

Selective Harmonic Mitigation in CHB Inverters Using Enhanced Particle Swarm Optimization

Seyyed Mojtaba Hosseini¹ and Hoda Ghoreishy^{2*}

1- Electrical and Computer Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

2*- Electrical and Computer Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

¹gspmojtaba@gmail.com, ^{2*}ghoreishy@nit.ac.ir

Corresponding author address: Hoda Ghoreishy, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Post Code: 47148 – 71167.

Abstract- In this paper a selective harmonic mitigation-PWM control technique has been applied to a five-level cascaded H-bridge inverter to satisfy the grid standards. The objective of this technique is to minimize the output voltage odd, non-triplen harmonic contents from the 5th up to the 41th. But due to the only four degrees of freedom, reducing all harmonic contents under their permitted range is impossible. However, the objective function and the constraints are defined in such a way that except the twenty third and twenty fifth harmonics, all harmonics will be mitigated to their acceptable levels. The first priority in solving the optimization problem is fitting the first component which is then followed by mitigating each individual harmonic and the total harmonic distortion. The proposed objective function is optimized using EPSO algorithm and the simulation results show the superiority of the SHM-PWM technique from the harmonic mitigation and THD points of view.

Keywords- Pulse width modulation, Selective harmonic mitigation, Total harmonic distortion, multilevel inverter.

کاهش هارمونیک‌های انتخابی در اینورترهای CHB با استفاده از الگوریتم بهینه سازی توده ذرات توسعه یافته

سید مجتبی حسینی^۱، هدی قریشی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

¹gspmojtaba@gmail.com, ^{2*}ghoreishy@nit.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: هدی قریشی، بابل، خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، کد پستی:

۴۷۱۴۸-۷۱۱۶۷

چکیده- در این مقاله روش کنترلی SHM-PWM برای اینورتر پنج سطحی CHB جهت ارضای استانداردهای شبکه اعمال گشته است. هدف از به کارگیری این روش، کاهش هارمونیک‌های فرد غیر مضرب ۳ از مرتبه ۵ام تا مرتبه ۴۱ام است که به دلیل وجود صرفاً چهار درجه آزادی، کاهش تمامی آنها به زیر حد مجاز استاندارد امکانپذیر نمی‌باشد. با این وجود، علیرغم محدودیت ایجاد شده توسط درجات آزادی، تابع هدف و قیود به گونه‌ای تعریف گردیده‌اند که به غیر از هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵، محتوای سایر هارمونیک‌ها با حاشیه امن مطلوبی به زیر حد مجاز تعیین شده توسط استانداردها کاهش یافته‌اند. اولویت اصلی در حل مساله بهینه سازی، رسیدن مولفه اول ولتاژ خروجی به مقداری معین بوده و سپس کاهش اندازه تک تک هارمونیک‌ها و همچنین THD در اولویت بعدی قرار می‌گیرند. تابع هدف مورد استفاده توسط الگوریتم EPSO بهینه گشته و نتایج شبیه سازی موید برتری روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های متعارف از نقطه نظر کاهش محتوای هارمونیک و بهبود THD می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدولاسیون پهنای پالس، کاهش هارمونیک‌های انتخابی، اعوجاج هارمونیک کل، اینورتر چندسطحی.

۱- مقدمه

اهمیت برخوردار است، فرکانس کلیدزنی پایین مطلوب می‌باشد. به‌ویژه در سیستم‌هایی با توان بالا، تلفات توان در اینورترهای قدرت در طول مراحل کلیدزنی و هدایت تا اندازه‌ای است که فرکانس کلیدزنی را به شدت محدود می‌نماید. راهبرد مناسب جهت کنترل اینورتر در این شرایط، مدولاسیون پهنای پالس با حذف یا کاهش هارمونیک‌های انتخابی (SHE/M-PWM)^۱ می‌باشد. هارمونیک‌های معینی انتخاب می‌گردند. بنابراین می‌توان با استفاده از ساختار اینورترهای چندسطحی و اعمال راهبردهای کنترلی فرکانس پایین به آنها، به مشخصه‌های عملکردی مطلوب همچون کاهش اعوجاج هارمونیک کل (THD)^۲ و کاهش تلفات توان در سیستم‌های قدرت توان بالا دست یافت.

در سالهای اخیر، کاربردهای صنعتی متعدد، نیاز به تجهیزاتی با توان بالا در حد مگاوات را طلب می‌کنند. از آنجائی که اتصال مستقیم اینورترهای دوسطحی تحت شرایط ولتاژ متوسط و توان بالا مشکلاتی را در بر خواهد داشت، ساختار اینورترهای قدرت چندسطحی به عنوان جایگزین مطرح می‌شود. اینورترهای چندسطحی به دلیل داشتن مزایای متعدد از جمله تولید ولتاژ خروجی با اعوجاجی بسیار پایین، کاهش dv/dt ، کاهش فشار وارد بر کلیدهای نیمه‌هادی و کاهش ولتاژ حالت مشترک، درجه جدیدی را در سیستم‌های قدرت ولتاژ متوسط و توان بالا گشوده‌اند. در سیستم‌هایی که بازدهی بالای کلیدزنی از حداکثر

یکی از مهم‌ترین چالشها در راهبردهای SHE/M-PWM، سرعت پایین آنها می‌باشد. مزیت روش پیشنهادی در این مرجع در مقایسه با روش‌های متعارفی که از کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی استفاده می‌کنند، افزایش قابل ملاحظه سرعت تشخیص هارمونیک و کاهش آن است. مرجع [۲۰] یک تکنیک PWM بر مبنای کاهش هارمونیک‌های انتخابی جریان را برای یکسوسازهای چندسطحی متصل به شبکه ارائه می‌دهد. در روش پیشنهادی، به جای استفاده از مراجع ولتاژ برای محاسبه زوایای کلیدزنی، از مراجع جریان برای جبران هارمونیک‌های جریان و ارضای استانداردهای شبکه استفاده می‌گردد.

چنانچه دامنه ولتاژهای لینک dc در اینورترهای چندسطحی متغیر و نابرابر در نظر گرفته شود، درجات آزادی سیستم در کاهش هارمونیک‌های انتخابی افزایش یافته و مشخصه‌های عملکردی آن نظیر THD و تلفات بهبود می‌یابند [۲۱-۲۲]. در این مقاله یک روش کنترلی SHM-PWM بر اینورتر پنج‌سطحی پل H آبشاری (CHB) جهت ارضای استانداردهای شبکه EN 50160 و CIGRE WG 36-05، اعمال گشته است. هدف از به‌کارگیری این روش، کاهش هارمونیک‌های فرد غیر مضرب ۳ از مرتبه ۵ام تا مرتبه ۴۱ام است که به دلیل وجود صرفاً چهار درجه آزادی، کاهش تمامی آنها به زیر حد مجاز استاندارد امکانپذیر نمی‌باشد. با این وجود، علیرغم محدودیت ایجاد شده توسط درجات آزادی، تابع هدف و قیود به گونه‌ای تعریف گردیده‌اند که به غیر از هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵، محتوای سایر هارمونیک‌ها با حاشیه امن مطلوبی به زیر حد مجاز تعیین شده توسط استانداردها کاهش یافته‌اند. تابع هدف مورد استفاده توسط الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات توسعه یافته (EPHO) بهینه گشته و نتایج شبیه‌سازی موید برتری روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های متعارف از نقطه نظر کاهش محتوای هارمونیک و بهبود THD می‌باشد.

۲- مفاهیم روش پیشنهادی SHM-PWM

شکل‌های ۱ و ۲، ساختار یک فاز از اینورتر پنج سطحی CHB را به همراه شکل موج ولتاژ خروجی فرکانس پایین آن نشان می‌دهد. سری فوریه شکل موج خروجی عبارتست از:

$$v(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (1)$$

که $\omega_n = n \frac{2\pi}{T}$ می‌باشد. ضرایب a_n و b_n به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (2)$$

در روش SHE-PWM، در مسیر حذف هارمونیک‌های انتخابی، مجموعه‌ای از معادلات غیرجبری غیرخطی به دست می‌آید که به دلیل ماهیت مثلثاتی که دارند، دارای جوابهای یکتا نمی‌باشند. روش‌های گوناگونی برای حل این معادلات در مقالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. عمده این روش‌ها عبارتند از: روش‌های مبتنی بر تکرار همانند روش نیوتن - رافسون [۱۲و۱]، استفاده از توابع والش [۴]، روش ثنوری برآیند [۸-۶] و روش هموتوبی [۱۱و۱۰].

با این وجود، مسائل متعددی بر شرایط حل معادلات توسط این روش‌ها تاثیر گذاشته و همگرایی الگوریتم‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد [۳-۵] و [۹-۷]. این در حالی است که با بهره‌گیری از تکنیک‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) می‌توان بر تمامی موانع روش‌های قبلی غلبه کرد [۱۴-۱۲]. از طرف دیگر، در راهبرد SHE-PWM، به صفر رساندن هارمونیک‌های مرتبه‌های پایین، ممکن است موجب شود تا دامنه اولین هارمونیک‌هایی که حذف نشده‌اند، زیاد گردد. این امر یکی از معایب بزرگ این تکنیک در کاربردهای واقعی و عملی به شمار می‌رود [۱۵].

به همین دلیل، لزوم استفاده از راهبرد کنترلی کاهش هارمونیک‌های انتخابی (SHM-PWM) به جای SHE-PWM کاملاً مشهود می‌باشد. راهبرد مذکور، دامنه هر هارمونیک را در عوض حذف کردن، به زیر حد مجاز استاندارد کاهش داده و معایب عمده SHE-PWM را تا حدودی تعدیل می‌نماید [۱۶]. تحقق این امر مستلزم حل یک مساله بهینه‌سازی است که در معرض قیودی متناسب با ساختار سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. مرجع [۱۷] به ارائه یک روش تغییر یافته از مدولاسیون دامنه پالس (PAM) با کاهش هارمونیک‌های انتخابی می‌پردازد که قادر به حذف تمامی هارمونیک‌های مرتبه ۳ بوده و برای اینورترهای پنج سطحی با کاربردهای تکفاز مناسب می‌باشد. تکنیک مذکور از طریق اضافه نمودن یک قید جدید در حل مساله بهینه‌سازی به کاهش هارمونیک‌ها دست یافته است و قابل تعمیم به اینورترهایی با سطوح بالاتر نیز می‌باشد. مرجع [۱۸] یک روش ترکیبی از SHE و SHM بر مبنای PAM را برای اعمال به یک اینورتر سه سطحی چهارساق پیشنهاد داده است. سیستم‌های چهارساق جهت مرتفع نمودن مشکلات مربوط به نامتعادلی و بارهای غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، به‌کارگیری راهبردهای کنترلی فرکانس پایین در آنها با چالش‌هایی همراه می‌باشد. یک راهبرد سریع کاهش انتخابی هارمونیک‌های جریان برای اینورترهایی با خاصیت فیلتر فعال در [۱۹] پیشنهاد گردیده است.

جدول ۱: نیازمندی‌های کد شبکه EN 50160 + کد کیفیت شبکه

CIGRE WG 36-05

Odd non-triplen harmonics		Odd triplen harmonics		Even harmonics	
Harmonic order (n)	Relative voltage (L _i)	Harmonic order (n)	Relative voltage (L _i)	Harmonic order (n)	Relative voltage (L _i)
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1.5%	4	1%
11	3.5%	15	0.5%	6...10	0.5%
13	3%	21	0.5%	>10	0.2%
17	2%	>21	0.2%		
19	1.5%				
23	1.5%				
25	1.5%				
>25	0.2+32.5/n				

به طور کلی راهبرد پیشنهادی SHM-PWM، مبتنی بر حل نابرابری سیستم زیر است:

$$E_1 = |m_a - b_1| \leq L_1 \quad (5)$$

$$E_j = \frac{1}{|b_j|} \frac{4}{j\pi} (V_1 \cos(j\alpha_1) + V_2) \cos(j\alpha_2) \leq L_j \quad (6)$$

$$V_1 = V_2 = V_{dc}, \quad j = 5, 7, \dots, 41$$

که L_j حداکثر سطح مجاز تحمیلی توسط کدهای شبکه و m_a اندیس مدولاسیون دامنه می‌باشد ($m_a = b_1\pi/4V_{dc}$). حداکثر دامنه منبع ولتاژ در ساختار متقارن (منابع dc برابر) است که در این مقاله ۱ پروپونیت در نظر گرفته شده است. در روش‌های متعارف، با استفاده از روابط (۵) و (۶)، تابع هدف مورد بحث به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$OF(\alpha_1, \alpha_2) = \sum_{i=1,5,7,\dots,41} C_1 E_i^2 + C_2 THD \quad (7)$$

ضرایب c_i در تابع هدف به صورت توابع غیرخطی زیر مدل می‌شوند:

$$c_i = 1 \quad E_i < \rho L_i \quad (8)$$

$$c_i = \lambda_p \quad E_i \geq \rho L_i$$

که $\rho \in (0, 1]$ حاشیه اطمینان برای حداکثر سطح مجاز L_i و $\lambda_p \gg 1$ ضریب جریمه می‌باشد [۱۶].

قیود استفاده شده نیز به صورت زیر است:

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \pi/2 \quad (9)$$

$$\alpha_2 - \alpha_1 > \delta \quad (10)$$

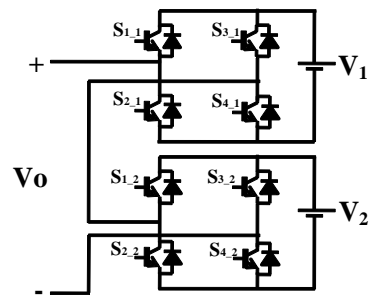
δ حداقل پهنای مجاز پالس برای کلیدزنی می‌باشد که در این مقاله ۰.۰۱ رادیان فرض شده است. بهترین دسته جواب بهینه در یک جدول جستجو ذخیره می‌گردد. شایان ذکر است که در محاسبه THD، هارمونیک‌های مضرب ۳ در نظر گرفته نمی‌شوند.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \sin(n\theta) d\theta \quad (3)$$

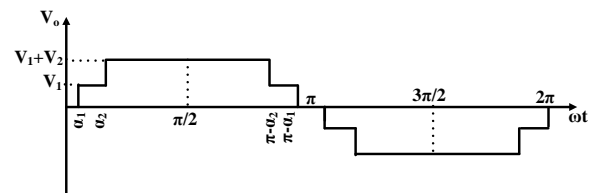
به دلیل تقارن نیم موج و ربع موج شکل موج ولتاژ، ضرایب a_n و همچنین ضرایب زوج b_n صفر می‌باشند. n امین هارمونیک می‌تواند با به حداقل رساندن ضریب b_n مربوطه کاهش یابد. همچنین در یک سیستم سه فاز، هارمونیک‌های مضرب ۳ ولتاژ فاز، در ولتاژ خط حذف می‌گردند و بنابراین هارمونیک‌های با اهمیتی نمی‌باشند. در نتیجه هارمونیک‌های مرتبه پایینی که می‌بایست کاهش یابند، هارمونیک‌های فرد به غیر از مضارب ۳ (۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷ و ...) هستند. ضرایب فرد b_n عبارتند از:

$$b_n = \frac{4}{n\pi} (V_1 \cos(n\alpha_1) + V_2) \cos(n\alpha_2) \quad (4)$$

همانطور که پیشتر بیان شد روش SHM-PWM توانایی کاهش محتوای هارمونیک را به زیر حدود مجاز تعیین شده توسط استانداردهای شبکه دارا می‌باشد. کدهای مذکور، حداکثر مقدار مجاز برای هر مرتبه هارمونیک و THD را به منظور حفظ کیفیت توان شبکه ارائه کرده‌اند (جدول ۱). جهت کاهش هارمونیک‌های فرکانس پایین به زیر حد مجاز تعیین شده توسط استاندارد، تابع هدف مناسبی به همراه قیود تعریف می‌گردد. به حداقل رساندن THD و همچنین اندازه تک تک هارمونیک‌ها می‌بایست در تابع هدف مذکور مد نظر قرار داده شود. همچنین ضروری است که اندازه مولفه اول ولتاژ خروجی نیز در مقداری معین تنظیم گردد.



شکل ۱: اینورتر پنج سطحی CHB



شکل ۲: شکل موج ولتاژ خروجی فرکانس پایین

تمرکز اصلی بر کاهش هارمونیک‌های مرتبه پایین‌تر و بالاخص ۲۳ و ۲۵ قرار بگیرد.

۳- با در نظر گرفتن قید $0 \leq V_2 \leq V_1 \leq 1$ در حل مساله بهینه‌سازی، اندازه هارمونیک مرتبه ۲۹ نیز به زیر حد مجاز تعیین شده توسط استاندارد کاهش یافته و تنها هارمونیک‌های مراتب ۲۳ و ۲۵ در بالای حد مجاز باقی می‌مانند. بدین ترتیب نیاز به فیلتر در تکنیک کنترلی پیشنهادی به حداقل می‌رسد. با توجه به رویکرد پیشنهادی، تابع هدف دارای سه عبارت V_{io1} ، V_{io2} و THD می‌باشد که عبارتند از:

$$V_{io1} = b_1 - 2 \times m_a \quad (11)$$

$$V_{io2} = \sum_{i=5,7,11,\dots,25} E_i^2 \quad (12)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots,41} b_n^2}}{b_1} \times 100 \quad (13)$$

شایان ذکر است که تابع هدف پیشنهادی می‌بایست به نحوی بهینه شود که در خلال برنامه از تکرارهای آغازین تا تکرارهای پایانی، حاصل عبارت‌های مختلف اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای با یکدیگر نداشته باشند تا الگوریتم به جهت بهینه‌سازی از یک جمله در برابر جملات دیگر صرف‌نظر نکند؛ این قضیه به بحث پیرامون راه‌های رفع همگرایی سریع و دام‌های محلی منتهی می‌انجامد. در مجموع ضریب ۵۰۰ برای V_{io1} و V_{io2} و ضریب واحد برای THD در نظر گرفته شده است.

$$OF(\alpha_1, \alpha_2, V_1, V_2) = \sum_{i=1,5,7,\dots,41} (500 \times V_{io1} + 500 \times V_{io2} + THD) \quad (14)$$

قیود استفاده شده نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

$$\alpha_2 - \alpha_1 > \delta \quad (16)$$

$$0 \leq V_2 \leq V_1 \leq 1 \quad (17)$$

۳- الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (Particle Swarm Optimization)

این الگوریتم در ابتدا به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و گونه‌ای از ماهی‌ها در تغییر ناگهانی مسیر آنها (برای یافتن غذا و حین فرار از دشمن) و تغییر شکل بهینه دسته، به کار گرفته شد. هر ذره برای حرکت در فضای جستجو از

در این مقاله، بهینه‌سازی تابع هدف مطرح شده در (۷) با رویکردی متفاوت از روش‌های پیشین صورت می‌پذیرد. به منظور حل مساله بهینه‌سازی، پارامترها و توابع مربوط به معادله (۷) می‌بایست بازنویسی گردد. زوایای کلیدزنی و اندازه ولتاژ منابع dc، متغیرهای مورد نظر بهینه‌سازی بوده و توابع مربوط به آنها، اندازه هارمونیک‌های اول تا ۴۱ام می‌باشد که مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردند.

با توجه به وجود چهار درجه آزادی در سیستم، چنانچه در حل مساله بهینه‌سازی، وزن یکسانی برای کاهش تک تک هارمونیک‌ها در نظر گرفته شود، اندازه مولفه اول به مقدار معین خود رسیده و اندازه هارمونیک‌های مرتبه‌های ۵، ۷ و ۱۱ به زیر حد مجاز خود (طبق استاندارد) می‌رسند. بدیهی است که اندازه هارمونیک‌های مرتبه ۱۳ به بالا، به تدریج با بالا رفتن مرتبه هارمونیک، از حدود مجاز خود تجاوز می‌نمایند. این امر استفاده از فیلتر مناسب جهت حذف هارمونیک‌های مذکور را اجتناب ناپذیر می‌سازد.

از طرفی پس از اجرای تکرارهای متعدد در حل مساله بهینه‌سازی، مشخص گردید که طیف هارمونیک‌های مرتبه‌های ۱۳ تا ۴۱، از منحنی نرمال پیروی می‌کند. این بدان معناست که محتوای کاهش یافته هارمونیک‌های مرتبه‌های ۱۳، ۱۷ و ۱۹ تقریباً اندازه‌ای برابر با محتوای کاهش یافته هارمونیک‌های ۳۱، ۳۵، ۳۷ و ۴۱ دارند. در مقابل، هارمونیک‌های مرتبه ۲۳، ۲۵ و ۲۹، فاصله زیادی از حدود مجاز خود داشته، دارای محتوای هارمونیک‌های قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سایر هارمونیک‌های ذکر شده می‌باشند. لذا در این مقاله، جهت تعدیل نمودن محتوای هارمونیک‌های مراتب ۲۳، ۲۵ و ۲۹ به نحوی که نیاز به استفاده از فیلترهای متعدد کاهش یابد، تغییرات زیر صورت پذیرفته است:

۱- اولویت اصلی در حل مساله (۷)، رسیدن اندازه مولفه اول (b_1) به مقدار معین $2 \times m_a \times V_{dc}$ می‌باشد. به بیانی دیگر، حد مجاز انحراف b_1 از مقدار اصلی آن، نسبت به روش‌های متعارف، پایین‌تر در نظر گرفته شده است.

۲- لحاظ نمودن عبارت مربوط به THD تا هارمونیک مرتبه ۴۱ و عبارت مربوط به E_i تا هارمونیک مرتبه ۲۵ در تابع هدف: عبارات مذکور با ضرایب وزنی متفاوتی که در ادامه اشاره خواهد شد در تابع هدف گنجانده می‌شوند. رساندن محتوای هارمونیک‌های مراتب فرد غیر مضرب ۳، از هارمونیک ۳۱ تا ۴۱ به زیر حد مجاز، صرفاً از طریق به حداقل رساندن THD امکانپذیر است و نیازی به در نظر گرفتن آنها در عبارت مربوط به E_i نمی‌باشد. لذا این امکان فراهم می‌آید که در به حداقل رساندن اندازه تک تک هارمونیک‌ها،

شکلهای (۴) و (۵) به ترتیب اندازه زوایا و دامنه های بهینه را نشان می دهد. ولتاژها در هر اندیسی نسبت به اندیس ماقبل یا مابعد تغییری حداکثر به میزان ۰,۰۵ پریونیت را دارا می باشند.

با توجه به تغییرات بار، لازم است که بهینه سازی برای نقاط مختلف انجام شود. اندیس مدولاسیون در این مقاله در محدوده ۰,۶ تا ۱,۲۱ و با گام ۰,۰۱ در نظر گرفته شده و حاشیه اطمینان حدود مجاز استاندارد (ρ) نیز ۸۰ درصد می باشد.

با توجه به شکل (۴)، مشاهده می گردد زوایای بهینه کلیدزنی در کل محدوده m_a دارای مقادیر تقریباً ثابتی می باشند که یکی از مزایای اصلی چنین راهبردی به شمار می آید. زیرا در این صورت، بخش کنترلی تولیدکننده پالسهای کلیدزنی دارای پیچیدگی کمتری می گردد و کنترل دامنه ولتاژ خروجی صرفاً از طریق تغییر ولتاژ منابع dc امکانپذیر خواهد بود. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، اندازه دامنه بهینه ولتاژ V_2 به ازای تمامی مقادیر اندیس مدولاسیون از V_1 کمتر می باشد. شکل (۶)، نمودار THD بر حسب m_a را نشان می دهد. با توجه به جدول ۱، حد مجاز استاندارد برای این شاخص برابر ۸ درصد است که مطابق شکل، با توجه به عدم کاهش هارمونیک های ۲۳ و ۲۵ به زیر حد مجاز، مقداری بین ۸ تا ۸,۱٪ را دارا می باشد. بدیهی است پس از به کارگیری فیلتر جهت کاهش دو هارمونیک مذکور این مقدار به زیر ۸ درصد کاهش می یابد.

شکل (۷)، اندازه مولفه اول ولتاژ خروجی (b_1) را بر حسب اندیس مدولاسیون دامنه نشان می دهد. همانطور که پیشتر بیان گشت، اولویت اصلی در حل مساله (۷)، رسیدن اندازه این مولفه به مقدار معین $2 \times m_a \times V_{dc}$ می باشد و حد مجاز انحراف از مقدار اصلی آن، نسبت به روشهای متعارف، پایین تر در نظر گرفته شده است. تحقق این امر در نمودار شکل (۷) به خوبی مشخص است.

شکلهای (۸) تا (۲۰)، محتوای هارمونیک های فرد غیر مضرب ۳ را از مرتبه ۵ تا ۴۱ نشان می دهد. با توجه به جدول ۱، به غیر از دو هارمونیک مرتبه ۲۳ و ۲۵، سایر هارمونیک ها به زیر حد مجاز استاندارد کاهش یافته اند. اندازه هارمونیک ها به مقدار مولفه اول پریونیت شده اند.

تجربیات خود و دیگر ذرات استفاده می کند (و به بهترین تجربیات شخصی و بهترین تجربه کل گروه متمایل است)، لذا گفته می شود که الگوریتمی بر پایه هوش جمعی است. اپراتورهای این الگوریتم که اپراتور سرعت $V(i)$ و حرکت $X(i)$ می باشند در تکرار t ام به فرم زیر بیان می شوند:

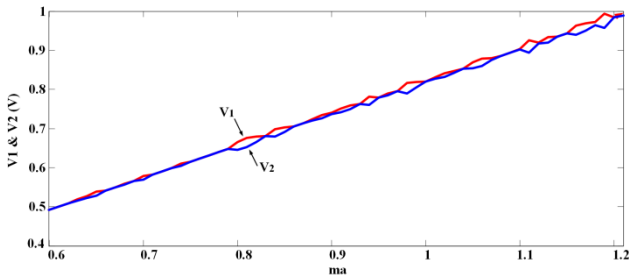
$$V(i) = W \times V(i) + C_1 \times r \times (P_{best}(i) - X(i)) + C_2 \times r \times (G_{best} - X(i)) \quad (18)$$

$$X(i) = X(i) + V(i)$$

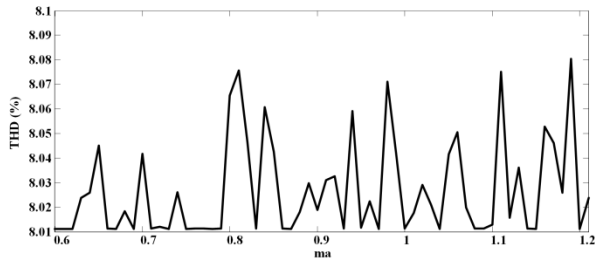
که در آن $V(i)$ و $X(i)$ سرعت و موقعیت i امین ذره در تکرار t می باشند. W ، وزن اینرسی و C_1 و C_2 ، ضرایب یادگیری شخصی و جمعی می باشند. $P_{best}(i)$ و G_{best} نیز موقعیت بهترین نقاط شخصی (برای هر ذره) و جمعی (برای همه ذرات) می باشد. می توان از نسخه های متفاوت PSO که حاصل تغییراتی همچون تغییر C_1 و C_2 (ضرایب یادگیری شخصی) به شکل های متفاوت خطی یا نمایی و ... در تکرارهای مختلف می باشد، استفاده نمود که آن را الگوریتم ازدحام ذرات با ضرایب شتاب متغیر با زمان می نامند؛ با این وجود، ضرایب نه چندان معمول ولی کارآمد $C_1=0.2$ و $C_2=0.4$ آن هم به صورت ثابت (و نه متغیر) برای حل مساله بهینه سازی در این مقاله بسیار مناسب هستند. همچنین در تکرارهای مختلف، تغییراتی در مقدار W به شکل اعمال ضریب میرایی وارد شده است. مقدار اولیه $W=1$ با ضریب میرایی $d=0.99$ در مساله در نظر گرفته شده است. از طرفی اعمال خاصیت جهش (به عنوان خاصیت مثبت از الگوریتم ژنتیک) بر الگوریتم PSO، آن را از به دام افتادن در بهینه های محلی تا حدود زیادی مصون خواهد کرد. به الگوریتم PSO که با جهش ژنتیکی ترکیب شده است، EPSO می گویند.

۴- نتایج شبیه سازی

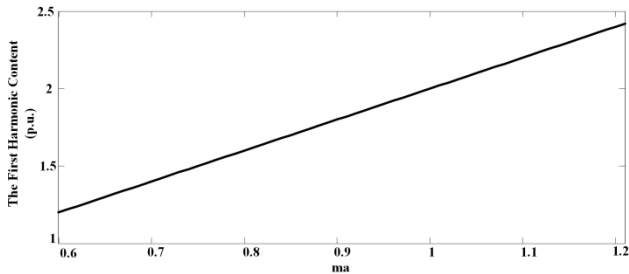
در این بخش نتایج شبیه سازی حاصل از اعمال روش SHM-PWM بر اینورتر پنج سطحی CHB نشان داده می شود. تابع هدف (۱۴) توسط الگوریتم EPSO و مطابق آنچه در بخش (۳) بیان گردید، بهینه گشته است. فلوچارت الگوریتم در شکل (۳) نشان داده شده است. شرایط مختلفی از جمله تعداد تکرار، تعداد ارزیابی تابع هدف، خطای حالت ماندگار در چند تکرار پشت سر هم و ... از جمله شرایط توقف الگوریتم های هوشمند بهینه سازی می باشد. در این مقاله از تعداد تکرار به عنوان شرط توقف استفاده شده است و تعداد ۱۲۵ تکرار برای الگوریتم لحاظ گشته است.



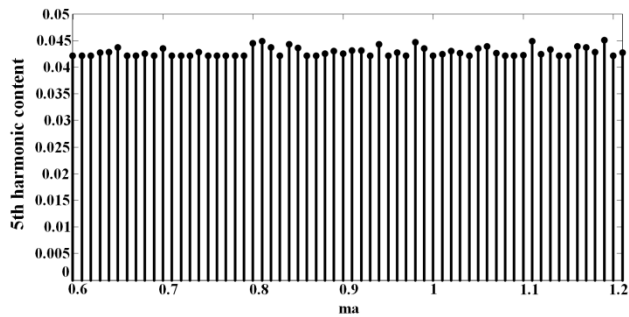
شکل ۵: دامنه‌های بهینه منابع ولتاژ



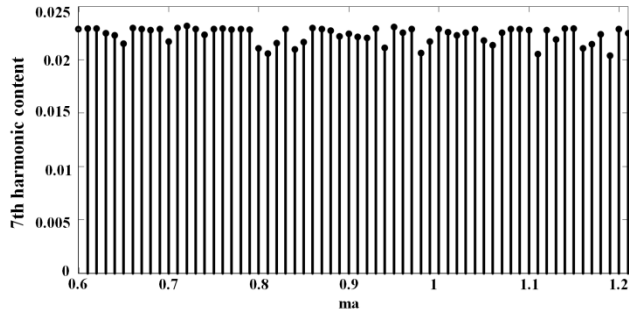
شکل ۶: نمودار THD بر حسب m_a



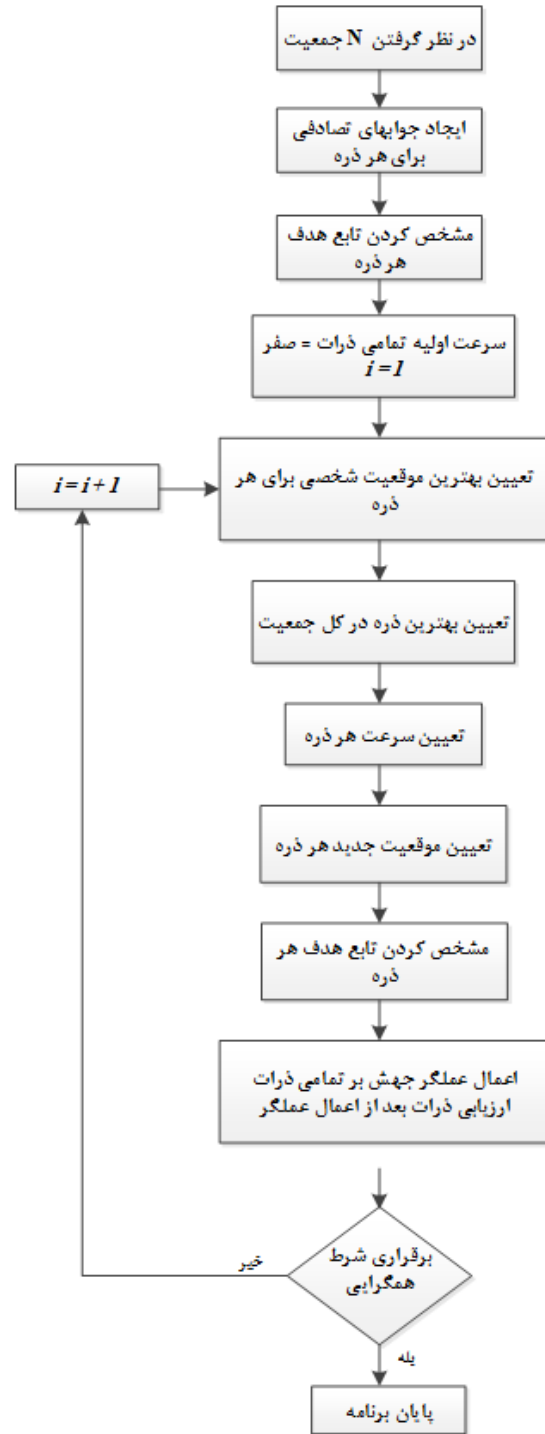
شکل ۷: اندازه مولفه اول ولتاژ خروجی (b_1) بر حسب m_a



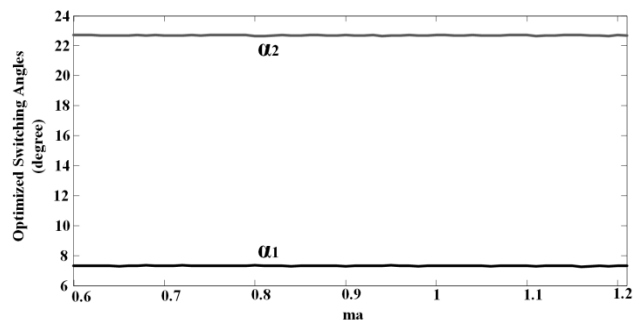
شکل ۸: محتوای هارمونیک پنجم (حد مجاز: ۶ درصد مولفه اول)



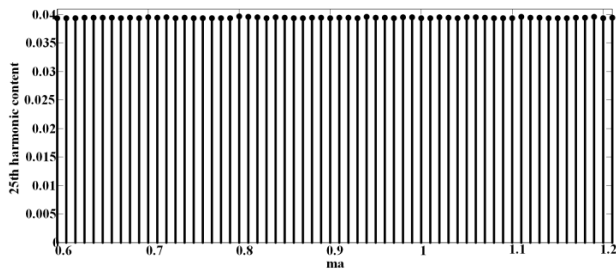
شکل ۹: محتوای هارمونیک هفتم (حد مجاز: ۵ درصد مولفه اول)



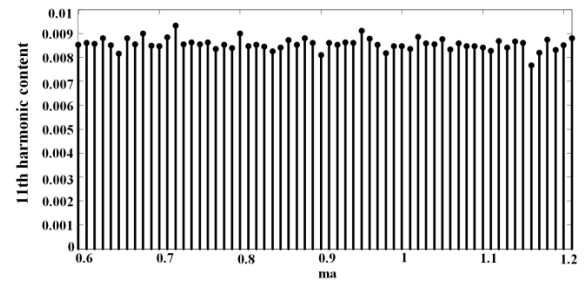
شکل ۳: فلوچارت الگوریتم EPSSO



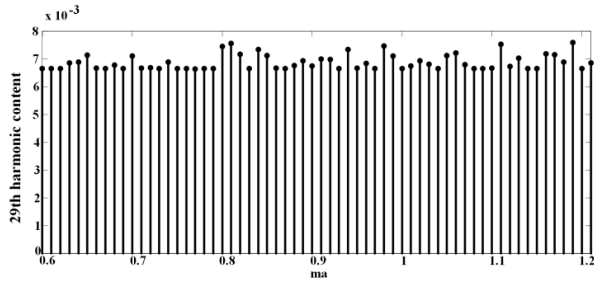
شکل ۴: زوایای بهینه کلیدزنی



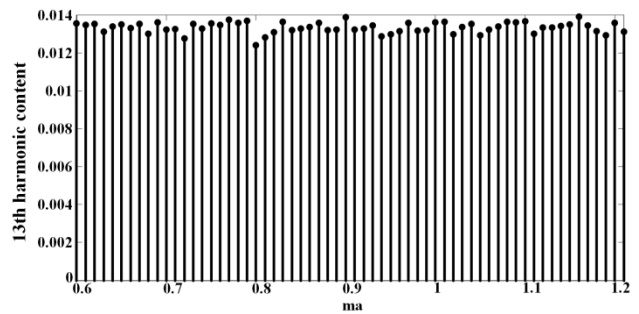
شکل ۱۵: محتوای هارمونیک بیست و پنجم (حد مجاز: ۱/۵ درصد مولفه اول)



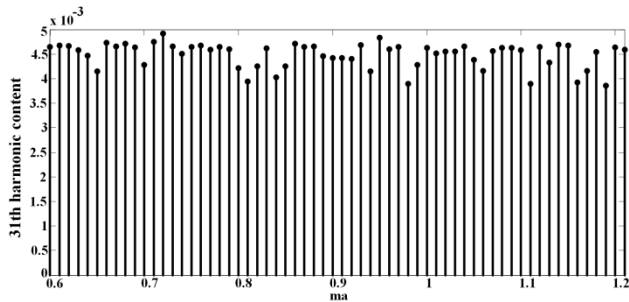
شکل ۱۰: محتوای هارمونیک یازدهم (حد مجاز: ۳/۵ درصد مولفه اول)



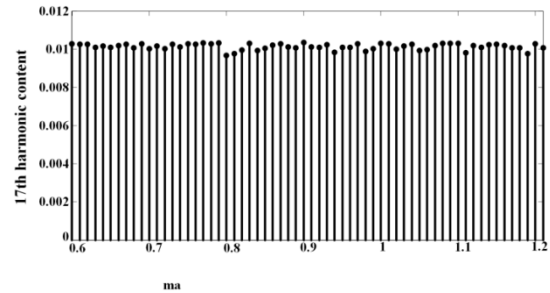
شکل ۱۶: محتوای هارمونیک بیست و نهم (حد مجاز: ۱/۳۲ درصد مولفه اول)



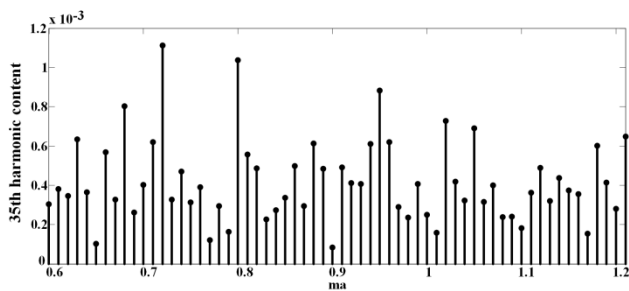
شکل ۱۱: محتوای هارمونیک سیزدهم (حد مجاز: ۳ درصد مولفه اول)



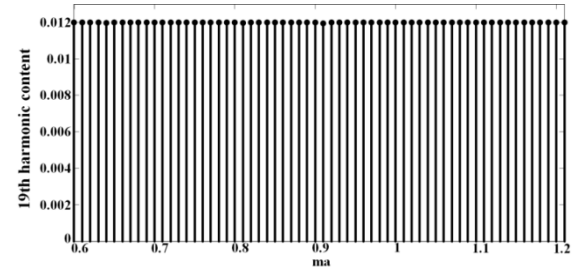
شکل ۱۷: محتوای هارمونیک سی و یکم (حد مجاز: ۱/۲۵ درصد مولفه اول)



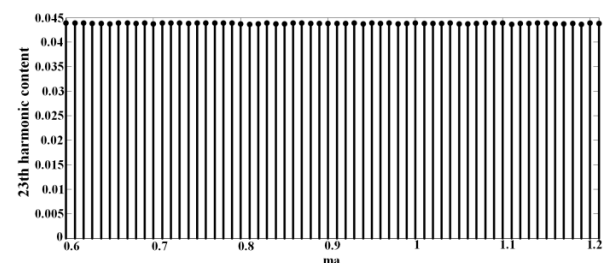
شکل ۱۲: محتوای هارمونیک هفدهم (حد مجاز: ۲ درصد مولفه اول)



شکل ۱۸: محتوای هارمونیک سی و پنجم (حد مجاز: ۱/۱۳ درصد مولفه اول)



شکل ۱۳: محتوای هارمونیک نوزدهم (حد مجاز: ۱/۵ درصد مولفه اول)



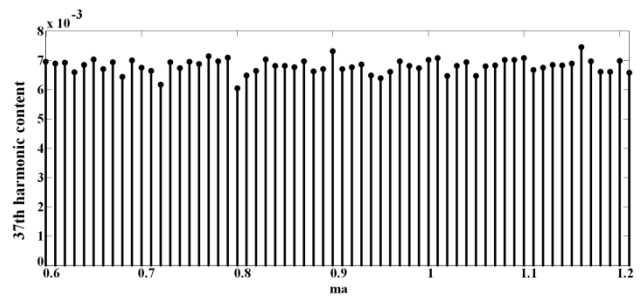
شکل ۱۴: محتوای هارمونیک بیست و سوم (حد مجاز: ۱/۵ درصد مولفه اول)

مقادیر حداکثر به دست آمده از تکنیک SHE-PWM نگاه داشته می‌شوند.

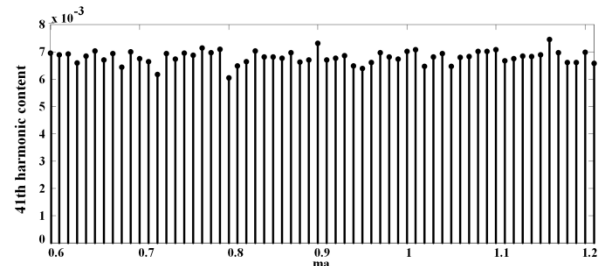
لذا مشاهده می‌گردد که با وجود ۷ درجه آزادی در سیستم، راهبرد پیشنهادی مرجع [۱۶] صرفاً قادر به کاهش هارمونیک‌ها تا مرتبه ۱۹ بوده و کاهش سایر هارمونیک‌ها به زیر حد مجاز، مستلزم استفاده از فیلتر می‌باشد. این در حالی است که در روش پیشنهادی این مقاله، صرفاً با وجود ۴ درجه آزادی، کلیه هارمونیک‌ها به غیر از مراتب ۲۳ و ۲۵ کاهش می‌یابند. جهت کاهش دو هارمونیک مذکور صرفاً به دو ناچ فیلتر نیاز می‌باشد. با این وجود، به منظور مقایسه دقیق‌تر، استراتژی‌ها و توابع هدف پیشنهادی در مرجع [۱۶] به اینورتر CHB پنج‌سطحی مورد استفاده در این مقاله (۴ درجه آزادی) اعمال و نتایج در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) با یکدیگر مقایسه گشته‌اند. نتایج مقایسه نشان‌دهنده برتری راهبرد پیشنهادی نسبت به هر دو استراتژی مرجع [۱۶] می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش کنترلی SHM-PWM بر اینورتر پنج‌سطحی CHB با هدف کاهش هارمونیک‌های فرد غیر مضرب سه ولتاژ خروجی از مرتبه ۵ تا مرتبه ۴۱ اعمال گشته است. پارامترهای تابع هدف و همچنین قیود به گونه‌ای تعریف گردیده‌اند که علیرغم وجود صرفاً چهار درجه آزادی در سیستم، تمامی هارمونیک‌ها به غیر از هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵، به زیر حد مجاز تعریف شده توسط استانداردهای شبکه کاهش یافته و بدین ترتیب نیاز به فیلتر خروجی به حداقل می‌رسد. اولویت اصلی در حل مساله بهینه سازی، رسیدن مولفه اول ولتاژ خروجی به مقداری معین بوده و سپس کاهش اندازه تک تک هارمونیک‌ها و همچنین THD در اولویت بعدی قرار می‌گیرند. تابع هدف مورد استفاده توسط الگوریتم EPSO بهینه گشته و نتایج شبیه سازی و همچنین مقایسه روش پیشنهادی و روش متعارف، نشان دهنده برتری روش پیشنهادی از نقطه نظر تعداد هارمونیک‌های کاهش یافته و به حداقل رسیدن نیاز به فیلترهای خروجی می‌باشد.



شکل ۱۹: محتوای هارمونیک سی و هفتم (حد مجاز: ۱/۱ درصد مولفه اول)

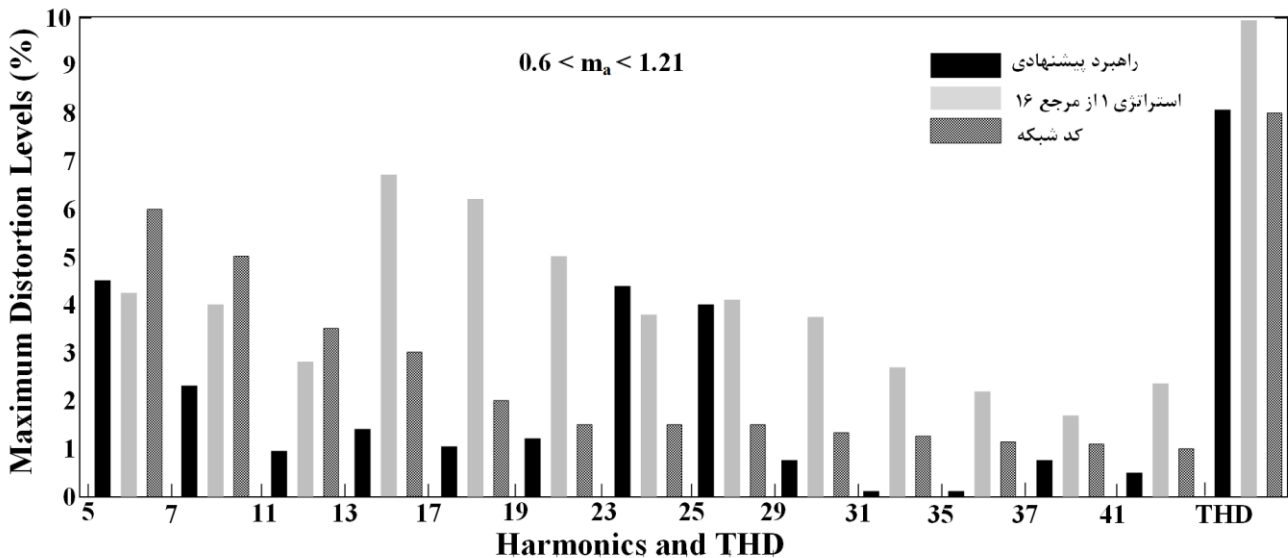


شکل ۲۰: محتوای هارمونیک چهل و یکم (حد مجاز: ۱ درصد مولفه اول)

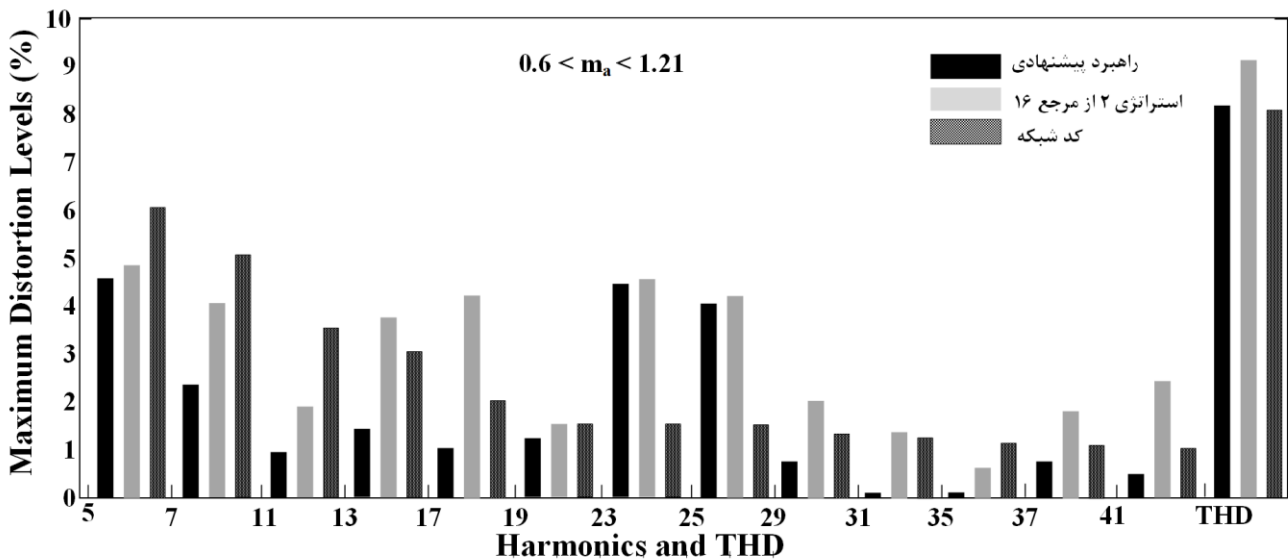
مرجع [۱۶] به منظور مقایسه روش پیشنهادی با روشهای متعارف انتخاب گشته است. در این مرجع، روش SHM-PWM بر اینورتر سه سطحی پل H با روش کلیدزنی تک قطبی و ۷ درجه آزادی اعمال گشته است. دو استراتژی جهت کاهش هارمونیک‌های انتخابی پیشنهاد شده است که به شرح زیر می‌باشند:

استراتژی ۱: تعداد محدودی از هارمونیک‌های مرتبه پایین، کدهای شبکه را بدون نیاز به فیلتر ارضا می‌نمایند. به بیانی دیگر، با وجود ۷ درجه آزادی، اندازه مولفه اول در مقداری معین تثبیت شده و ۶ هارمونیک دیگر (از مرتبه ۵ تا ۱۹) به زیر حد مجاز تعیین شده توسط استاندارد کاهش می‌یابند. سایر هارمونیک‌ها نیز مستقل از اینکه مرتبه پایین یا بالا باشند، تا حد امکان کاهش می‌یابند ولی قادر به رعایت استاندارد نمی‌باشند.

استراتژی ۲: همانند استراتژی ۱، تعداد محدودی از هارمونیک‌های مرتبه پایین (از مرتبه ۵ تا ۱۹)، کدهای شبکه را بدون نیاز به فیلتر ارضا می‌نمایند. سپس تمرکز اصلی در حل مساله بهینه سازی بر کاهش تا حد امکان هارمونیک‌های مراتب ۲۳ تا ۲۹ بوده و سایر هارمونیک‌های مراتب بالاتر نیز به زیر



شکل ۲۱: مقایسه راهبرد پیشنهادی و استراتژی اول مرجع [۱۶]، بدترین شرایط در محدوده $0.6 < m_a < 1.21$



شکل ۲۲: مقایسه راهبرد پیشنهادی و استراتژی دوم مرجع [۱۶]، بدترین شرایط در محدوده $0.6 < m_a < 1.21$

مراجع

- [4] A. R. Bakhshai, H. Jin, G. Joos, "reduction of harmonic concentration and acoustic noises using variable selective harmonic elimination technique", Proceedings of the IEEE-IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Vol. 1, Aug. 1996, pp.102 – 107.
- [5] H. Zhang, K. Liu, M. Braun, and C. C. Chan, "Selective Harmonic Controlling for Three-level High Power Active Front End Converter with Low Switching Frequency," Proceedings of the 5th International Power Electronics and Motion Control, Aug. 2006, Vol. 1, pp. 1–5.
- [6] J. Pontt, J. Rodriguez, and R. Huerta, "Mitigation of Non Eliminated Harmonics of SHEPWM Three-level Multi Pulse Three-phase Active Front end Converters with Low Switching Frequency for Meeting Standard IEEE- 519-92," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, no. 6, Nov. 2004, pp. 1594–1600.
- [1] W. Zhang, S. Qu, L. yang, W. Tong and H. Xu, " Research on Three-Phase Voltage-Source Selective Harmonic Elimination Inverter", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, China 2005.
- [2] J. Sun and I. Grotstollen, "Pulsewidth Modulation Based on Real-time Solution of Algebraic Harmonic Elimination Equations," Proceedings of 20th IEEE-IECON International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol. 1, 1994, pp. 79–84.
- [3] I. Khoukha, C. Hachemi and B. E. Madjid, "Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in the Nine Level Voltage Inverter", International Conference on Computer Engineering & Systems, Nov. 2007, pp. 387 – 392.

Leg Inverter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 11, pp. 7234-7242, Nov. 2016.

[19] D. Campos-Gaona, R. Peña-Alzola, J. Luis Monroy-Morales, M. Ordonez, O. Anaya-Lara, W. E. Leithead, "Fast Selective Harmonic Mitigation in Multifunctional Inverters Using Internal Model Controllers and Synchronous Reference Frames", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 8, pp. 6338-6349, Aug. 2017.

[20] A. Moeini, H. Zhao, Sh. Wang, "A Current-Reference-Based Selective Harmonic Current Mitigation PWM Technique to Improve the Performance of Cascaded H-Bridge Multilevel Active Rectifiers" Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 727-737, Jan. 2018

[21] M. Najjar, A. H. Moeini, M. K. Bakhshizadeh, F. Blaabjerg, Sh. 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, Volume 4, Issue 3, Sept. 2016, pp. 1107-1116.

[22] A. Moeini, H. Iman-Eini, M. Bakhshizadeh, "Selective harmonic mitigation-pulse-width modulation technique with variable DC link voltages in single and three-phase cascaded H-bridge inverters," IET Power Electronics, vol.7, no.4, pp.924-932, April 2014.

زیر نویس‌ها:

¹Selective harmonic elimination/mitigation-pulse width modulation

²Total harmonic distortion

³Particle swarm optimization

⁴Genetic Algorithm

⁵Pulse Amplitude Modulation

⁶Cascade H-bridge

⁷Enhanced particle swarm optimization

[7] A. K. Al-Othman, N. A. Ahmed, A. M. A. Kandari and H. K. Ebraheem, "Selective Harmonic Elimination of PWM AC/AC Voltage Controller Using Hybrid RGAPS Approach", International Journal of Electrical, Computer and systems engineering, Vol. 1, No.4, pp. 227-233.

[8] A. J. Watson, P. W. Wheeler and J. Clare, "A Complete Harmonic Elimination Approach to DC Link Voltage Balancing for a Cascaded Multilevel Rectifier", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No.6, Dec. 2007, pp. 2946-2953.

[9] M. S. A. Dahidah, V. G. Agelidis, "Non-Symmetrical Selective Harmonic Elimination PWM Techniques: The Unipolar Waveform", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No.6, Aug. 2007, pp. 1885-1891.

[10] H. R. Karshenas, H. A. Kojori and Sh. B. Dewan, "Generalized Techniques of Selective Harmonic Elimination and Current Control in Current Source Inverter/Converters", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 10, No.5, Sept. 1995, pp. 566-573.

[11] S. R. Bowes and S. Grewal, "Novel Space Vector Based Harmonic Elimination Inverter Control", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 11, No.3, Sept. 1999, pp. 1616-1622.

[12] L. R. L. Holdsworth and G.A. Putrus, "Dynamic Selective Harmonic Elimination of a Three-level Inverter Used for Static VAR Compensation", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 1, Jan. 2002, pp. 83-89.

[13] J. J. Guzman, J. R. Espinoza, "Optimized Use of Selective Harmonic Elimination Techniques for Three-Phase AC/DC Converters for High Power Applications", The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics society, Nov. 2004, pp. 2696-2701.

[14] V. G. Agelidis, A. Balouktsis and I. Balouktsis, "On Attaining Multiple Solutions of Selective Harmonic Elimination PWM Three-Level Waveforms Through Function Minimization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, March 2008, pp. 996-1004.

[15] Sahali, Y., Fella, M.K., "Application of the Optimal Minimization of the THD Technique to the Multilevel Symmetrical Inverters and Study of its Performance in Comparison with the Selective Harmonic Elimination Technique", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, May 2006, pp.1342 – 1348.

[16] J. Napoles, J. I. Leon, R. Portillo, L. G. Franquelo and M. A. Aguirre, "Selective Harmonic Mitigation Technique for High-Power Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2315-2323, Dec. 2010.

[17] M. Sharifzadeh, H. Vahedi, R. Portillo, L. Garcia Franquelo, K. Al-Haddad, "Selective Harmonic Mitigation Based Self-Elimination of Triplen Harmonics for Single-Phase Five-Level Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, 2018 (Early access).

[18] M. Sharifzadeh, H. Vahedi, R. Portillo, M. Khenar, A. Sheikholeslami, L. Garcia Franquelo, K. Al-Haddad, "Hybrid SHM-SHE Pulse-Amplitude Modulation for High-Power Four-