

اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پل با منابع جریان مستقیم گسسته

احمد بهزادی نژاد^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علیرضا نمدمالان^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول - خوزستان - ایران - ahmadbehzadinezhad@jsu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول - خوزستان - ایران - Namadmalan@jsu.ac.ir

چکیده: در روش‌های کلیدزنی فرکانس پایین، منابع جریان مستقیم^۱ (DC) تنظیم شونده همراه با زوایای کلیدزنی درجه‌های آزادی سیستم را به‌منظور کاهش یا حذف هارمونیک‌ها به صورت مؤثر افزایش می‌دهند. استفاده از منابع DC متغیر هزینه، تلفات و پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد. این مقاله یک روش جدید برای اینورترهای چند سطحی آبشاری تمام‌پل بر اساس منبع DC متغیر گسسته به‌منظور کاهش تعداد منابع DC تنظیم شونده ارائه می‌دهد. در این مقاله، برای تنظیم ولتاژ خروجی یک رویه بهینه‌سازی بر اساس تغییرات گسسته منابع جریان مستقیم ارائه شده است؛ که منجر به کاهش موثر هارمونیک‌ها و بهبود کیفیت ولتاژ خروجی می‌شود. در روش بهینه‌سازی، مقادیر نزدیک به بهینه منابع DC و زوایای کلیدزنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۲ (MOGA) به دست می‌آید. به‌منظور تأیید امکان‌پذیری راه‌حل جدید، یک نمونه آزمایشگاهی بر اساس اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پل با سه سلول پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی، اثربخشی روش پیشنهادی بر مبنای منابع DC متغیر گسسته را در کاهش هارمونیک‌ها و تنظیم ولتاژ نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پل، منابع DC متغیر، اعوجاج هارمونیک کل^۳ (THD)

Seven Level Cascaded H-bridge Multilevel Inverter with Discrete Variation of DC Sources

Ahmad Behzadi Nezhad¹, M.Sc. Student; Alireza Namadmalan², Assistant Professor.

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology-Dezful, Khuzestan, Iran, Email: ahmadbehzadinezhad@jsu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi Shapur University of Technology-Dezful, Khuzestan, Iran, Email: Namadmalan@jsu.ac.ir

Abstract: In low switching frequency strategies, regulated DC sources along with the switching angles increase the system's degrees of freedom to effectively mitigate or eliminate harmonics. Utilizing the variable DC sources increase the cost, losses and complexity of the system. This paper presents a new method for cascaded H-bridge multilevel inverters based on discrete variable DC source to reduce number of the regulated DC sources. In this paper, an optimization procedure for output voltage regulation is devised based on the discrete variable DC sources, which results in effective reduction of harmonics and improvement of the output voltage quality. In the optimization method, the near optimum values of DC sources and switching angles are obtained using multi objective genetic algorithm. To verify the feasibility of the new solution, a laboratory prototype is implemented based on seven level cascaded H-bridge inverter with three cells in each phase. Simulation and experimental results validate the effectiveness of the proposed method based on the discrete variable DC sources in reduction of harmonics and voltage regulation.

Keywords: Cascaded H-bridge multilevel inverter, variable DC sources, total harmonic distortion.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵

نام نویسنده مسئول: علیرضا نمدمالان

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

۱- مقدمه

اینورترهای چندسطحی به دلیل ظرفیت‌ها و ویژگی‌های قابل توجه، به‌صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله تجهیزات انتقال انعطاف‌پذیر متناوب، جبران‌سازهای استاتیک سنکرون، راه‌اندازهای سرعت متغیر و منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از میان ساختارهای مختلف اینورترهای چندسطحی، اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پیل با توجه به برخی ویژگی‌ها و مزایا مانند مدولاریته، ساختار توسعه‌پذیر و عدم نیاز به دیودهای کلمپ و خازن‌های متعادل‌کننده ولتاژ نسبت به دیگر ساختارها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۲، ۳].

روش‌های مدولاسیون بسیاری به‌منظور بهبود کیفیت توان و کنترل ولتاژ خروجی برای اینورترهای چندسطحی پیشنهاد شده است؛ که با توجه به فرکانس کلیدزنی آن‌ها به دو دسته روش‌های مدولاسیون فرکانس بالا و فرکانس پایین تقسیم می‌شوند. روش‌های مدولاسیون فرکانس بالا برای دستیابی به کیفیت توان مطلوب نیازمند دستگاه‌هایی با فرکانس کلیدزنی بالا هستند در حالی که روش‌های مدولاسیون فرکانس پایین به دلیل بهره‌وری بهتر دستگاه و بازده بالاتر مبدل برای کاربرد‌های توان بالا ترجیح داده می‌شوند [۴]. روش‌های حذف هارمونیک انتخابی^۴ [۵]، کاهش هارمونیک انتخابی^۵ [۶] و حداقل‌سازی بهینه اعوجاج هارمونیک کل^۶ (OMTHD) [۷] از متداول‌ترین روش‌های مدولاسیون فرکانس پایین به شمار می‌روند.

معمولاً در روش‌های مدولاسیون فرکانس پایین معادله‌های غیرخطی و غیر جبری توسط روش‌ها و الگوریتم‌های گوناگون حل می‌شوند. در برخی از این مسائل، با فرض ثابت بودن منابع DC، مقادیر زوایای کلیدزنی متناسب با هدف مسئله به‌دست می‌آیند [۸، ۹]. باید به این نکته توجه داشت که منابع DC می‌توانند با استفاده از یکسوسازهای کنترل‌شونده یا مبدل‌های DC-DC دارای مقادیر مختلفی باشند. در پژوهش‌های اخیر، استفاده از منابع DC متغیر همراه با زوایای کلیدزنی درجه‌های آزادی سیستم را به‌منظور حداقل‌سازی مقدار THD [۷، ۱۰]، حذف یا کاهش هارمونیک‌های مشخص [۸، ۱۱] برای محدوده وسیع از شاخص‌های مدولاسیون به‌صورت مؤثری افزایش می‌دهد. استفاده از منابع DC کنترل‌شونده برای تنظیم ولتاژ هر سلول در اینورترهای آبشاری تمام‌پیل، هزینه، پیچیدگی کنترل و تلفات سیستم را افزایش می‌دهد [۱۲، ۱۳].

در این مقاله، یک روش مؤثر برای کاهش تعداد منابع DC تنظیم‌شونده بر اساس منبع DC متغیر گسسته پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی برای کاربردهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که منبع DC متغیر توسط یکسوسازهای کنترل‌شونده متصل به ترانسفورماتورهای سه فاز، ولتاژ DC تنظیم‌شونده را برای اینورتر چندسطحی فراهم می‌کند مانند راه‌اندازهای ولتاژ متوسط. منبع DC متغیر گسسته پیشنهادی متشکل از یکسوساز کنترل‌نشده و ترانسفورماتور چند تپ است؛ که به‌جز تپ صفر، هر تپ یک ولتاژ DC مشخص را تولید می‌کند.

کند. با جایگزین کردن منابع DC متغیر گسسته به‌جای منابع DC کنترل‌شونده در برخی سلول‌ها، می‌توان از مزایای ساختار پیشنهادی مانند کاهش هزینه، کاهش تلفات ناشی از بهبود ضریب قدرت و کاهش فیدبک‌ها و مدارات کنترلی بهره‌مند شد. برخلاف منابع DC کنترل‌شونده که مقادیر ولتاژ DC را به‌صورت پیوسته برای اینورتر چندسطحی فراهم می‌کنند، منبع DC متغیر گسسته مقادیر ولتاژ DC مشخصی را به‌صورت گسسته برای اینورتر چندسطحی فراهم می‌کند؛ که سبب کاهش کیفیت ولتاژ خروجی می‌شود اما با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی سعی شده تا علاوه بر استفاده از منابع DC متغیر گسسته و دستیابی به مزایای ساختار پیشنهادی، کیفیت ولتاژ خروجی در حد مطلوب حفظ شود. منبع DC متغیر گسسته می‌تواند برای انواع اینورترهای چندسطحی آبشاری تمام‌پیل باهدف کاهش تعداد منابع DC کنترل‌شونده مورد نیاز به‌کار گرفته شود. با این حال، در این مقاله به دلیل سادگی و محبوبیت، پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پیل با شکل موج پلکانی در حالت‌های استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته و استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته انجام شده است.

این مقاله از شش بخش تشکیل شده است. در بخش دوم، روش دقیق محاسبه مقدار THD و ولتاژ خط در اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پیل با منابع DC متغیر بیان می‌شود. فرمول‌بندی و بهینه‌سازی روش پیشنهادی به ترتیب در بخش‌های سوم و چهارم ارائه می‌شود. در بخش‌های پنجم و ششم، اثربخشی روش پیشنهادی توسط نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی تأیید می‌شود. نتیجه‌گیری این پژوهش در بخش هفتم ارائه می‌شود.

۲- اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پیل با منابع DC متغیر

ساختار اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام‌پیل با سه سلول همراه با شکل موج پلکانی ولتاژ فاز خروجی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در اینورتر چندسطحی آبشاری تمام‌پیل، سلول‌ها به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند و شکل موج پلکانی ولتاژ خروجی آن از مجموع ولتاژ تولیدشده توسط هر سلول به‌دست می‌آید. نیاز به منابع DC جداگانه برای هر سلول از ویژگی‌های قابل توجه این اینورترها است. تعداد سطوح ولتاژ فاز خروجی، C، از رابطه (۱) به‌دست می‌آید؛ که k برابر تعداد سلول‌ها در هر فاز است.

$$C = 2k - 1. \quad (1)$$

در شکل موج پلکانی، تعداد زوایای کلیدزنی برابر تعداد منابع DC ورودی هر سلول است. θ_1 و V_{dc1} ، θ_2 و V_{dc2} ، θ_3 و V_{dc3} به ترتیب زوایای کلیدزنی و ولتاژ منبع سلول اول، دوم و سوم هستند. برای تولید ولتاژ خروجی مطلوب باید مقدار شش متغیر شامل زوایای کلیدزنی و ولتاژ منابع DC تعیین شود. منابع DC به‌صورت منابع DC کنترل‌شونده هستند و با توجه به مقدار ولتاژ خروجی مطلوب می‌توانند مقادیر مختلفی داشته باشند.

به مقدار مؤثر ولتاژ خط دستیافت. با زوایای کلیدزنی مشخص و ۱۲۰ درجه انتقال در ولتاژ فاز، دومین ولتاژ فاز محاسبه می‌شود. با تفریق دو ولتاژ فاز، ولتاژ خط توسط رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$V_{ab}(\theta) = V_a(\theta) - V_b(\theta) \quad (7)$$

مقدار مؤثر ولتاژ خط با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

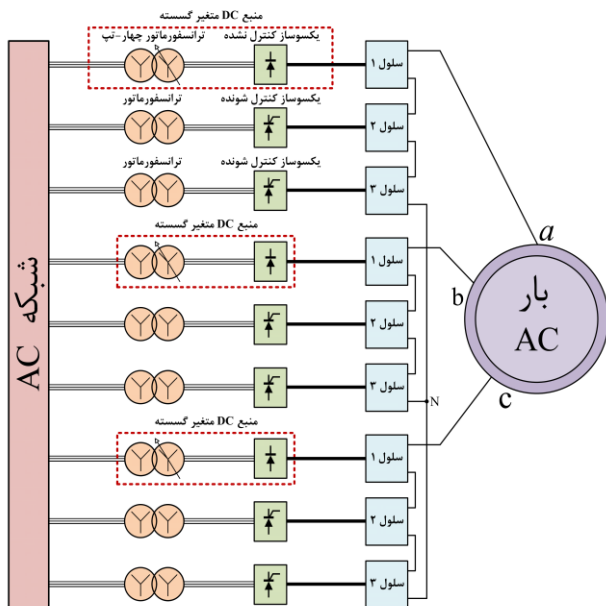
$$V_{ms\ line}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{ab}^2(\theta) d\theta} \quad (8)$$

شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با سه منبع DC تنظیم شونده دارای کیفیت مطلوب و مناسب برای بسیاری از کاربردها مانند راه‌اندازهای سرعت متغیر است. اگرچه استفاده از منابع DC تنظیم شونده هزینه، پیچیدگی کنترل و تلفات سیستم را افزایش می‌دهد. در بخش بعد، روش پیشنهادی با هدف کاهش تعداد منابع DC تنظیم شونده روی اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل پیاده‌سازی می‌شود.

۳- اینورتر چندسطحی آبشاری تمام پل با منابع DC متغیر گسسته

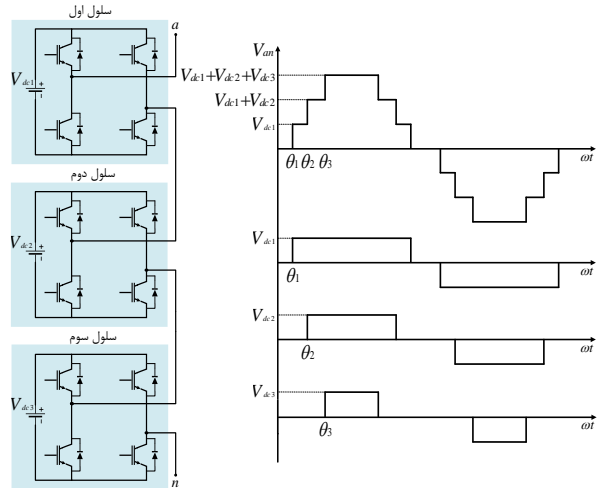
۳-۱- استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته

شکل ۲، شماتیک ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد که بر اساس اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با سه سلول و یک منبع DC متغیر گسسته پیاده‌سازی شده است.



شکل ۲: شماتیک طرح پیشنهادی با یک منبع DC متغیر گسسته در هر فاز

سلول‌های دوم و سوم که به منابع DC تنظیم شونده متصل هستند، می‌توانند توسط شبکه‌ی AC و با استفاده از ترانسفورماتور سه فاز و یکسوساز کنترل شونده تغذیه شوند. منبع DC سلول یک را منبع



شکل ۱: ساختار تک فاز اینورتر چندسطحی آبشاری تمام پل با منابع DC متغیر و شکل موج ولتاژ فاز خروجی آن

سری فوریه شکل موج پلکانی ولتاژ فاز خروجی، V_a ، با در نظر گرفتن منابع DC متغیر توسط رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$V_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، V_h برابر اندازه هارمونیک مرتبه h است؛ که توسط رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$V_h = \frac{4}{h\pi} \sum_{j=1}^c V_{dcj} \cos(h\theta_j), \quad h = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$

که V_{dcj} و θ_j به ترتیب زاویه کلیدزنی و ولتاژ منبع DC سلول j است. مقدار THD شکل موج ولتاژ خط را می‌توان بر اساس مقدار مؤثر ولتاژ خط و مؤلفه اصلی آن با استفاده از رابطه (۴) بیان کرد.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{V_{1,ms\ line}}{V_{ms\ line}}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $V_{1,ms\ line}$ مقدار مؤثر مؤلفه اصلی و $V_{ms\ line}$ مقدار مؤثر کل شکل موج ولتاژ خط خروجی است. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ فاز اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پل با سه منبع DC کنترل شونده با استفاده از رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$V_{1,ms\ p} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \{V_{dc1} \cos(\theta_1) + V_{dc2} \cos(\theta_2) + V_{dc3} \cos(\theta_3)\} \quad (5)$$

مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط $\sqrt{3}$ برابر از مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ فاز بزرگ‌تر است و توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$V_{1,ms\ line} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \{V_{dc1} \cos(\theta_1) + V_{dc2} \cos(\theta_2) + V_{dc3} \cos(\theta_3)\} \quad (6)$$

با توجه به تغییر شکل موج ولتاژ خط به ازای زوایای کلیدزنی مختلف، نمی‌توان با استفاده از یک فرمول تحلیلی مقدار مؤثر ولتاژ خط را محاسبه کرد؛ اما می‌توان مقدار ولتاژ مؤثر خط را با استفاده از روش بیان شده در [۱۴] به دست آورد. در این روش اگر زوایای کلیدزنی و ولتاژ فاز مشخص باشند، با انتگرال گیری از شکل موج ولتاژ خط می‌توان

داد. بازه‌بندی محدوده در دسترس ولتاژ مؤثر خط برای چهار مقدار مختلف α در شکل ۴(ب) نشان داده شده است؛ که در این مقاله، حداکثر ولتاژ مؤثر خط ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شده است.

متغیرهای بهینه‌سازی برای هر بازه، شامل زوایای کلیدزنی و مقادیر V_{dc1}^i, V_{dc2}^i و V_{dc3}^i به گونه‌ای توسط الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند که مقدار ولتاژ مؤثر خط خروجی با مقدار مراکز بازه‌ها برابر شود. در بهینه‌سازی، به منظور دستیابی به کیفیت توان مناسب برای تمام مقادیر بازه، مقدار THD ولتاژ مؤثر خط خروجی در مرکز و مرزهای بازه در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۴ و رابطه (۹)، ولتاژ بازه‌ها با یکدیگر متناسب هستند و این نسبت توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad (10)$$

زوایای کلیدزنی نزدیک به بهینه برای تمام بازه‌ها دارای مقدار ثابت هستند درحالی‌که مقدار نزدیک به بهینه منابع DC بر اساس رابطه (۱۰) با یکدیگر متناسب هستند؛ بنابراین، فرآیند بهینه‌سازی را می‌توان به منظور دستیابی به V_{dc1}^1, V_{dc2}^1 و V_{dc3}^1 فقط برای اولین بازه انجام داد و برای بازه‌های دیگر مقدار نزدیک به بهینه منابع DC با استفاده از رابطه‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آید.

$$V_{dc1}^i = V_{dc1}^1 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{i-1} \quad (11)$$

$$V_{dc2}^i = V_{dc2}^1 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{i-1} \quad (12)$$

$$V_{dc3}^i = V_{dc3}^1 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{i-1} \quad (13)$$

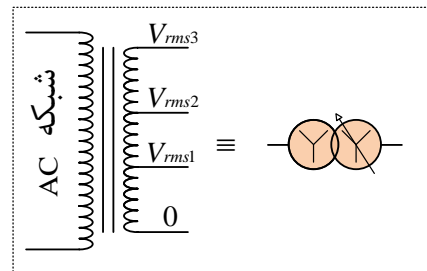
با داشتن مقادیر V_{dc1}^1 ، مقدار مؤثر تپ‌های ترانسفورماتور مرتبط با هر بازه توسط رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. معادله (۱۴) رابطه بین ولتاژ ورودی و خروجی یکسوساز تمام پل سه فاز دیودی است.

$$V_{msi} = \frac{\pi V_{dc1}^i}{3\sqrt{6}} \quad (14)$$

همان‌طور که پیش‌ازین ذکر شد، منبع DC متغیر گسسته برای تمام مقادیر ولتاژ مؤثر خط خروجی در هر بازه یک مقدار DC ثابت فراهم می‌کند که مقدار آن برابر V_{dc1}^i است؛ بنابراین برای تولید ولتاژ مؤثر خط خروجی مطلوب با THD مناسب باید مقدار V_{dc2}^i و V_{dc3}^i به صورت خطی تغییر کنند. میزان تغییرات $V_{dc2}^i, \Delta V_{dc2}$ و $V_{dc3}^i, \Delta V_{dc3}$ تغییرات $V_{dc3}^i, \Delta V_{dc3}$ ، به ترتیب با مشتق‌گیری از هر دو طرف رابطه (۶) نسبت به V_{dc2}^i و V_{dc3}^i توسط رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آیند.

$$\Delta V_{dc2} = \frac{\pi \Delta V_{1,ms \text{ line}}}{2\sqrt{6} \cos(\theta_2)} \quad (15)$$

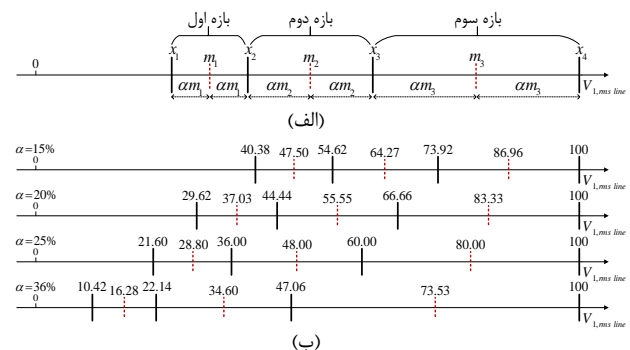
DC متغیر گسسته می‌نامند زیرا ولتاژ منبع بر اساس یک طرح گسسته تغییر می‌کند. برای این منظور از یک ترانسفورماتور سه فاز چهار تپ متصل به یکسوساز کنترل نشده استفاده شده است؛ که ساختار ترانسفورماتور چهار تپ در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: ساختار ترانسفورماتور چهار تپ

در این روش، به جز تپ صفر، هر تپ برای تولید مقدار ولتاژ DC مشخص در نظر گرفته می‌شود؛ که از آن برای بازه‌های مشخص از ولتاژ مؤثر خط خروجی استفاده می‌شود. مهم‌ترین گام در این روش تعیین نسبت تبدیل هر تپ است که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در بخش بعد محاسبه می‌شود.

ابتدا محدوده ولتاژ مؤثر خط خروجی با توجه به تعداد تپ ترانسفورماتور به چند بازه تقسیم می‌شود. محدوده در دسترس ولتاژ مؤثر خط خروجی و بازه‌های آن در شکل ۴(الف) نشان داده شده است.



شکل ۴: محدوده‌ی در دسترس ولتاژ مؤثر خط خروجی و بازه‌های آن (الف): در حالت کلی. (ب) برای چهار مقدار مختلف α .

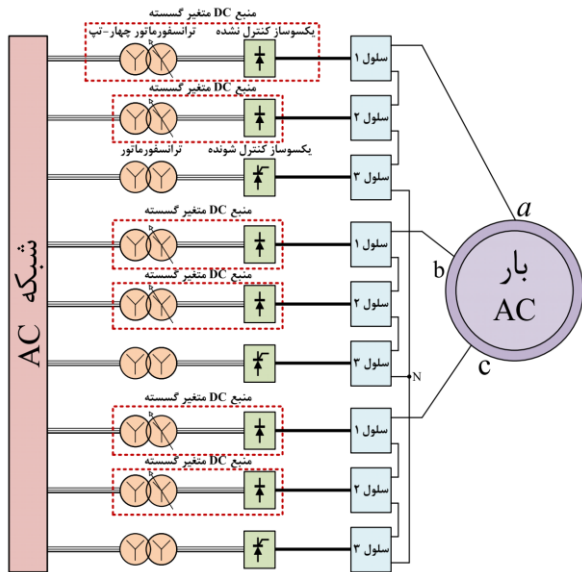
فاصله بین مرکز هر بازه، m_i و مرزهای آن، x_i و x_{i+1} برابر در صدی مشخص، α ، از مرکز بازه است که توسط رابطه (۹) محاسبه می‌شود. تعداد تپ‌های ترانسفورماتور است.

$$am_i = x_{i+1} - m_i = m_i - x_i \quad i = 1, 2, \dots, N-1. \quad (9)$$

اولین قدم در این روش انتخاب مقدار مناسب برای α و تقسیم‌بندی محدوده در دسترس ولتاژ مؤثر خط خروجی اینورتر چندسطحی به بازه‌های مشخص با استفاده از رابطه (۹) است. مقدار N و α بر اساس کاربرد اینورتر چند سطحی انتخاب می‌شوند و به ترتیب برابر تعداد بازه‌ها و تغییرات نسبی هر بازه نسبت به مرکز آن بازه از مقدار مؤثر ولتاژ خط خروجی است. مقدار α بین صفر و یک است که می‌توان آن را به صورت درصد بیان کرد. همچنین با افزایش مقدار α می‌توان محدوده در دسترس مقدار مؤثر ولتاژ خط خروجی را گسترش

متصل هستند و توسط شبکه AC متصل به ترانسفورماتور سه فاز چند تپ و یکسوساز کنترل نشده تغذیه می‌شوند.

در این ساختار نیز متغیرهای بهینه‌سازی برای اولین بازه، شامل زوا یای کلیدزنی و مقادیر V_{dc1}^i ، V_{dc2}^i و V_{dc3}^i ، توسط الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست می‌آیند. همچنین با توجه به ثابت بودن زوایای کلیدزنی در تمام بازه‌ها، مقدار نزدیک به بهینه منابع DC برای بازه‌های دیگر با استفاده از روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. با داشتن مقادیر V_{dc1}^i و V_{dc2}^i ، مقدار مؤثر تپ‌های ترانسفورماتور مرتبط با هر بازه به ترتیب توسط روابط (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌شود.



شکل ۵: شماتیک طرح پیشنهادی با دو منبع DC متغیر گسسته در هر فاز

$$V_{ms1i} = \frac{\pi V_{dc1}^i}{3\sqrt{6}} \quad (24)$$

$$V_{ms2i} = \frac{\pi V_{dc2}^i}{3\sqrt{6}} \quad (25)$$

بنابراین برای تولید ولتاژ مؤثر خط خروجی مطلوب با THD مناسب باید مقدار V_{dc3} به‌صورت خطی تغییر کند. میزان تغییرات V_{dc3} ، ΔV_{dc3} ، با مشتق‌گیری از هر دو طرف رابطه (۶) نسبت به V_{dc3} با استفاده از رابطه (۲۶) به‌دست می‌آید.

$$\Delta V_{dc3} = \frac{\pi \Delta V_{1,ms\ line}}{2\sqrt{6}\cos(\theta_3)} \quad (26)$$

محدوده تغییر مقدار ولتاژ منبع DC متغیر سلول سوم در رابطه (۲۲) نشان داده شده است. در این ساختار، β_i توسط رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$\beta_i = \frac{\pi \alpha m_i}{2\sqrt{6}\cos(\theta_3)} \quad (27)$$

$$\Delta V_{dc3} = \frac{\pi \Delta V_{1,ms\ line}}{2\sqrt{6}\cos(\theta_3)} \quad (16)$$

میزان انحراف مقدار مطلوب ولتاژ مؤثر خط خروجی از مرکز بازه موردنظر است که توسط رابطه (۱۷) تعریف می‌شود. همچنین V^* مقدار مطلوب ولتاژ مؤثر خط خروجی است.

$$\Delta V_{1,ms\ line} = V^* - m_i \quad (17)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶)، با توجه به کل تغییرات ولتاژ مؤثر خط نسبت به مرکز بازه، میزان تغییرات هر منبع DC متغیر بدون در نظر گرفتن تغییرات منبع DC متغیر دیگر نشان داده شده است. باید به این نکته توجه داشت که در این ساختار، دو منبع DC متغیر باید همراه با یکدیگر در مقابل تغییرات ولتاژ مؤثر خط به‌صورت خطی تغییر کنند. به همین منظور ضریب P در معادلات در نظر گرفته می‌شود. P عددی بین صفر و یک است که سهم تغییرات هر منبع نسبت به $\Delta V_{1,ms\ line}$ را مشخص می‌کند و مقدار آن توسط الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست می‌آید. میزان تغییرات منبع DC سلول دوم و سوم با در نظر گرفتن سهم تغییرات هر منبع نسبت به $\Delta V_{1,ms\ line}$ به ترتیب در روابط (۱۸) و (۱۹) بیان شده است.

$$\Delta V_{dc2} = \frac{P \pi \Delta V_{1,ms\ line}}{2\sqrt{6}\cos(\theta_2)} \quad (18)$$

$$\Delta V_{dc3} = \frac{(1-P) \pi \Delta V_{1,ms\ line}}{2\sqrt{6}\cos(\theta_3)} \quad (19)$$

مقدار ولتاژ منبع DC تنظیم شونده سلول دوم در محدوده (۲۰) تغییر می‌کند:

$$V_{dc2}^i - \lambda_i \leq V_{dc2} \leq V_{dc2}^i + \lambda_i \quad (20)$$

λ_i حداکثر تغییرات V_{dc2} در بازه i نسبت به V_{dc2}^i است؛ که توسط رابطه (۲۱) بیان می‌شود.

$$\lambda_i = \frac{P \pi \alpha m_i}{2\sqrt{6}\cos(\theta_2)} \quad (21)$$

محدوده تغییرات مقدار ولتاژ منبع DC متغیر سلول سوم و حداکثر تغییرات آن در بازه i نسبت به V_{dc3}^i ، β_i ، به ترتیب توسط روابط (۲۲) و (۲۳) به‌دست می‌آید.

$$V_{dc3}^i - \beta_i \leq V_{dc3} \leq V_{dc3}^i + \beta_i \quad (22)$$

$$\beta_i = \frac{(1-P) \pi \alpha m_i}{2\sqrt{6}\cos(\theta_3)} \quad (23)$$

۳-۲- استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته

شکل ۵ شماتیک ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد که بر اساس اینورتر هفت سطحی آبشاری تمام پیل با سه سلول و دو منبع DC متغیر گسسته پیاده‌سازی شده است. سلول سوم به منبع DC تنظیم شونده متصل است در حالی که سلول اول و دوم به منابع DC متغیر گسسته

۴- پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی قدرتمند بر اساس انتخاب طبیعی است که در بسیاری از پروژه‌ها و در زمینه‌های مختلف از آن استفاده می‌شود. در مسائلی که دارای چند هدف هستند معمولاً اهداف با یکدیگر تضاد دارند و این تضاد از بهینه‌سازی هم‌زمان تمام اهداف جلوگیری می‌کند. الگوریتم ژنتیک تک هدف می‌تواند برای پیدا کردن مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها اصلاح شود [۱۵]. توانایی الگوریتم ژنتیک برای جستجوی هم‌زمان نواحی مختلف فضای حل مسئله، آن را برای پیدا کردن مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌ها برای مسائل چندهدفه پیچیده مناسب می‌کند؛ بنابراین در این مقاله از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف توابع هدف استفاده شده است.

در این روش هفت متغیر شامل زوایای کلیدزنی ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)، ولتاژ منابع DC ($V_{dc1}, V_{dc2}, V_{dc3}$) و ضریب P وجود دارد که مقادیر نزدیک به بهینه آن‌ها برای تولید مقدار مؤثر ولتاژ خط خروجی در مرکز بازه‌ی اول توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیدا می‌شود. در این مقاله مقادیر نزدیک به بهینه متغیرها بر مبنای روش حداقل‌سازی بهینه‌ی اعوجاج هارمونیک کل به‌دست می‌آید. در این روش به‌جای تمرکز بر روی هارمونیک‌ها و کاهش یا حذف هارمونیک‌های خاص، مقدار THD ولتاژ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی حداقل می‌شود. به همین منظور برای حل این مسئله بهینه‌سازی، دو تابع هدف در (۲۸) در نظر گرفته شده است که باید حداقل مقدار آن‌ها به‌دست آید. همچنین قید (۲۹) باید توسط زوایای کلیدزنی رعایت شود.

$$\begin{cases} Obj1 = |V_{1,ms\ line} - m_1| \\ Obj2 = THD + THD_+ + THD_- \end{cases} \quad (28)$$

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \frac{\pi}{2} \quad (29)$$

اولین تابع هدف، قدر مطلق تفاضل بین مقدار مؤثر ولتاژ خط خروجی و ولتاژ مرکز اولین بازه است. این تابع هدف تضمین می‌کند که مقدار مؤثر ولتاژ خط خروجی تا حد امکان نزدیک به ولتاژ مرکز اولین بازه باشد. در تابع هدف دوم، به‌منظور دستیابی به کیفیت توان مناسب برای تمام مقادیر بازه، THD ولتاژ خط در مرکز و مرزهای اولین بازه به‌صورت هم‌زمان حداقل می‌شوند. این تابع هدف از سه قسمت تشکیل شده است؛ که اولین قسمت، THD ولتاژ خط خروجی در مرکز اولین بازه است که مقدار آن توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود و دومین و سومین قسمت با توجه به تعداد منابع DC متغیر گسسته به‌دست می‌آید که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۴-۱- بهینه‌سازی THD ولتاژ خط با استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته

حداکثر مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط خروجی در اولین بازه توسط رابطه (۳۰) بیان می‌شود.

$$V_{1,ms\ line+} = V_{1,ms\ line} + \frac{2\sqrt{6}\lambda_1\cos(\theta_2)}{P\pi} + \frac{2\sqrt{6}\beta_1\cos(\theta_3)}{(1-P)\pi} \quad (30)$$

با توجه به روابط (۳) و (۷) و تأثیر λ_1 و β_1 ، ولتاژ خط خروجی در انتهای اولین بازه، $V_{ab+}(\theta)$ ، توسط رابطه (۳۱) به‌دست می‌آید.

$$V_{ab+}(\theta) = V_{ab}(\theta) + \sum_{h=1}^{\infty} \left\{ \frac{P\lambda_1\cos(h\theta_2) + (1-P)\beta_1\cos(h\theta_3)}{(1-P)\pi} \right\} \times \left\{ \sin(h\theta) + \sin\left(h\theta - \frac{2h\pi}{3}\right) \right\} \quad (31)$$

حداکثر مقدار مؤثر ولتاژ خط در اولین بازه توسط رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود:

$$V_{ms\ line+}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{ab+}^2(\theta) d\theta} \quad (32)$$

بنابراین، THD ولتاژ مؤثر خط در انتهای اولین بازه، THD_+ ، با جایگذاری روابط (۳۰) و (۳۲) در رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود.

$$THD_+ = \sqrt{\left(\frac{V_{1,ms\ line+}}{V_{ms\ line+}}\right)^2 - 1} \quad (33)$$

مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ مؤثر خط در ابتدای اولین بازه توسط رابطه (۳۴) به‌دست می‌آید.

$$V_{1,ms\ line-} = V_{1,ms\ line} - \frac{2\sqrt{6}\lambda_1\cos(\theta_2)}{P\pi} - \frac{2\sqrt{6}\beta_1\cos(\theta_3)}{(1-P)\pi} \quad (34)$$

با توجه به روابط (۳) و (۷) و تأثیر λ_1 و β_1 ، ولتاژ خط خروجی در ابتدای اولین بازه، $V_{ab-}(\theta)$ ، توسط رابطه (۳۵) به‌دست می‌آید.

$$V_{ab-}(\theta) = V_{ab}(\theta) - \sum_{h=1}^{\infty} \left\{ \frac{P\lambda_1\cos(h\theta_2) + (1-P)\beta_1\cos(h\theta_3)}{(1-P)\pi} \right\} \times \left\{ \sin(h\theta) - \sin\left(h\theta - \frac{2h\pi}{3}\right) \right\} \quad (35)$$

حداقل مقدار مؤثر ولتاژ خط در اولین بازه توسط رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود:

$$V_{ms\ line-}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{ab-}^2(\theta) d\theta} \quad (36)$$

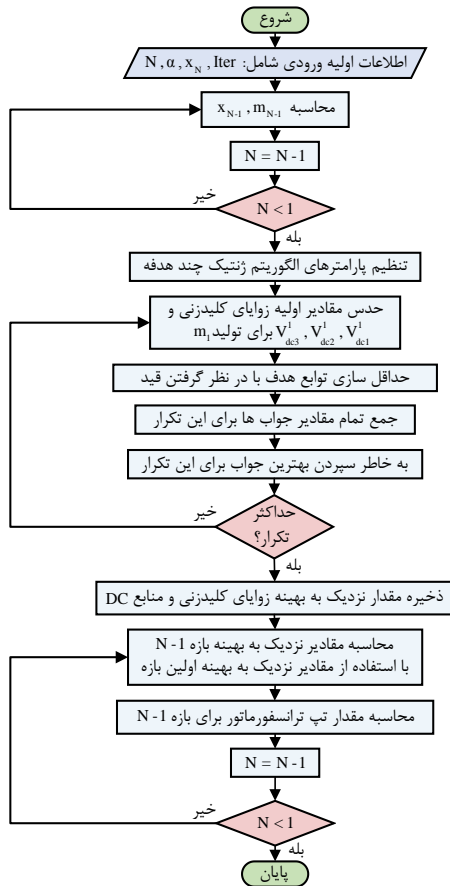
بنابراین، مقدار THD ولتاژ مؤثر خط خروجی در ابتدای اولین بازه، THD_- ، با جایگذاری روابط (۳۴) و (۳۶) در رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود.

$$THD_- = \sqrt{\left(\frac{V_{1,ms\ line-}}{V_{ms\ line-}}\right)^2 - 1} \quad (37)$$

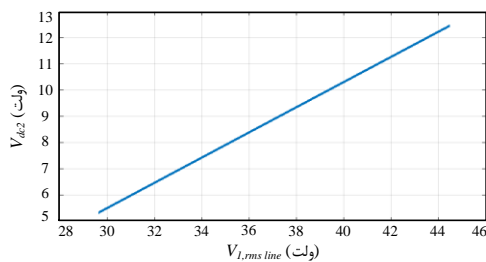
۴-۲- بهینه‌سازی THD ولتاژ خط با استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته

حداکثر مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط خروجی در اولین بازه توسط رابطه (۳۸) بیان می‌شود.

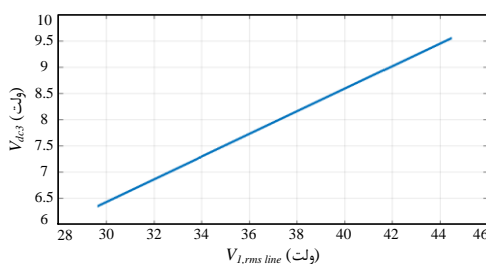
۲۵٪ و ۳۶٪) برای حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته و حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. مقدار V_{dc2} و V_{dc3} نسبت به ولتاژ مؤثر خط در بازه ی اول به ازای $\alpha = 20\%$ برای حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۶: فلوجارت روش پیشنهادی



شکل ۷: مقدار V_{dc2} نسبت به $V_{1,rms line}$ در بازه ی اول برای $\alpha = 20\%$



شکل ۸: مقدار V_{dc3} نسبت به $V_{1,rms line}$ در بازه ی اول برای $\alpha = 20\%$

$$V_{1,rms line+} = V_{1,rms line} + \frac{2\sqrt{6}\beta_1 \cos(\theta_3)}{\pi} \quad (38)$$

با توجه به روابط (۳) و (۷) و تأثیر β_1 ، ولتاژ مؤثر خط خروجی در انتهای اولین بازه، $V_{ab+}(\theta)$ ، توسط رابطه (۳۹) به دست می آید.

$$V_{ab+}(\theta) = V_{ab}(\theta) + \sum_{h=1}^{\infty} \beta_1 \cos(h\theta_3) \times \left\{ \sin(h\theta) + \sin\left(h\theta - \frac{2h\pi}{3}\right) \right\} \quad (39)$$

بنابراین، حداکثر مقدار مؤثر ولتاژ خط در اولین بازه با جایگذاری رابطه (۳۹) در رابطه (۳۲) محاسبه می شود و با جایگذاری آن و رابطه (۳۸) در رابطه (۳۳)، مقدار THD_+ به دست می آید. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ مؤثر خط خروجی در ابتدای اولین بازه با استفاده از رابطه (۴۰) محاسبه می شود. همچنین، ولتاژ مؤثر خط خروجی در ابتدای اولین بازه، $V_{ab-}(\theta)$ ، توسط رابطه (۴۱) به دست می آید.

$$V_{1,rms line-} = V_{1,rms line} - \frac{2\sqrt{6}\beta_1 \cos(\theta_3)}{\pi} \quad (40)$$

$$V_{ab-}(\theta) = V_{ab}(\theta) - \sum_{h=1}^{\infty} \beta_1 \cos(h\theta_3) \times \left\{ \sin(h\theta) + \sin\left(h\theta - \frac{2h\pi}{3}\right) \right\} \quad (41)$$

بنابراین، حداقل مقدار مؤثر ولتاژ خط در اولین بازه با جایگذاری رابطه (۴۱) در رابطه (۳۶) محاسبه می شود و با جایگذاری آن و رابطه (۴۰) در رابطه (۳۷)، مقدار THD_- به دست می آید. تابع هدف دوم، بهینه سازی THD را برای تمام محدوده ی ولتاژ خروجی در بازه ی اول تضمین می کند. شکل ۶، فلوجارت روش پیشنهادی را با استفاده از ترانسفورماتور دارای N تپ نمایش می دهد. ابتدا اطلاعات اولیه شامل α ، x_N ، N و $Iter$ مشخص می شوند؛ که برابر حداکثر مقدار مؤثر ولتاژ خط و تعداد اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه است. تقسیم بندی محدوده ولتاژ مؤثر خط خروجی با توجه به مقدار α ، N و x_N انجام می شود. با دستیابی به مقادیر نزدیک به بهینه هفت متغیر و محاسبه مقادیر نزدیک به بهینه منابع DC برای بازه های دیگر، ولتاژ مؤثر تپ های ترانسفورماتور به دست می آید.

۵- نتایج شبیه سازی

پس از پیاده سازی روش پیشنهادی در محیط نرم افزار Matlab، برای دستیابی به مقادیر نزدیک به بهینه متغیرها، الگوریتم ژنتیک چندهدفه ۳۰۰ مرتبه اجرا شد و از میان نتایج به دست آمده، بهترین نتیجه به عنوان نتیجه قابل قبول انتخاب شد. در این مقاله، تعداد نسل برابر ۶۰۰ و خطای نسبی توقف برای بیش از ۱۰۰ نسل متوالی برابر ۰/۰۰۱ تنظیم شده است. مقادیر نزدیک به بهینه زوایای کلیدزنی، منابع DC، مقدار THD و مقدار THD تا هارمونیک مرتبه ی ۵۰ در مرکز و مرزهای بازه ی اول برای چهار مقدار مختلف α (۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۰٪)

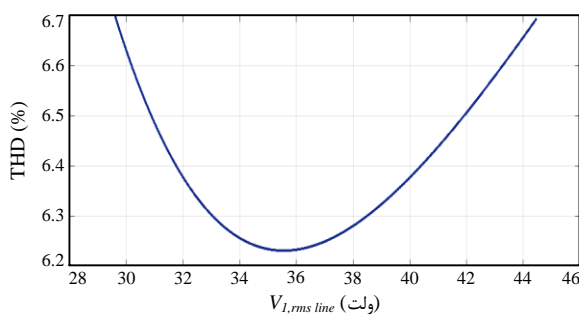
جدول ۱: مقادیر بهینه‌ی زوایای کلیدزنی، منابع THD، THD_{DC} تا هارمونیک ۵۰ و P برای بازه‌ی اول با یک منبع DC متغیر گسسته

α (°)	$V_{1,rms\ line}$ (ولت)	θ_1 (درجه)	θ_2 (درجه)	θ_3 (درجه)	V_{dc1} (ولت)	V_{dc2} (ولت)	V_{dc3} (ولت)	P	THD ₋ (%)	THD (%)	THD ₊ (%)	THD _{50,-}} (%)	THD _{50}} (%)	THD _{50,+}} (%)
۱۵	۴۷/۵۱	۵/۸۲	۱۷/۰۷	۳۳/۹۸	۱۱/۳۰	۱۱/۲۸	۱۰/۱۰	۰/۷۰۹۳	۶/۴۹	۶/۲۲	۶/۴۸	۵/۴۲	۵/۱۵	۵/۴۶
۲۰	۳۷/۰۴	۵/۷۱	۱۷/۰۲	۳۳/۶۹	۸/۵۹	۸/۸۹	۸/۰۱	۰/۷۱۹۹	۶/۷۰	۶/۲۵	۶/۶۹	۵/۶۵	۵/۱۹	۵/۷۰
۲۵	۲۸/۸۰	۵/۷۴	۱۶/۱۴	۳۴/۰۲	۶/۲۸	۷/۱۵	۶/۴۱	۰/۶۸۴۲	۶/۸۶	۶/۲۹	۶/۸۶	۵/۸۵	۵/۲۳	۵/۸۷
۳۶	۱۶/۲۸	۵/۸۹	۱۵/۸۸	۳۴/۳۴	۳/۲۷	۴/۱۵	۳/۸۵	۰/۶۹۷۲	۷/۴۶	۶/۴۸	۷/۴۶	۶/۴۶	۵/۴۶	۶/۵۲

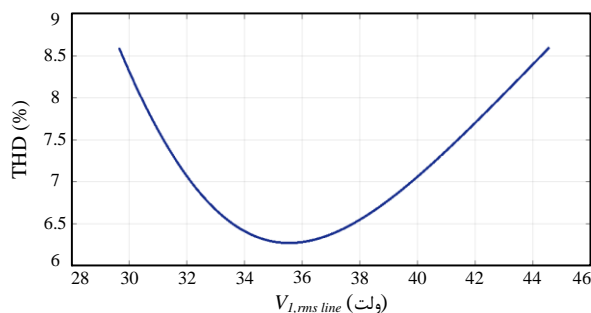
جدول ۲: مقادیر بهینه‌ی زوایای کلیدزنی، منابع THD، THD_{DC} تا هارمونیک ۵۰ برای بازه‌ی اول با دو منبع DC متغیر گسسته

α (°)	$V_{1,rms\ line}$ (ولت)	θ_1 (درجه)	θ_2 (درجه)	θ_3 (درجه)	V_{dc1} (ولت)	V_{dc2} (ولت)	V_{dc3} (ولت)	THD ₋ (%)	THD (%)	THD ₊ (%)	THD _{50,-}} (%)	THD _{50}} (%)	THD _{50,+}} (%)
۱۵	۴۷/۵۱	۵/۸۷	۱۷/۷۶	۳۴/۹۷	۱۱/۵۵	۱۰/۹۴	۱۰/۳۶	۷/۶۷	۶/۳۲	۷/۶۷	۶/۶۸	۵/۱۸	۶/۷۲
۲۰	۳۷/۰۴	۵/۵۸	۱۶/۷۳	۳۵/۰۸	۸/۲۸	۸/۶۱	۸/۸۱	۸/۵۸	۶/۳۸	۸/۵۹	۷/۷۲	۵/۲۹	۷/۷۲
۲۵	۲۸/۸۰	۵/۳۰	۱۵/۶۵	۳۶/۱۴	۵/۸۳	۶/۰۶	۷/۵۵	۹/۲۱	۷/۰۶	۹/۲۱	۸/۵۱	۶/۱۷	۸/۴۳
۳۶	۱۶/۲۸	۵/۸۵	۱۱/۶۰	۲۲/۸۰	۲/۳۲	۲/۷۷	۵/۸۳	۱۰/۴۴	۸/۲۷	۱۰/۶۵	۹/۸۸	۷/۳۱	۹/۷۲

۱۱ نشان داده شده است. با توجه به جداول ۱ و ۲ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱، بهترین مقدار THD تقریباً در مرکز بازه است در حالی که بیشترین مقدار آن در مرزهای بازه حاصل می‌شود. برای مقدار مشخص α ، نتایج به‌دست‌آمده در جداول ۱ و ۲ برای مقدار THD در مرکز و مرزهای بازه و همچنین نمودار ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، برای بازه‌های دیگر نیز مشابه یکدیگر است.



شکل ۱۰: مقدار THD نسبت به $V_{1,rms\ line}$ در بازه‌ی اول برای $\alpha = ۲۰\%$

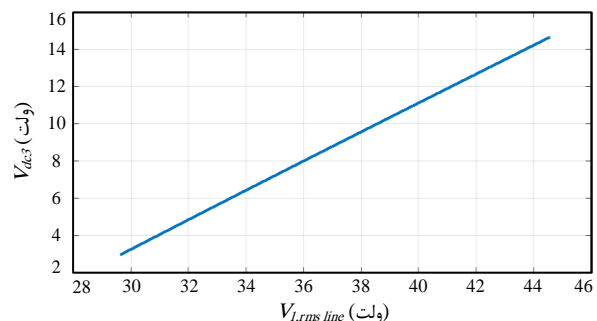


شکل ۱۱: مقدار THD نسبت به $V_{1,rms\ line}$ در بازه‌ی اول برای $\alpha = ۲۰\%$

با افزایش مقدار α محدوده در دسترس ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد، اما منجر به افزایش مقدار THD می‌شود. همچنین با افزایش تعداد منابع DC متغیر گسسته، اگرچه هزینه، تلفات و پیچیدگی کنترل سیستم کم می‌شود اما مقدار THD در تمام بازه‌ها افزایش می‌یابد. برای

با توجه به ثابت بودن مقدار زوایای کلیدزنی و ولتاژ منابع DC متغیر گسسته در هر بازه، مقدار ولتاژ منابع DC متغیر به‌منظور تنظیم ولتاژ خط خروجی و افزایش کیفیت آن به‌صورت خطی تغییر می‌کند. در حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته، با توجه به میزان اختلاف ولتاژ مؤثر خط خروجی مطلوب از مرکز بازه‌ای که در آن قرار دارد، منبع DC متغیر به‌صورت خطی تغییر می‌کند؛ اما در حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته، به دلیل حضور دو منبع DC متغیر، باید هر دو منبع DC متغیر همراه با یکدیگر متناسب با تفاضل ولتاژ مؤثر خط خروجی مطلوب از مرکز بازه‌ای که در آن قرار دارد، به‌صورت خطی تغییر کنند و سهم تغییرات هر منبع DC متغیر توسط بهینه‌سازی به‌دست می‌آید. مقدار P برای چهار مقدار مختلف α (۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۶٪) در جدول ۱ ارائه شده است.

مقدار V_{dc3} نسبت به ولتاژ مؤثر خط خروجی در بازه اول به ازای $\alpha = ۲۰\%$ برای حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: مقدار V_{dc3} نسبت به $V_{1,rms\ line}$ در بازه‌ی اول برای $\alpha = ۲۰\%$

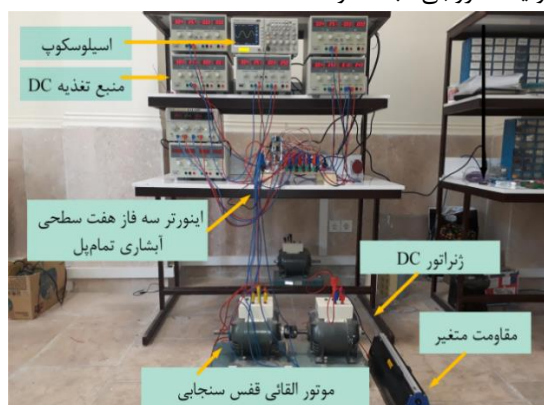
مقدار THD ولتاژ خط نسبت به ولتاژ مؤثر خط در بازه اول به ازای $\alpha = ۲۰\%$ برای حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته و حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و

THD ولتاژ مؤثر خط، صحت نتایج حاصل از کد نویسی در نرم افزار Matlab را تأیید می کند.

در این مقاله هر منبع DC متغیر گسسته با استفاده از ترانسفورماتور سه فاز چهار تپ می تواند سه ولتاژ DC مشخص تولید کند. به صورت کلی با استفاده از ترانسفورماتور N تپ، (N-1) ولتاژ DC برای (N-1) بازه از ولتاژ خروجی تولید می شود. با افزایش تعداد تپ های ترانسفورماتور، می توان مقدار THD را بهبود بخشید و یا محدوده ی در دسترس ولتاژ خط خروجی را گسترش داد.

۶- پیاده سازی عملی

به منظور تأیید صحت نتایج شبیه سازی، یک نمونه آزمایشگاهی از اینورتر هفت سطحی آبخاری تمام پیل ساخته شده که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴، این نمونه آزمایشگاهی متشکل از منابع DC ورودی، کنترل کننده، اسیلوسکوپ و اینورتر دو فاز هفت سطحی آبخاری تمام پیل با سه سلول در هر فاز است. هر کدام از منابع DC دارای دو خروجی قابل تنظیم با حداکثر ولتاژ ۳۰ ولت و جریان ۶ آمپر و یک خروجی ثابت ۵ ولت است.

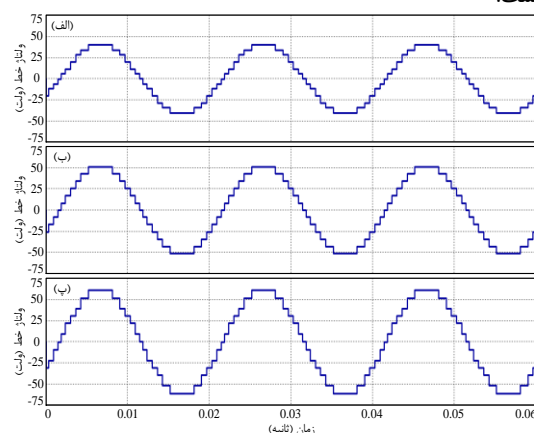


شکل ۱۴: نمونه ی آزمایشگاهی اینورتر دو فاز هفت سطحی آبخاری تمام پیل با سه سلول در هر فاز

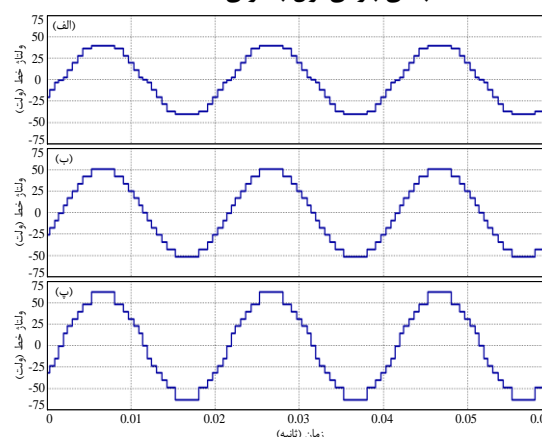
برای پیاده سازی روش کلیدزنی فرکانس پایین در این آزمایش، از میکروکنترلر ATMEGA-۸ به منظور کنترل زوایای کلیدزنی استفاده شده است. به منظور جداسازی مدار قدرت از میکروکنترلر، از اپتوکوپلر ۶N۱۳۷ استفاده شده است. همچنین از گیت درایوهای ترانزیستوری به منظور تبدیل سیگنال های سطح منطق ترانزیستور-ترانزیستور^۷ (TTL) به ولتاژ و جریان های خروجی بالاتر استفاده شده است. از یک موتور القائی قفس سنجایی ۱۲۰ ولت، ۱.۷۵ آمپر، ۵۰ هرتز، کوپل شده به ژنراتور DC متصل به مقاومت متغیر به عنوان بار استفاده شده است. نتایج حاصل از پیاده سازی عملی در فرکانس ۱۰ هرتز و بر اساس زوایای کلیدزنی ارائه شده در جداول ۱ و ۲ و مقدار منابع DC برای بازه سوم و به ازای $\alpha = 20\%$ با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال Tektronix TDS۲۰۱۴C به دست آمده و توسط نرم افزار Matlab تجزیه و تحلیل شده است.

غلبه بر این مشکل، استفاده از ترانسفورماتور با تعداد تپ بیشتر پیشنهاد می شود.

در اینورتر هفت سطحی آبخاری تمام پیل با سه منبع DC کنترل شونده در هر فاز، مقدار THD ولتاژ خط خروجی برابر 6.21% است؛ که این موضوع در مرجع [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، با استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته در هر فاز و به ازای $\alpha = 20\%$ ، حداکثر مقدار THD ولتاژ خط خروجی برابر 10.65% است. نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی توسط نرم افزار PSIM به دست آمده است. شکل موج ولتاژ خط در مرکز و مرزهای بازه اول به ازای $\alpha = 20\%$ برای حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته و حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

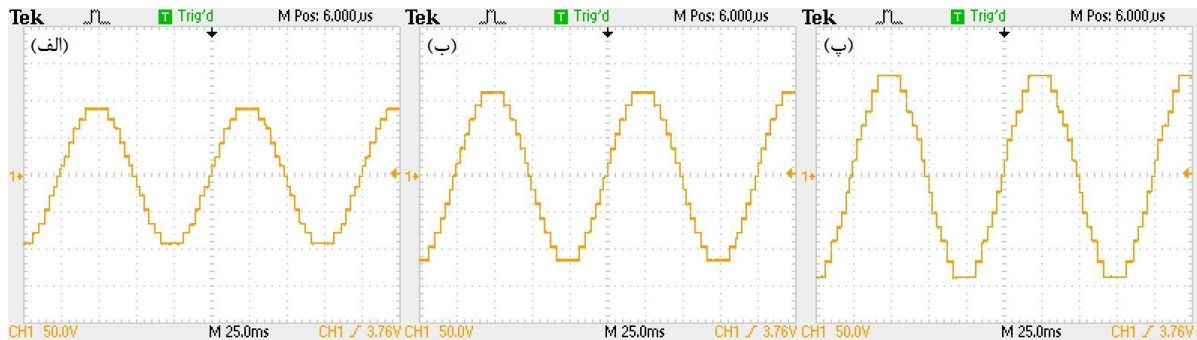


شکل ۱۲: شکل موج ولتاژ خط در (الف) مرز پایین. (ب) مرکز. (ج) مرز بالای بازه ی اول به ازای $\alpha = 20\%$

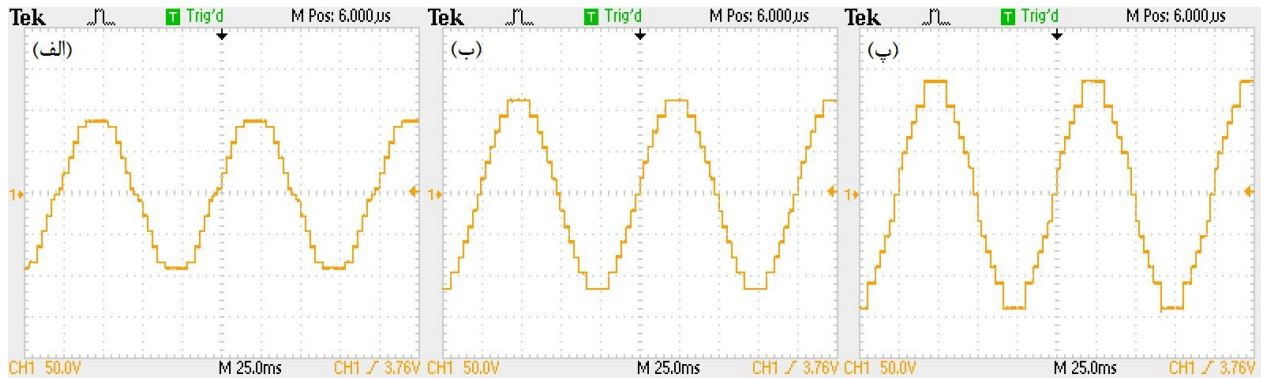


شکل ۱۳: شکل موج ولتاژ خط در (الف) مرز پایین. (ب) مرکز. (ج) مرز بالای بازه ی اول به ازای $\alpha = 20\%$

در حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته، مقدار THD ولتاژ خط در مرکز و مرز بالا و پایین بازه به ترتیب برابر 6.49% و 6.70% است. همچنین در حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته، مقدار THD ولتاژ خط در مرکز، مرز بالا و پایین بازه به ترتیب برابر 6.38% ، 8.59% و 8.58% است. نتایج به دست آمده برای مقدار



شکل ۱۵: شکل موج ولتاژ خط در (الف) مرز پایین. (ب) مرکز. (پ) مرز بالای بازه سوم به ازای $\alpha = 20\%$



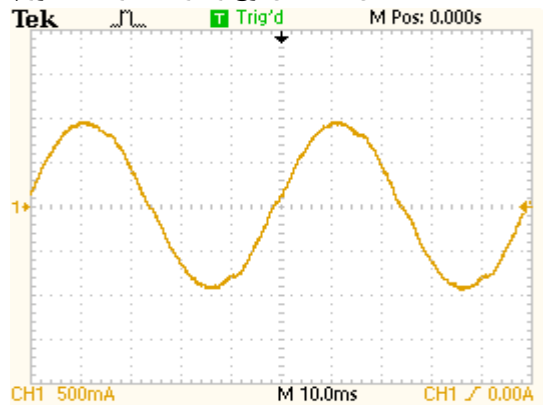
شکل ۱۶: شکل موج ولتاژ خط در (الف) مرز پایین. (ب) مرکز. (پ) مرز بالای بازه سوم به ازای $\alpha = 20\%$

به دست آمده برای مقدار THD ولتاژ خط با نتایج حاصل از نرم افزار Matlab و PSIM به میزان قابل توجه مطابقت دارد.

۷- نتیجه گیری

ساختار جدید تنظیم ولتاژ برای اینورترهای چند سطحی با استفاده از منابع DC متغیر گسسته معرفی شد. در روش پیشنهادی، تغییرات گسسته با استفاده از ترانزسفورماتور چند تپ به دست می آید و برای کاربردهایی که نیاز به منابع DC ایزوله دارند و با استفاده از ترانسفورماتورهای سه فاز تغذیه می شوند، مانند راه اندازهای ولتاژ متوسط، مناسب است.

یک الگوریتم جدید برای بهینه سازی زوایای کلیدزنی، منابع DC و ضریب P معرفی شد. بهینه سازی فقط یک بار و برای دستیابی به مرکز بازه اول انجام می شود و مانند برخی از روش ها نیاز به بهینه سازی برای نقاط مختلف شاخص مدولاسیون ندارد. مقدار نزدیک به بهینه منابع DC متغیر گسسته در هر بازه ثابت است و با استفاده از آن نسبت تبدیل ترانزسفورماتور چند تپ محاسبه می شود. با توجه به ثابت بودن زوایای کلیدزنی برای تمام محدوده در دسترس ولتاژ خط خروجی، روش پیشنهادی برای کاربردهای زمان حقیقی نیز مناسب است. تنظیم ولتاژ خروجی با انتخاب مناسب تپ ترانزسفورماتور در منابع DC متغیر گسسته و تغییر خطی ولتاژ منابع DC تنظیم شونده موجود در سیستم متناسب با اختلاف ولتاژ خروجی مطلوب از مرکز بازه موجود در آن صورت می گیرد.



شکل ۱۷: شکل موج جریان خط خروجی در مرز پایین بازه سوم به ازای $\alpha = 20\%$

شکل موج ولتاژ خط در مرکز و مرزهای بازه سوم برای حالت استفاده از یک منبع DC متغیر گسسته در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقدار ولتاژ مؤثر خط و THD آن در مرکز، مرز بالا و پایین بازه به ترتیب برابر $82/56$ و $6/26$ ، $99/12$ و $6/91$ ، $66/25$ و $6/86$ است. شکل موج ولتاژ خط در مرکز و مرزهای بازه سوم برای حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مقدار ولتاژ مؤثر خط و THD آن در مرکز، مرز بالا و پایین بازه به ترتیب برابر $82/53$ و $6/45$ ، $98/05$ و $8/43$ ، $65/97$ و $8/69$ است. شکل موج جریان خط خروجی در ابتدای بازه سوم برای حالت استفاده از دو منبع DC متغیر گسسته در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقدار جریان مؤثر خط و THD آن به ترتیب برابر $0/66$ و $4/23$ است. نتایج

چندسطحی در حالت کلیدزنی نامتقارن»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۰۹-۲۱۹، ۱۳۹۵.

- [4] A. Edpuganti and A. K. Rathore, "A survey of low switching frequency modulation techniques for medium-voltage multilevel converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 4212-4228, 2015.
- [5] 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.
- [6] M. Najjar, A. Moeni, M. K. Bakhshizadeh, F. Blaabjerg and S. Farhangi, "Optimal selective harmonic mitigation technique on variable DC link cascaded H-bridge converter to meet power quality standards," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 1107-1116, 2016.
- [7] 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, 2012.
- [8] Y. Liu and H. Hong, "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.

[۹] سعید سعیدآبادی، امین اشرف‌گندمی، سیدحسین حسینی، مهران صباچی، «یک اینورتر چندسطحی سه‌فاز بهبودیافته با منابع ولتاژ برابر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۰۸۳-۱۰۹۷، ۱۳۹۶.

- [10] 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. 9, no. 10, pp. 2103-2110, 2016.
- [11] M. Etesami, N. Ghasemi, D. M. Vilathgamuwa and W. L. Malan, "Particle swarm optimisation-based modified SHE method for cascaded H-bridge multilevel inverters," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 1, pp. 18-28, 2017.
- [12] J. Lamb and B. Mirafzal, "An adaptive SPWM technique for cascaded multilevel converters with time-variant DC sources," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4146-4155, 2016.
- [13] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.
- [14] N. Farokhnia, H. Vadizadeh, S. H. Fathi, and F. Anvariasl, "Calculating the formula of line voltage THD in multilevel inverter with unequal DC sources," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3359-3372, 2011.
- [15] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 9, pp. 992-1007, 2006.

ساختار پیشنهادی مانند منابع DC کنترل شونده عملکرد دینامیکی محدودی دارد و استفاده از این ساختار در کاربردهایی که تغییرات ولتاژ خروجی مطلوب زیاد و سریع است سبب بروز مشکلاتی می‌شود. ساختار پیشنهادی یک راه‌حل رقابتی و مقرون‌به‌صرفه برای کاربردهایی است که تغییرات ولتاژ خروجی مطلوب حول نقطه کار محدود است مانند راه‌اندازهای ولتاژ متوسط که در فن‌ها، سیستم‌های نورد و پمپ‌های آب استفاده می‌شوند. با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان علاوه بر حفظ کیفیت ولتاژ خط خروجی در سطح مطلوب برای محدوده وسیع از ولتاژ خط خروجی، تعداد منابع DC تنظیم شونده را نیز به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

در این مقاله به دلیل سادگی و محبوبیت از روش کلیدزنی پلکانی بر مبنای روش OMTD استفاده شده است. به منظور دستیابی به استانداردهای کیفیت توان، می‌توان استفاده از روش‌های کلیدزنی که سبب افزایش تعداد سطوح ولتاژ خروجی اینورتر چندسطحی می‌شوند و همچنین روش‌های کلیدزنی مبتنی بر مدولاسیون پهنای باند را به عنوان کارهای آینده در نظر گرفت.

تصدیق

این پژوهش تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران کشور (Iran National Science Foundation) به شماره قرارداد ۹۶/ص/۵۱۲۰۰، در راستای طرح مصوب به شماره ۹۵۸۴۹۶۸۰ با عنوان "یک ساختار جدید برای کنترل ولتاژ خروجی اینورترهای چند سطحی آبشاری تمام پیل با منابع DC نامساوی و تغییرات گسسته برای درایو موتورهای ولتاژ متوسط" است.

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, 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, 2010.

[۳] سیما شاه‌محمدی، سیدحسین حسینی، ابراهیم بابایی، مهران صباچی و جابر فلاح اردشیر، «آنالیز تحلیلی هارمونیک‌های خروجی اینورترهای

زیر نویس‌ها

⁵ Selective Harmonic Mitigation
⁶ Optimal Minimization of the Total Harmonic Distortion
⁷ Transistor-Transistor Logic (TTL)

¹ Direct Current
² Multi Objective Genetic Algorithm
³ Total Harmonic Distortion
⁴ Selective Harmonic Elimination