swarm optimization,*” IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 46, No. 10, pp. 2277–2290, 2016.
- [25] z. pourtaheri and s. h. zahiri “*Design of an integrated phase frequency detector with optimal power consumption and delay by using particle swarm optimization algorithm*” Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 15-22, 2014.

¹Total Harmonic Distortion(THD)

²Optimal Minimization of the THD(OMTHD)

³Particle Swarm Optimization(PSO)