



ارائه روشی هوشمند جهت کاهش دامنه هارمونیک‌های انتخابی در اینورترهای منبع ولتاژ

جواد صفایی کوچکسرایبی

استادیار، گروه مهندسی برق و الکترونیک، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
*پست الکترونیک: j_safae@yahoo.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ شهریور ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

ارائه در سایت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژگان

هارمونیک

اینورترهای منبع ولتاژ

بارهای غیرخطی

اعوجاج هارمونیک

الگوریتم جدید ازدحام سالپ

(SSA)

چکیده

شناسایی محل، اندازه بارهای غیرخطی و اثرات هارمونیک‌هایی از مهم‌ترین بخشهای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری، عیب‌یابی و اصلاح سیستم‌های قدرت می‌باشد. بنابراین، در این پژوهش برای تعیین الگوی کلید زنی حذف انتخابی هارمونیک‌ها، از الگوریتم جدید ازدحام سالپ بهره گرفته شده است که بر روی یک اینورتر ۷ سطحی اعمال شده و نتایج در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه ابتدا به نحوه شبیه‌سازی اینورتر ۷ سطحی و هارمونیک تولید شده توسط آن در نرم‌افزار MATLAB پرداخته می‌شود و سپس نتایج اعمال طرح پیشنهادی بررسی می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از طرح پیشنهادی از آنجا که از ولتاژ خط خروجی اینورتر سه فاز استفاده می‌شود، نسبت به حالت پایه بیش از ۵ درصد هارمونیک کاهش داده شده است. در این حالت میزان هارمونیک کلی ولتاژ خط مقدار تقریبی ۱۴٪ درصد دارد که با پیاده‌سازی طرح پیشنهادی با محاسبات آفلاین در حالت عادی به مقدار ۸/۷۳٪ درصد و با محاسبات آفلاین به مقدار ۸/۴۳٪ درصد کاهش یافته است که نشان از دقت و عملکرد الگوریتم مطرح شده در کاهش اعوجاج هارمونیک در ولتاژ خروجی اینورتر شبیه‌سازی شده می‌باشد.

Presenting a method Provide an intelligent method to reduce the range of selected harmonics in voltage source inverters

Javad Safae Koochaksaraee

Department of Electrical Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, savadkooh, Iran
*Savadkooh, Iran, j_safae@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper

Received 18 September 2020

Accepted 13 February 2021

Available Online 13 February 2021

Keywords :

Harmonic

Voltage source inverters

Nonlinear loads

Harmonic distortion

New salp congestion algorithm (SSA)

ABSTRACT

Identifying the location, magnitude of nonlinear loads, and the effects of harmonics is one of the most important parts of maintenance planning, troubleshooting, and modification of power systems. Therefore, in this study, to determine the keying pattern of selective deletion of harmonics, a new salp congestion algorithm has been used which has been applied to a 7-levels inverter and the results have been investigated in different cases. In the following, first, we discuss how to simulate the 7-levels inverter and the harmonic produced by it in MATLAB software, and then the results of the proposed design are reviewed. The results show that using the proposed design since the output line voltage of the three-phase inverter is used, the harmonic is reduced by more than 5% compared to the ground state. In this case, the overall harmonic value of the line voltage is approximately 14%, which has been reduced by 8.73% by normal implementation with offline calculations and by 8.43% by online calculations, which shows the accuracy and the performance of the proposed algorithm is to reduce the harmonic distortion at the output voltage of the simulated inverter.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Javad Safae Kochaksaraee,, Provide an intelligent method to reduce the range of selected harmonics in voltage source inverters, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 4, pp. 7-17, 2021 (In Persian)

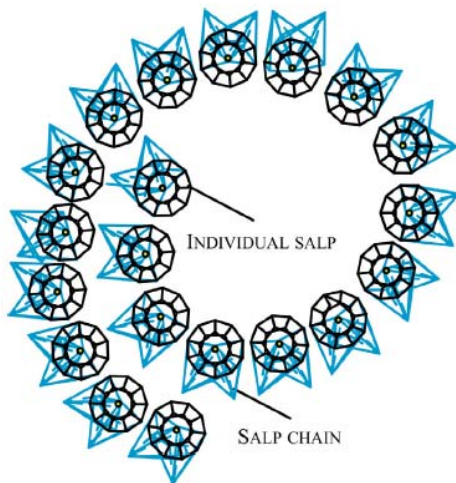
۱- مقدمه

اکثر اعوجاج‌های ایجاد شده در شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه قدرت، ناشی از بارهایی هستند که دارای مشخصه غیرخطی بوده و یا در آن‌ها از عناصر الکترونیک قدرت استفاده می‌شود یکی از ادوات پرکاربرد در سیستم‌های قدرت اینورتر می‌باشند که وظیفه‌ی تبدیل ولتاژ ورودی مستقیم به یک ولتاژ خروجی متناوب و متقارن با دامنه و فرکانس مورد نظر را دارند. در همین راستا، تاکنون روش‌های متعددی برای کاهش هارمونیک‌های خروجی اینورتر منبع ولتاژ ارائه شده که در زیر به بخشی از این مطالعات می‌پردازیم. در مرجع [۱] به منظور حدس مقدار اولیه برای NR، از روش‌های پیش‌بینی استفاده شده است. همچنین بدین منظور نیز در برخی مراجع مانند مرجع [۲] از روش فرا ابتکاری برای حدس دقیق‌تر مقدار اولیه استفاده شده است. در مقالات مختلف روش نظریه Resultant در مرجع [۳]، روش Wu در مرجع [۴]، نظری Groebner در مرجع [۵]، نظریه چندجمله‌ای متقارن در مرجع [۶] جز روش‌هایی هستند که برای کاهش هارمونیک در اینورترها به کار گرفته شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد تمامی این روش‌ها از نظر محاسباتی پیچیده بوده و نهایتاً قابل کاربرد در اینورترهای دو سطحی هستند. بنابراین این روش‌ها برای کارگیری بر روی اینورترها در زمان واقعی نیز غیرقابل استفاده خواهند بود. الگوریتم ژنتیک برای اولین بار در مقالات [۷] و [۸] به منظور حل مسئله SHE در اینورترهای چند سطحی مورد استفاده قرار گرفت. در مرجع [۹] نیز GA به منظور بهبود ضریب توان خروجی اینورتر تک‌فاز به کار رفته است. در مرجع [۱۰] نویسنده‌ی روش ترکیبی GA به منظور حذف هارمونیک‌های ناخواسته در اینورترهای چند سطحی برای منابع DC برابر و غیر برابر ارائه کرده است. این روش ژن‌های باینری را با مقادیر کد واقعی جایگزین می‌کند. در مرجع [۱۱] نیز روش ارائه شده در مرجع [۱۰] بر روی مبدل (NPC) فعال ۳ سطحی اعمال شده است تا جریان نقطه خنثی را حذف کند. به‌طور ایده آل شکل موج خروجی اینورتر به دلیل داشتن تقارن نباید جریان نقطه خنثی داشته باشد. در مرجع [۱۲] نیز GA و برنامه‌ریزی تکامل یافته، به‌طور جداگانه به منظور بهبود عملکرد درایو موتور القایی با حذف هارمونیک‌های مشخص مرتبه پایین اعمال شده‌اند. در مرجع [۱۳] نیز الگوریتم ژنتیک بهبود یافته برای تحلیلک تابع هدف جامع ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک

مطرح شده با کارایی بالا هارمونیک‌های مرتبه پایین نامطلوب را از ولتاژ خروجی اینورتر چند سطحی حذف می‌کند. در مرجع [۱۴] یک نسخه ارتقا یافته DE به منظور حذف هارمونیک‌های اینورتر استفاده شده است که عملکرد موتور القایی را بهبود بخشیده است. در مرجع [۱۵] نیز DE بر روی اینورتر ۷ سطحی غیرمتقارن به منظور حذف هارمونیک‌های ۳ و ۵ از شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر اعمال شده است. در مرجع [۱۶]، DE به منظور یافتن زاویه‌های آتش برای شکل موج خروجی اینورتر با در نظرگیری حذف هارمونیک‌های ناخواسته ارائه شده است. این الگوریتم تنها بر روی اینورتر ۵ سطحی تست شده است. در مرجع [۱۷] نیز DE به منظور حذف هارمونیک‌های اینورتر ۱۵ سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف استفاده شده در این مرجع نیز مطابق مرجع قبل است. در مرجع [۱۸] از الگوریتم PSO به منظور مینیمم سازی هارمونیک‌های ناخواسته مرتبه‌های ۵، ۷، ۱۱ و ۱۳ در ولتاژ خروجی اینورتر منبع ولتاژ برای شکل موج‌های تک‌قطبی و دوقطبی استفاده شده است. در مرجع [۱۹] نیز رویکرد مشابهی با مرجع [۱۸] به منظور یافتن زاویه آتش بیان شده است تا THD ولتاژ خروجی اینورتر ۷ سطحی را مینیمم کند. در مرجع [۲۰] هارمونیک‌های ناخواسته در اینورترهای متصل به نیروگاه خورشیدی با استفاده از رویکرد مشابه ارائه شده در مرجع [۱۸] ارائه شده است. در مرجع [۲۱] الگوریتم PSO هارمونیک‌های مشخصی را در ولتاژ خروجی اینورتر غیرمتقارن حذف کرده است و زوایای آتش برای شکل موج خروجی محاسبه شده است. در مرجع [۲۲] الگوریتم تقلید (MA) به منظور مینیمم سازی هارمونیک‌های نامطلوب مرتبه پایین از شکل موج خروجی اینورتر استفاده شده است. در مرجع [۲۳] نسخه بهبود یافته رویکرد مطرح شده در مرجع [۲۲] به منظور حذف هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷ از ولتاژ خروجی اینورتر ۷ سطحی استفاده شده است. در مرجع [۲۴] نیز نسخه بهبود یافته مطرح شده در مرجع [۲۲] بر روی اینورتر ۷ سطحی با استفاده از تابع هدف ارائه شده است. در مرجع [۲۵] نیز PSO به منظور حذف هارمونیک‌های اینورتر نیروگاه خورشیدی مستقل مطرح شده است. روش مطرح شده به منظور یافتن الگوریتم کلید زنی موج خروجی تک‌قطبی و دوقطبی به کار رفته است. الگوریتم IGA ابتدا در مرجع [۲۶] برای حذف هارمونیک از اینورترهای چند سطحی ارائه شده است و تست آن تنها از طریق شبیه‌سازی صورت گرفته است. در مرجع [۲۷] نیز رویکرد

دلیل این نوع رفتار هنوز مشخص نیست اما بعضی از محققان اعتقاد دارند دلیل این رفتار جابجایی بهتر با استفاده از تغییرات هماهنگ سریع است.

مدل ریاضی رفتار گروهی سالپ‌ها در مقالات اندکی مشاهده شده است. به منظور مدل‌سازی ریاضی زنجیره سالپ‌ها در ابتدا جمعیت به دودسته تقسیم می‌شود: رهبر و دنبال‌کنندگان. رهبر سالپی است که در ابتدای زنجیره است. در حالی که بقیه سالپ‌ها به‌عنوان دنبال‌کنندگان لحاظ می‌شوند. همان‌طور که نام این سالپ‌ها بدان اشاره دارد، رهبر کل گروه را راهنمایی کرده و دنبال‌کنندگان یکدیگر را دنبال می‌کنند (درواقع یابه‌طور مستقیم و یابه‌طور غیرمستقیم از رهبر پیروی می‌کنند).



شکل ۱. ازدحام سالپ‌ها (زنجیره‌ای از سالپ)

مشابه سایر روش‌های مبتنی بر ازدحام، موقعیت سالپ‌ها در یک فضای جستجوی n بعدی تعریف شده در حالی که n با تعداد متغیرهای مسئله مورد نظر برابر است. بنابراین موقعیت تمام سالپ‌ها در یک ماتریس دو بعدی که X نامیده می‌شود ذخیره می‌شود. همچنین فرض می‌شود که یک منبع غذایی به نام F در فضای جستجو به‌عنوان هدف گروه سالپ‌ها وجود دارد. آپدیت موقعیت رهبر مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود:

که در آن x_j^1 موقعیت اولین سالپ (رهبر) در j امین بعد را نشان می‌دهد، F_j موقعیت منبع غذایی را در j امین بعد نشان می‌دهد، ub_j و lb_j به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل بعد j امین را نشان می‌دهند، C_1 و C_2 و C_3 نیز اعداد تصادفی هستند.

مشابه در مرجع [۲۶] به همراه مبدل DC-DC مطرح شده است. مبدل عملکرد روش مطرح شده را در موقعیت‌هایی که روش متداول پاسخ مناسبی فراهم نمی‌کند بهبود بخشیده است. در مرجع [۲۸] از ICA به منظور کاهش هارمونیک‌های مرتبه پایین از شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر آبخاری با مؤلفه‌های کمتر استفاده شده است. الگوریتم FA بار نخست در مرجع [۲۹] به منظور یافتن زوایای آتش اینورتر ۱۱ سطحی ارائه شده است. در مرجع FA [30] بهبود یافته به منظور حذف هارمونیک‌های ناخواسته از ولتاژ خروجی اینورتر ۱۱ سطحی ارائه شده است. در مرجع [۳۱] نیز FA به منظور یافتن زوایای کلید زنی بهینه شده با کمینه‌سازی THD ولتاژ خروجی اینورتر متقارن ۱۳ سطحی به کار رفته است. همچنین از الگوریتم CSA ابتدا در مرجع [۳۲] به منظور حذف هارمونیک‌های ناخواسته مرتبه پایین به جز هارمونیک‌های ضرایب سوم، از اینورترهای ۷ و ۹ سطحی به کار رفته است.

از این‌رو در این مقاله برای تعیین الگوی کلید زنی حذف انتخابی هارمونیک‌ها و کاهش دامنه هارمونیک‌های انتخابی در اینورترهای منبع ولتاژ با روش‌های هوشمند از الگوریتم جدید ازدحام سالپ بهره گرفته شده است و بر روی یک اینورتر ۷ سطحی اعمال شده و نتایج در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ (SSA)

سالپ یک آب‌دزدک دریایی لوله‌شکل و شناور است که با انقباض تن خود و پمپ کردن آب از میان بدن ژلاتینی‌اش در آب حرکت می‌کند. شکل این‌گونه جانور در شکل (۱) نشان داده شده است. یکی از جالب‌ترین رفتارهای سالپ‌ها که در این

$$X_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 \left((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right) c_3 \geq 0 \\ F_j + c_1 \left((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right) c_3 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

الگوریتم استفاده شده است، رفتار ازدحامی و جمعی آن‌هاست. در اعماق اقیانوس‌ها سالپ‌ها اغلب به‌صورت گروهی هستند که زنجیره سالپ نامیده می‌شوند. این زنجیره در شکل (۱) نمایش داده شده است.

شده است. زوایای کلید زنی بینصفر تا $\pi/2$ محدود شده است. به این دلیل که شکل موج ولتاژ یک تابع فرد است، بنابراین بسط سری فوریه این شکل موج فقط شامل هارمونیک‌های فرد است. با در نظرگیریدامنه‌های مساوی منابع ولتاژ DC بسط سری فوریه برای شکل موج مذکور را می‌توان مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t) \quad (5)$$

که در آن V_n دامنه مؤلفه هارمونیک n ام است.

در این مقاله، اینورتر هفت سطحی بیان شده منظور حذف هارمونیک‌های پنج و هفت انتخاب شده است. در نظرگیری هارمونیک‌های مرتبه سوم به دلیل اینکه آن‌ها در کاربردهای سه فاز و در ولتاژهای فاز به فاز وجود ندارند نیاز نخواهد بود. بنابراین به منظور برآورده کردن هارمونیک اصلی و حذف هارمونیک‌های پنجم و هفتم سه معادله خطی با سه زاویه مطابق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$V1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} (\cos(a1)) + \cos(a2) + \cos(a3) \quad (6)$$

$$V5 = \frac{4V_{dc}}{5\pi} (\cos(5a1)) + \cos(5a2) + \cos(5a3) \quad (7)$$

$$V7 = \frac{4V_{dc}}{7\pi} (\cos(7a1)) + \cos(7a2) + \cos(7a3) \quad (8)$$

در روابط فوق، $V5$ و $V7$ به منظور حذف هارمونیک‌های پنجم و هفتم در مقدار صفر تنظیم می‌شوند. به منظور دستیابی به زوایای کلید زنی مختلف یک شاخص جدید که شاخص مدولاسیون نامیده می‌شود نماینده مقدار $V1$ خواهد بود. این شاخص مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M = \pi V1 / 4sVd \quad (9)$$

برای اینورتر هفت سطحی مقدار s برابر با ۳ است. با جایگزینی شاخص مدولاسیون در روابط قبل، معادله زیر می‌تواند برای اینورتر هفت سطحی به دست بیاید. با حل این رابطه مقدار بهینه زاویه کلید زنی متغیرهای $a1$ ، $a2$ و $a3$ با توجه به شاخص مدولاسیون M به دست خواهد آمد.

$$M = \frac{1}{3} (\cos(a1)) + \cos(a2) + \cos(a3) \quad (10)$$

$$0 = (\cos(5a1)) + \cos(5a2) + \cos(5a3) \quad (11)$$

در معادله (۱) نشان می‌دهد که فقط موقعیت رهبر با توجه به منبع غذایی آپدیتی می‌شود. ضریب $C1$ مهم‌ترین پارامتر در SSA است زیرا مطابق رابطه زیر اکتشاف و استخراج را متعادل می‌کند:

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4L}{L}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن L تکرار حال حاضر و L حداکثر تکرارهای الگوریتم می‌باشد. پارامتر $C2$ و $C3$ اعداد تصادفی هستند که به طور یکنواخت در بازه $[0, 1]$ تولید شده‌اند. در حقیقت آن‌ها تعیین می‌کنند که موقعیت بعدی در λ مین بعد باید به سمت مثبت بی‌نهایت، منفی بی‌نهایت یا اندازه گام باشد. آپدیت موقعیت دنبال کنندگان نیز مطابق رابطه زیر است:

$$x_j^i = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (3)$$

x_j^i موقعیت سالپ i امین دنبال کننده را در λ مین بعد می‌دهد و $i \geq 2$ است. t زمان است و v_0 سرعت اولیه می‌باشد. همچنین $a = \frac{v_{final}}{v_0}$ است در حالیکه $v = \frac{x - x_0}{t}$. به دلیل اینکه زمان در بهینه‌سازی تکرار می‌شود، اختلاف این تکرارهای برابر با ۱ در نظر گرفته شده و $v_0 = 0$ در نظر گرفته می‌شود و این معادله می‌تواند به صورت زیر خلاصه‌سازی شود:

$$x_j^i = \frac{1}{2} (x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (4)$$

x_j^i موقعیت سالپ i امین دنبال کننده را در λ مین بعد می‌دهد و $i \geq 2$ است. با معادلات فوق زنجیره سالپ می‌تواند شبیه‌سازی شود.

۳- پیکربندی اینورتر هفت سطحی آبشاری

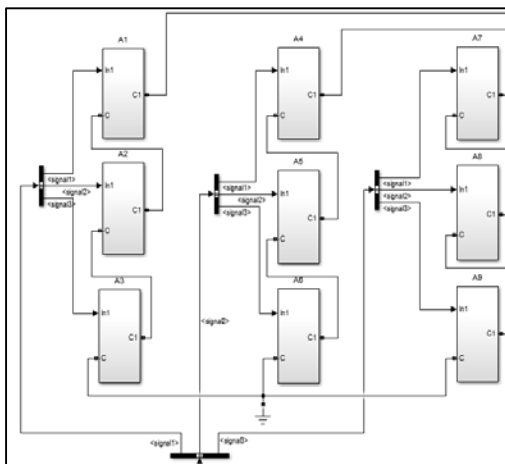
این نوع اینورتر شامل چندین اینورتر پل کامل تکفاز است که به صورت سریبه هم متصل شده است. وظیفه این اینورتر چند سطحی ایجاد ولتاژ خروجی AC مطلوب از چندین منبع ولتاژ DC متصل شده به یک واحد اینورتر است. تعداد سطح ولتاژ فاز خروجی در اینورتر چند سطحی آبشاری برابر $2s+1$ است که در آن s تعداد منابع ولتاژ DC است. این توپولوژی باخیراً بسیار در منابع تغذیه ac و کاربردهای درایو محبوبیت یافته است. به منظور دستیابی به ساختار سه فاز، خروجی فازها را می‌توان به صورت ستاره یا مثلث به هم متصل کرد.

شکل موج اینورتر هفت سطحی نشان داده شده در شکل ۳-۵ دارای سه متغیر $a1$ ، $a2$ و $a3$ است و سطوح ولتاژ برابر فرض

می‌کند تا زوایای آتش به‌گونه‌ای انتخاب شوند تا مقدار تابع هدف در کمترین حد خود قرار بگیرد.

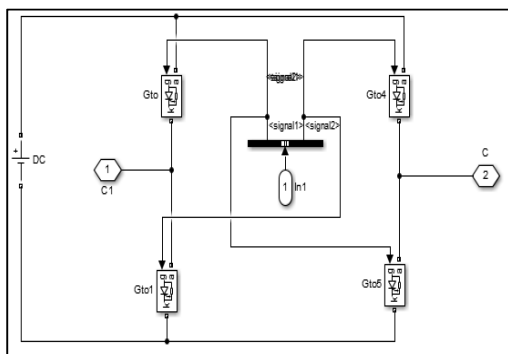
۵- پیاده‌سازی الگوریتم و تحلیل نتایج مطالعات

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم و تابع هدف پیشنهادی در این قسمت نحوه شبیه‌سازی اینورتر هفت سطحی در محیط سیمولینکنرم افزار MATLAB ارائه می‌شود. شکل (۲) اینورتر هفت سطحی سه فاز شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در یک اینورتر m سطحی به تعداد $(m-1)/2$ یکسو ساز تمام پل نیاز است در این شبیه‌سازی با توجه به هفت سطحی بودن اینورتر، در هر فاز باید سه یکسوساز تمام پل قرار گیرد. بدین ترتیب بلاک‌های A1، A2 و A3 مربوط به مدار فاز A، بلاک‌های A4، A5 و A6 مربوط به مدار فاز B و بلاک‌های A7، A8 و A9 مربوط به مدار فاز C، است.



شکل ۲. اینورتر هفت سطحی سه فاز شبیه‌سازی شده

مطابق شکل (۱) هر کدام از این بلاک‌ها به صورت متوالی در هر فاز قرار گرفته‌اند. مدار داخلی این بلاک‌ها مطابق شکل (۳) است.



شکل ۳. مدار داخلی هر یک از بلاک‌های A1 تا A9

$$0 = (\cos(7a1)) + \cos(7a2) + \cos(7a3) \quad (12)$$

از آنجا که معادله فوق، یک معادله چندجمله‌ای غیرخطی و غیر محدب است، دستیابی به پاسخ بهینه نهایی بسیار مشکل است. بدین منظور با تشکیل تابع هدف از روش‌های هوشمند به‌منظور حل مسئله موردنظر استفاده می‌شود.

۴- تابع هدف مسئله

در این مسئله هدف مینیمم‌سازی مناسب‌ترین فرد آن است که تابع هدف آن کمترین مقدار را داشته باشد. در مسئله طرح‌شده در این مقاله، باید به نحوی زوایای آتش و یا زوایای کلید زنی تعیین شوند که علاوه بر کاهش هارمونیک‌ها و برآورده شدن قیود تابع هدف تعریف‌شده مینیمم‌سازی شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد این پایان‌نامه با دو هدف بررسی می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

✓ کاهش هارمونیک در ولتاژ خروجی اینورتر هفت سطحی

✓ مقدار مؤلفه اصلی نیز در مقدار مطلوب خود قرار گیرد.

بدین منظور تابع هدف دو قسمتی مطابق رابطه (۱۳) تعریف شده است.

$$f = \min\{\gamma_1 \times |(3M - V_1)| + \gamma_2 \times THD\} \quad (13)$$

در تابع هدف فوق M ، مقدار شاخص مدولاسیون و V_1 مؤلفه اصلی ولتاژ خروجی است. THD نیز میزان اعوجاج هارمونیک ولتاژ خروجی اینورتر است که مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید. γ_1 و γ_2 نیز ضرایب جریمه است که میزان اهمیت هر قسمت در تابع هدف را مشخص می‌کند.

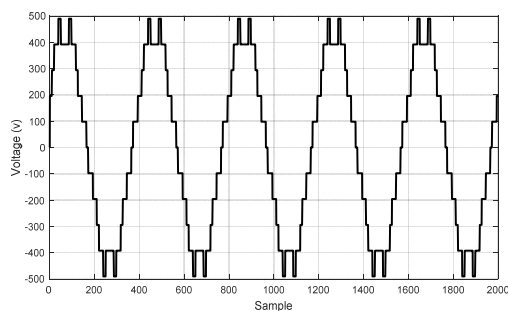
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2}}{V_1} \quad (14)$$

درواقع در هر تکرار الگوریتم، زوایای آتش به‌عنوان متغیر از الگوریتم بهینه‌ساز به اینورتر وارد می‌شود و شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر بر اساس زوایای آتش ورودی حاصل می‌شود. مطابق با شکل موج ولتاژ خروجی نیز تابع هدف محاسبه شده و مقدار آن به الگوریتم بهینه‌ساز برمی‌گردد. این روند ادامه پیدا

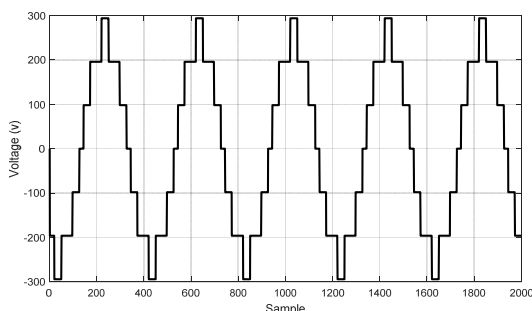
جدول ۱. مشخصات مدار اینورتر در حالت پایه

حالت: پایه	روش بهینه‌سازی: --	تابع هدف: ---
شاخص مدولاسیون: ۰/۸	فرکانس حامل: ۱۰ کیلوهرتز	فرکانس مرجع: ۵۰ هرتز
زاویه کلید زنی فاز: A	زاویه کلید زنی فاز: A	زاویه کلید زنی فاز: A
هارمونیک ولتاژ فاز: ۱/۱٪ درصد	هارمونیک ولتاژ خط: ۱۳/۹۷٪ درصد	

از جدول فوق مشاهده می‌شود که در این حالت مقدار THD ولتاژ فاز مدار اینورتر سه فاز هفت سطحی بیش از ۱۸٪ درصد و THD ولتاژ خط مدار خروجی اینورتر نزدیک به ۱۴٪ درصد خواهد بود. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب ولتاژهای خط و فاز خروجی این اینورتر را نشان می‌دهد.



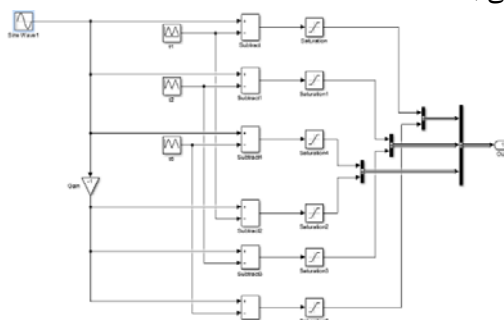
شکل ۵ شکل موج ولتاژ خط خروجی اینورتر در حالت پایه



شکل ۶ شکل موج ولتاژ فاز خروجی اینورتر در حالت پایه

همچنین با استفاده از تحلیل هارمونیک این ولتاژها، مقادیر هارمونیک هر مرتبه مشخص خواهد شد. بدین منظور با استفاده از تحلیل فوریه در نرم‌افزار MATLAB، مقدار هارمونیک‌های مرتبه‌های مختلف برای ولتاژهای خط و فاز به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است در هر بلاک یک، یک سوساز تمام پل با چهار عنصر کلید زنی الکترونیک قدرت و یک منبع ولتاژ DC قرار دارد. مقدار این منبع ولتاژ در تمام بلاک‌ها برابر است. برای قطع و وصل شدن و کلید زنی ادوات الکترونیک قدرت داخل هر بلاک، به دو سیگنال نیاز دارد که این سیگنال‌ها با روش مدولاسیون پهنای باند سینوسی ایجاد می‌شوند. در اینورتر سه فاز، موج حامل مثلثی با سه شکل موج سینوسی که با یکدیگر اختلاف فاز ۱۲۰ درجه دارند مقایسه می‌شود. شکل زیر مدار شبیه‌سازی این قسمت در نرم‌افزار MATLAB را نشان می‌دهد. مدار شکل ۴ مربوط به بخش تولید سیگنال برای فاز A می‌باشد.



شکل ۴. مدار SPWM به منظور تولید سیگنال‌های کلید زنی

یک منبع ولتاژ سینوسی با زاویه صفر و فرکانس مرجع (۵۰ هرتزی) وجود دارد. در این شبیه‌سازی آنجایی که در هر فاز سه یک سوساز تمام پل وجود دارد (اینورتر هفت سطحی) لذا سه بلاک موج حامل وجود دارد همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است در هر یک از این بلاک‌های تولید سیگنال، ۶ سیگنال ایجاد می‌شود که برای یک فاز اینورتر به کار می‌رود. به منظور بررسی جامع شبیه‌سازی اینورتر هفت سطحی در سه حالت پایه، حالت اول، حالت دوم و حالت سوم مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

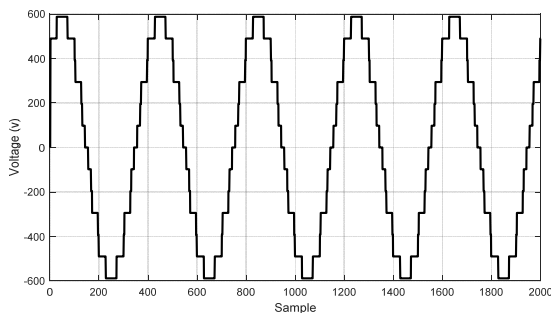
۱-۵- حالت پایه

در این حالت، حالت پایه مدار شبیه‌سازی شده اجرا و شکل موج‌های ولتاژ خروجی اینورتر مشاهده می‌شود. پارامترهای شبیه‌سازی در این حالت و هارمونیک‌های به دست آمده مطابق جدول زیر است:

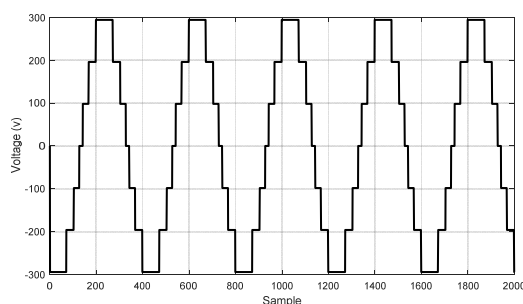
جدول ۲. مشخصات مدار اینورتر در حالت اول

حالت : اول	روش بهینه‌سازی: آفلاین	تابع هدف : دامنه هارمونیک ۵ و ۷
شاخص مدولاسیون : ۰/۹۲۵	فرکانس حامل : ۱۰ کیلوهرتز	فرکانس مرجع : ۵۰ هرتز
زاویه کلید زنی فاز : A ۳۴/۵۵	زاویه کلید زنی فاز : A ۰/۱۱۵	زاویه کلید زنی فاز : A ۱۷/۷۲
هارمونیک ولتاژ فاز: ٪۱۲/۹۱ درصد	هارمونیک ولتاژ خط: ٪۹/۶۳ درصد	

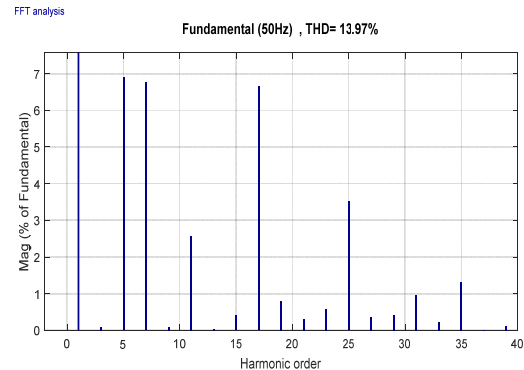
پس از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی مقدار شاخص مدولاسیون و زوایا مطابق جدول فوق به دست آمده است و مقادیر دامنه‌های هارمونیک‌های پنجم و هفتم که در حالت پایه بیش از ۶٪ درصد بوده است به زیر یک درصد می‌رسد. شکل‌های (۹) و (۱۰) شکل موج‌های ولتاژهای خط و فاز خروجی اینورتر در این حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با تغییر زوایای کلید زنی شکل موج‌ها نسبت به حالت پایه تغییر کرده‌اند. همچنین شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نیز تحلیل هارمونیک این ولتاژها را به ترتیب نشان می‌دهد.



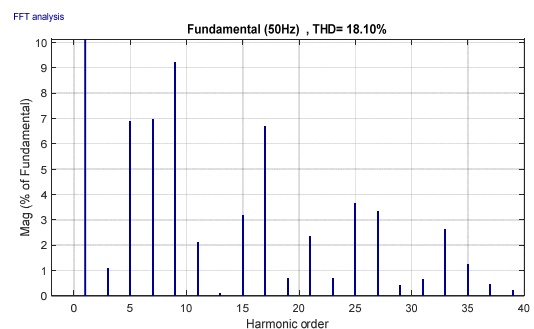
شکل ۹. شکلموجولتاژ خط خروجی اینورتر در حالت اول



شکل ۱۰. شکلموجولتاژ فاز خروجی اینورتر در حالت اول



شکل ۷ مقدار هارمونیک و مرتبه‌های آن در ولتاژ خط اینورتر سه فاز در حالت پایه



شکل ۸ مقدار هارمونیک مرتبه‌های آندروولتاژ فاز اینورتر سه فاز در حالت پایه

همان‌طور که از شکل‌های فوق مشخص است، در ولتاژ خط هارمونیک سوم وجود ندارد اما دامنه هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱، ۱۷ و ۲۵ به نسبت زیاد بوده و عامل اصلی THD می‌باشند. همچنین در شکل (۸) مشخص است که علاوه بر هارمونیک‌های فوق، هارمونیک‌های مضرب سوم نیز اضافه شده‌اند که همین عامل افزایش THD در این حالت است.

۲-۵- حالت اول

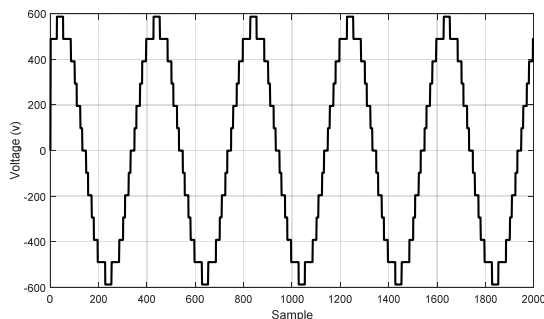
در این حالت، هدف کاهش هارمونیک کل و یا حذف یکی از هارمونیک‌ها در حالت پایه است. بدین منظور در این حالت محاسبات به صورت آفلاین صورت گرفته و زوایای کلید زنی مربوط به هر فاز به دست خواهند آمد.

این قسمت، کاهش دامنه‌های هارمونیک‌های خاص مورد نظر نیستو زوایا به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند تا موج ولتاژ خط و فاز کمترین مقدار هارمونیک را و بیشترین مقدار مؤلفه اصلی را مطابق با شاخص مدولاسیون داشته باشند. نتایج به دست آمده در این حالت مطابق جدول زیر است.

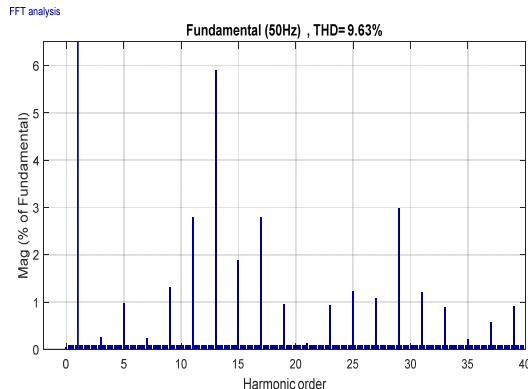
جدول ۳. مشخصات مدار اینورتر در حالت دوم

حالت : دوم	روش بهینه‌سازی: آفلاین	تابع هدف : اعوجاج هارمونیک کل
شاخص مدولاسیون : ۰/۹۲۸	فرکانس حامل : ۱۰ کیلوهرتز	فرکانس مرجع : ۵۰ هرتز
زاویه کلید زنی فاز A : ۳۳/۸۹	زاویه کلید زنی فاز A : ۱۶/۳۵	زاویه کلید زنی فاز A : ۵/۴۶
هارمونیک ولتاژ فاز: ۱۲/۹۹ درصد	هارمونیک ولتاژ خط: ۸/۷۳ درصد	

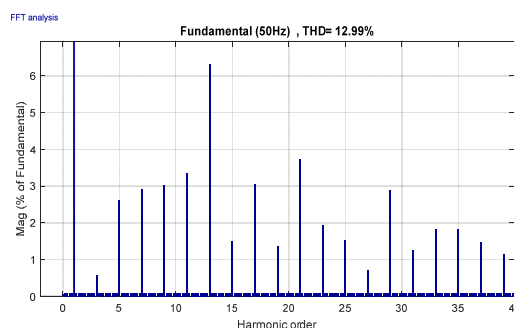
پس از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی مقدار شاخص مدولاسیون و زوایا مطابق جدول فوق به دست آمده است و مقادیر دامنه‌های هارمونیک‌های به دست آمده در تمامی مرتبه‌ها از حالت پایه کمتر شده است. شکل های (۱۳) و (۱۴) شکل موج‌های ولتاژهای خط و فاز خروجی اینورتر در این حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با تغییر زوایای کلید زنی شکل موج‌ها نسبت به حالت پایه تغییر کرده‌اند. همچنین شکل های (۱۵) و (۱۶) نیز تحلیل هارمونیک این ولتاژها را به ترتیب نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. شکل موج ولتاژ خط خروجی اینورتر در حالت دوم



شکل ۱۱. مقدار هارمونیک مرتبه‌های اندر ولتاژ خط اینورتر سه‌فاز در حالت اول



شکل ۱۲. مقدار هارمونیک مرتبه‌های اندر ولتاژ فاز اینورتر سه‌فاز در حالت اول

در مقایسه با شکل های ولتاژ حالت پایه، این شکل‌ها اعوجاج کمتری داشته و همچنین با بالاتر بودن مقدار شاخص مدولاسیون، مقدار دامنه تک‌فاز به مقدار سه برابر ولتاژ DC (۳۰۰ ولت) بسیار نزدیک‌تر است.

همان‌طور که مشخص است علاوه بر مقدار هارمونیک پنجم و هفتم، هارمونیک کلی ولتاژهای فاز و خط به‌طور چشمگیری کاهش یافته‌اند. همان‌طور که از شکل (۱۱) مشخص است دامنه هارمونیک‌های پنجم و هفتم به زیر ۱٪ درصد رسیده است.

۳-۵- حالت سوم

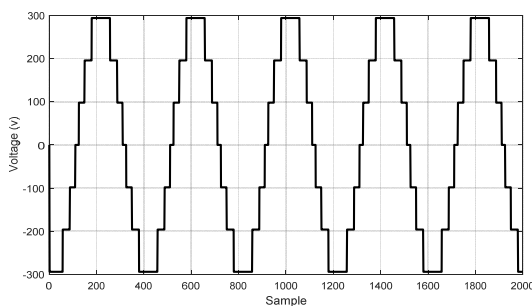
در این حالت، هدف کاهش هارمونیک کل و یا حذف یکی از هارمونیک‌ها در حالت پایه است. در واقع هدف الگوریتم بهینه‌ساز در این حالت انتخاب زوایای کلید زنی به نحوی است که علاوه بر ماکزیمم رساندن دامنه مؤلفه اصلی، مقدار اعوجاج هارمونیک کلی به کمترین مقدار خود برسد. در واقع در

در این قسمت تابع بهینه‌ساز همزمان با محیط سیمولینک پیاده‌سازی می‌شود. بدین ترتیب مراحل محاسبات THD و مؤلفه اصلی به ازای هر بار اجرای الگوریتم بهینه‌ساز در محیط سیمولینک به دست آمده و به تابع هزینه الگوریتم SSA بازخوانی می‌شود. در واقع هدف الگوریتم بهینه‌ساز در این حالت انتخاب زوایای کلید زنی به نحوی است که علاوه بر ماکزیمم رساندن دامنه مؤلفه اصلی، مقدار اعوجاج هارمونیک کلی به کمترین مقدار خود برسد. نتایج به دست آمده در این حالت مطابق جدول زیر است.

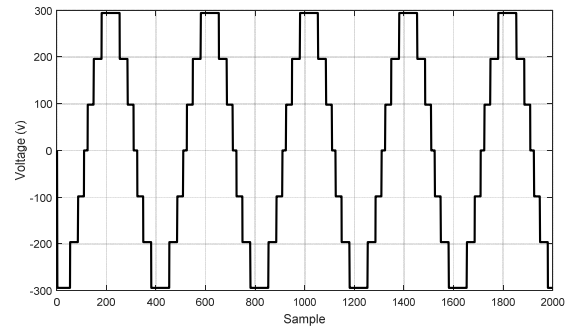
جدول ۴. مشخصات مدار اینورتر در حالت سوم

حالت: سوم	روش بهینه‌سازی: آنالین	تابع هدف: اعوجاج هارمونیک کل
شاخص مدولاسیون: ۰/۹۴۸	فرکانس حامل: ۱۰ کیلوهرتز	فرکانس مرجع: ۵۰ هرتز
زاویه کلید زنی فاز A : ۱۵/۲۸	زاویه کلید زنی فاز A : ۲۸/۰۰	زاویه کلید زنی فاز A : ۴/۶۷
هارمونیک ولتاژ فاز: ۱۲/۵۶ درصد	هارمونیک ولتاژ خط: ۸/۴۷ درصد	

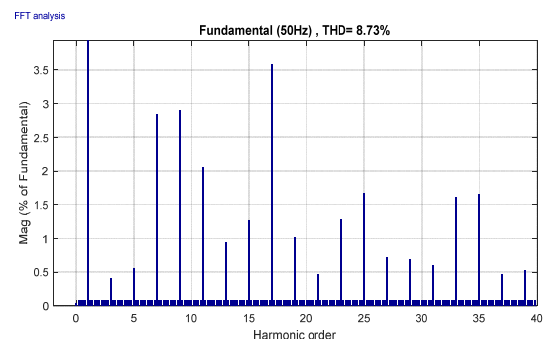
همانطور که در جدول فوق نشان داده شده است، مقدار M در حداکثر مقدار خود در بین موارد بررسی شده قرار گرفته است. همچنین مقادیر دامنه‌های هارمونیک‌های به دست آمده در تمامی مرتبه‌ها از حالت پایه و حالت اول و دوم نیز کمتر شده است. شکل‌های (۱۷) شکل موج‌های ولتاژهای خط و فاز خروجی اینورتر در این حالت را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با تغییر زوایای کلید زنی شکل موج‌ها نسبت به حالت پایه تغییر کرده‌اند. همچنین شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نیز تحلیل هارمونیک این ولتاژها را به ترتیب نشان می‌دهد.



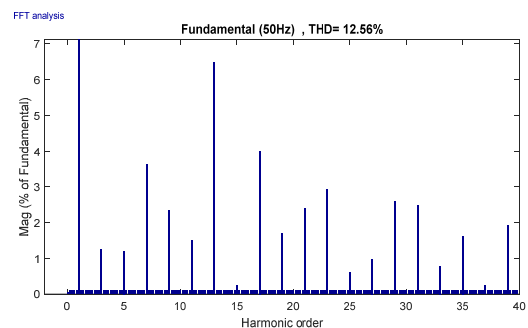
شکل ۱۷. شکل موج ولتاژ خط خروجی اینورتر در حالت سوم



شکل ۱۴. شکل موج ولتاژ فاز خروجی اینورتر در حالت دوم



شکل ۱۵. مقدار هارمونیک مرتبه‌ها یا اندر ولتاژ خط اینورتر سه‌فاز در حالت دوم



شکل ۱۶. مقدار هارمونیک مرتبه‌ها یا اندر ولتاژ فاز اینورتر سه‌فاز در حالت دوم

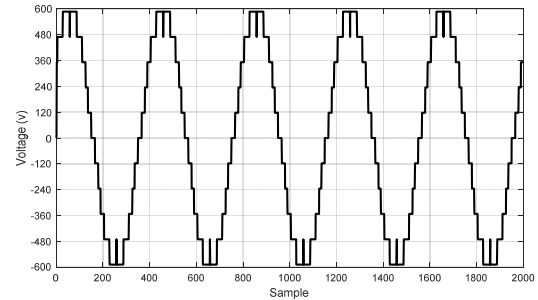
از شکل‌های فوق می‌توان دریافت که دامنه کلیه هارمونیک‌ها از حالت پایه کمتر است. درست است که دامنه هارمونیک هفتم از حالت قبل بیشتر شده اما مقدار THD نهایی کاهش ۰/۹ درصد از حالت قبل کمتر شده است. این نشان می‌دهد که در این حالت هدف کاهش دامنه تمام هارمونیک‌ها بوده است و الگوریتم روی کاهش یک یا چند هارمونیک خاص تمرکز نکرده است.

۴-۵- حالت سوم

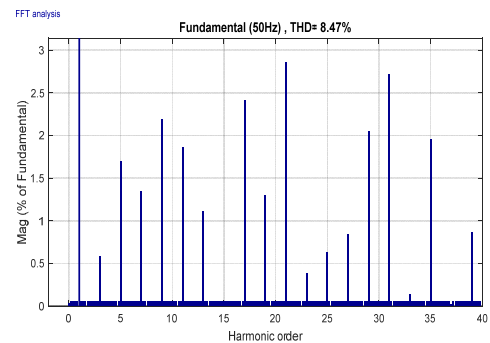
آنلاین اجرا و پیاده‌سازی شد که باینکه زمان محاسباتی بالاتری نسبت به محاسبات آفلاین دارد، بهینه‌ترین ولتاژ خروجی را از نظر شاخص مدولاسیون و مقدار هارمونیک فراهم کرده است. در این حالت میزان هارمونیک کلی ولتاژ خط مقدار تقریبی ۱۴٪ درصد دارد که با پیاده‌سازی طرح پیشنهادی از آنجا که از ولتاژ خط خروجی اینورتر سه فاز استفاده می‌شود، نسبت به حالت پایه بیش از ۵٪ درصد هارمونیک کاهش و با محاسبات آفلاین در حالت عادی به مقدار ۸/۷۳٪ درصد و با محاسبات آنلاین به مقدار ۸/۴۳٪ درصد کاهش یافته است که نشان از دقت و عملکرد الگوریتم مطرح شده در کاهش اعوجاج هارمونیک در ولتاژ خروجی اینورتر شبیه‌سازی شده می‌باشد.

۷- منابع

- [1] Sun J, Grotstollen H. Solving nonlinear equations for selective harmonic eliminated PWM using predicted initial values. In: Proceedings of the international conference ind. electron., contr., instrum., automat.; Nov. 1992, p. 259-64.
- [2] Shen K, Zhao D, Mei J, Tolbert L, Jianze W, Ban M, et al. Elimination of harmonics in a modular multilevel converter using particle swarm optimization based staircase modulation strategy. IEEE Trans Ind Electron 2014;46(c).
- [3] Imarazene Khoukha, Chekireb Hachemi, Berkouk El Madjid. Selective harmonics elimination PWM with self-balancing DC-link in photovoltaic 7-level inverter. Turk J Electr Eng Comput Sci 2016;24:3999-4015.
- [4] Zheng CF, Zhang B. Application of Wu method to harmonic elimination techniques. Proc Chin Soc Elect Electron Eng 2005:40-5.
- [5] Yang K, Zhang Q, Yuan R, Yu W, Wang J. Selective harmonic elimination With Groebner bases and symmetric polynomials. IEEE Trans Power Electron 2015;31(4):689-94.
- [6] Chiasson JN, Tolbert LM, McKenzie KJ, Du Z. Elimination of harmonics in a multilevel converter using the theory of symmetric polynomials and resultants. IEEE Trans Control Syst Technol 2005;13(2):216-23.
- [7] Ozpineci B, Tolbert LM, Chiasson JN. Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms. In: Proceedings of the IEEE power electron. spec. conf.; 2004, p. 3911-6.
- [8] Ozpineci B, Tolbert LM, Chiasson JN. Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms. IEEE Power Electron Lett 2005;3(3):92-5.
- [9] Butun E, Erfidan T, Urgan S. Improved power factor in a low-cost PWM single phase inverter using genetic algorithms. Energy Convers Manag 2006;47(11-12):1597-609.
- [10] Dahidah MSA, Agelidis VG. Selective harmonic elimination PWM control for cascaded multilevel voltage source converters: a generalized formula. Power Electron IEEE Trans 2008;23(4):1620-30.
- [11] Pulikanti SR, Dahidah MSA, Agelidis VG. Voltage balancing control of three-level active NPC converter using SHE-PWM. IEEE Trans Power Deliv 2011;26(1):258-67.
- [12] Jegathesan V, Jerome J. Elimination of lower order harmonics in voltage source inverter feeding an induction motor drive using evolutionary algorithms. Expert Syst Appl 2011;38(1):692-9.
- [13] Salehi R, Farokhnia N, Abedi M, Hamid Fathi S. Elimination of low order harmonics in multilevel inverters using genetic algorithm. J Power Electron 2011;11(2):132-9.
- [14] Roşu ŞG, Rădoi C, Florescu A, Guglielmi P, Pastorelli M. The analysis of the solutions for harmonic elimination PWM bipolar



شکل ۱۸. مقدار هارمونیک مرتبه‌های آندروولتاژ خط اینورتر سه‌فاز در حالت سوم



شکل ۱۹. مقدار هارمونیک مرتبه‌های آندروولتاژ فاز اینورتر سه‌فاز در حالت سوم

همانطور که مشخص است در این حالت، بهبود محسوسی در کاهش هارمونیک ایجاد شده در ولتاژ خروجی اینورتر حاصل شده است. اما باید اذعان کرد که این روش بار محاسباتی بالایی دارد و زمان پاسخگویی آن به مراتب بالاتر خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش مؤثر به منظور محاسبه زوایای کلید زنی در اینورتر PWM-SHE به منظور کاهش هارمونیک‌ها ارائه شده است. در ادامه الگوریتم ارائه شده به منظور کاهش هارمونیک تحت سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. حالت اول توانسته تا حدود زیادی هارمونیک پنجم و هفتم را از شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر حذف کند. در حالت دوم هدف کاهش هارمونیک کلی ولتاژ خروجی اینورتر بود که در این حالت نیز الگوریتم هارمونیک ولتاژ خط را با تعیین زوایای مناسب کلید زنی به ۸/۷۳٪ درصد کاهش و همچنین دامنه ولتاژ مؤلفه اصلی را بسیار نزدیک به مقدار مطلوب خود رساند. در این حالت هارمونیک خاصی کاهش نیافته و کل هارمونیک‌های شکل موج کاهش داشته‌اند. در حالت نهایی (سوم) نیز الگوریتم به صورت

- waveform with a specialized differential evolution algorithm. In: Proc. int. conf. optim. electr. electron. equipment. OPTIM; 2012, p. 814–21.
- [15] Chabni F, Taleb R, Helaimi M. Differential evolution based SHEPWM for sevenlevel inverter with non-equal DC sources. (IJACSA) Int J Adv Comput Sci Appl 2016;7(9):304–11.
- [16] Salam Z, Amjad AM, Majed A. Using differential evolution to solve the harmonic elimination pulse width modulation for five level cascaded multilevel voltage source inverter. In: Proceedings of the 2013 1st int. conf. artif. intell. model. simul.; 2013, p. 43–8.
- [17] Salam Z, Majed A, Amjad AM. Design and implementation of 15-level cascaded multi-level voltage source inverter with harmonics elimination pulse-width modulation using differential evolution method. IET Power Electron 2015;8(9):1740–8.
- [18] Ray RN, Chatterjee D, Goswami SK. An application of PSO technique for harmonic elimination in a PWM inverter. Appl Soft Comput J 2009;9(4):1315–20.
- [19] Ray RN, Chatterjee D, Goswami SK. A PSO based optimal switching technique for voltage harmonic reduction of multilevel inverter. Expert Syst Appl 2010;37(12):7796–801.
- [20] Sanchez Reinoso CR, De Paula M, Milone DH, Buitrago RH. Photovoltaic inverters optimisation. Energy Procedia 2012;14(2011):1484–9.
- [21] Al-Othman AK, Abdelhamid TH. Elimination of harmonics in multilevel inverters with non-equal dc sources using PSO. Energy Convers Manag 2009;50(3):756–64.
- [22] Kumle AN, Fathi SH, Broujeni ST. Harmonic optimization in multi-level inverters by considering adjustable DC sources using Memetic algorithm. In: Proceedings of the 2014 11th international conference electr. eng. comput. telecommun. inf. technol. ECTI-CON 2014; 2014.
- [23] Systems D, Kumle AN. A novel memetic algorithm approach for selective harmonic elimination in multi-level inverters. In: Proceedings of the 5th power electronics, drive systems and technologies conference (PEDSTC 2014); 2014, p. 205–10.
- [24] Heidari Yazdi SS, Jabbarvaziri F, Kumle A, Niknam, Jamshidi M, Fathi SH. Application of memetic algorithm for selective harmonic elimination in multi-level inverters. IET Power Electron 2015;8(9):1733–9.
- [25] Azab Mohamed. PSO-based solutions to selective harmonic elimination in standalone photovoltaic inverters. Int J Renew Energy Technol 2010;1(3).
- [26] Etesami MH, Farokhnia N, Fathi SH. A method based on Imperialist Competitive Algorithm (ICA), aiming to mitigate harmonics in multilevel inverters. In: Proceedings of the 2011 2nd power electron. drive syst. technol. conference. PEDSTC 2011; 2011, p. 32–7.