حذف هارمونيک هاي انتخابي مراتب بالا در مبدل هاي چندسطحي با استفاده از الگوريتم مهاجرت پرندگان

حسن تقي زاده[1] و مهرداد طرفدارحق[2*]
[1]دانش آموخته کارشناسي ارشد دانشکده مهندسي برق و کامپيوتر - دانشگاه تبريز
[2]دانشيار دانشکده مهندسي برق و کامپيوتر - دانشگاه تبريز
(تاريخ دريافت ۸۶/۲/۲۹ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۷/۳/۲۶ , تاريخ تصويب ۸۷/۱۱/۱۵)

چکيده

اين مقاله روش جديدي را براي پيدا کردن زواياي آتش در مبدل هاي چندسطحي منبع ولتاژ به منظور حذف هارمونيک هاي مراتب بالاي مشخص و کاهش مقدار اعوجاج کلي هارمونيک (THD) ولتاژ خروجي مبدل معرفي ميکند. شکل موج ولتاژ خروجي در مبدل هاي چندسطحي ميتواند به صورت پلکاني و يا به شکل مدولاسيون پهناي پالس باشد. براي افزايش درجهي آزادي به منظور حذف هارمونيک هاي بيشتر در اينورترهاي چندسطحي مي توان تعداد سطوح اينورتر را افزايش داد و يا از شکل موج مدولاسيون پهناي پالس که تعداد کليدزني ها بيش از يک بار در هر سطح ميباشد استفاده نمود. هر دو حالت منجر به پيچيدگي معادلات غيرجبري شده و حل آنها توسط روش هاي مرسوم حل عددي معادلات غيرخطي مانند روش نيوتن رافسون امکان پذير نميباشد. در اين مقاله الگوريتم مهاجرت پرندگان براي اولين بار به منظور محاسبهي زواياي آتش بهينهي شکل موج ولتاژ مدولاسيون پهناي پالس در اينورتر چندسطحي مورد استفاده قرار گرفته است. اين زوايا بايد طوري محاسبه شوند که دامنه ولتاژ فرکانس اصلي مورد نياز را توليد کرده و در عين حال هارمونيک هاي مراتب بالاتر ايجاد نشوند و يا مقدار اعوجاج هارمونيک کلي ولتاژ خروجي پائين باشد. نتايج تئوري و شبيهسازي براي اينورتر ۱۱ سطحي نشان دهنده کارائي بالاي الگوريتم معرفي شده در تعيين زواياي آتش مناسب جهت کاهش هارمونيک هاي مراتب بالا و توليد شکل موج با اعوجاج هارمونيک کلي بسيار پائين و نزديک به سينوسي مي باشد.

واژه هاي کليدي: اينورتر چندسطحي سري - الگوريتم مهاجرت پرندگان - حذف هارمونيک انتخابي - مدولاسيون پهناي پالس

مقدمه

اخيرا مبدل هاي چندسطحي براي کاربردهاي توان بالا بسيار مورد توجه قرار گرفتهاند [۲،۱]. ولتاژ مطلوب خروجي در اين مبدل ها از ترکيب چندين سطح ولتاژ *dc* به وجود مي آيد. با افزايش تعداد سطوح در اينورتر، شکل موج توليد شده به شکل موج سينوسي با اعوجاج هارمونيکي کم نزديک تر ميشود. اين ولتاژ در فرکانس کليدزني و تلفات کمتر و با سازگاري الکترومغناطيسي بيشتري نسبت به اينورترهاي مرسوم مدولاسيون پهناي پالس به وجود ميآيد. با افزايش تعداد منابع *dc*، اندازهي ولتاژ روي هر يک از کليدها کاهش يافته و بنابراين مقدار dv/dt نيز بر روي کليدها کم ميشود. ساختارهاي زيادي براي اينورترهاي چندسطحي در مقالات معرفي شده است. در ميان توپولوژيهاي مبدل هاي چندسطحي، ساختار اتصال سري پلهاي H شکل به دليل ساختار ماجولي و سادگي کنترل مورد توجه خاص ميباشد [۲،۱]. براي کنترل اينورترهاي چندسطحي و کاهش محتواي هارمونيکي شکل موج خروجي از روش هاي مدولاسيون مختلفي مانند مدولاسيون پهناي پالس سينوسي[1]، مدولاسيون پهناي پالس غير سينوسي[2]، مدولاسيون پهناي پالس بردار فضائي[3]، حذف هارمونيک انتخابي[4] [۳-۷] و حذف هارمونيک انتخابي مدولاسيون پهناي پالس[5] [۸] استفاده ميشود. در ميان روش هاي فوق، روش SHE و SHE-PWM از نظر تئوري ميتوانند شکل موج هاي با کيفيت بالاتر و با کمترين تعداد کليدزني در خروجي اينورتر توليد کنند. روش هاي مذکور هارمونيک هاي مراتب بالاي مشخص را حذف ميکنند و هم چنين اعوجاج هارمونيکي کلي کمتري نسبت به ساير روش هاي PWM دارند. در روش SHE، هر يک از کليدها تنها يک بار در هر سيکل کليدزني ميشوند و شکل موج ولتاژ خروجي مبدل به صورت پلکاني ميباشد. براي حذف هارمونيک هاي مراتب بالا براي شکل موج پلکاني تعداد هارمونيک هاي قابل حذف برابر s-1 است که s تعداد

* نويسنده مسئول : تلفن : ۳۳۹۳۷۳۴ - ۰۴۱۱ , فاکس : ۳۳۰۰۸۲۹ – ۰۴۱۱ , Email: tarafdar@tabrizu.ac.ir

منابع dc جداگانه در اينورتر مي‌باشد. براي افزايش درجه آزادي به منظور حذف هارمونيک هاي بيشتر، روش SHE-PWM در مرجع [۸] پيشنهاد شده است که در اين روش هر پل بيش از يک بار در هر ربع سيکل مي‌تواند کليدزني شود و تعداد هارمونيک هاي بيشتري نسبت به روش SHE قابل حذف مي‌باشد. مشکل اساسي در استفاده از روش هاي حذف هارمونيک انتخابي براي شکل موج- هاي پلکاني و PWM حل معادلات غيرجبري و محاسبه زواياي آتش مي باشد. روش هاي تکراري مانند روش نيوتن رافسون مي‌توانند به منظور حذف هارمونيک هاي مراتب بالا به معادلات غيرجبري که مشخص‌کننده محتواي هارمونيک ها مي‌باشند اعمال شوند. روش ديگر براي حل معادلات و حذف هارمونيک در مرجع [۹] پيشنهاد شده است. در اين روش معادلات غيرجبري به معادلات چند جمله‌اي براي حل به وسيله‌ي نرم افزارهاي رياضي (مثل Mathematica و Maple) با استفاده از روش تئوري منتجه[6] تبديل مي‌شوند. متاسفانه روش نيوتن رافسون براي پيدا کردن جواب نياز به حدس اوليه مناسب دارد و هنگامي که تعداد زواياي آتش با افزايش تعداد سطوح اينورتر و يا با استفاده از روش SHE-PWM افزايش يابد، حل معادلات بدون وجود حدس اوليه‌ي مناسب امکان پذير نمي‌باشد. روش تئوري منتجه نيز وقتي که تعداد زواياي آتش افزايش مي‌يابد منجر به چند جمله‌اي هاي با درجه بالا شده و حل اين چند جمله‌اي ها با استفاده از نرم‌افزارهاي جبري کنوني امکان پذير نمي‌باشد.

اخيرا تعيين زواياي کليدزني در مبدل هاي چند سطحي توسط الگوريتم هاي ژنتيکي در مرجع [۱۰] براي شکل موج پلکاني مبدل هاي ۷سطحي و ۱۱سطحي به انجام رسيده است. با اين وجود جواب هاي گزارش شده مخصوصا براي اينورتر۱۱ سطحي با توجه به مقادير هزينه‌ي نشانداده شده، از کيفيت خوبي برخوردار نبوده و به نظر مي‌رسد با افزايش تعداد زواياي کليدزني اين الگوريتم نيز قادر به محاسبه‌ي زواياي مطلوب نخواهد شد.

روش جديد حذف هارمونيک فعال[7] نيز در مرجع [۱۱] براي تعيين الگوي کليدزني مبدل هاي چندسطحي معرفي شده است. در اين روش ابتدا زواياي آتش براي شکل موج پلکاني براي حذف s-1 هارمونيک مرتبه‌ي پائين مشخص محاسبه مي‌شوند و سپس هارمونيک هاي باقي مانده مراتب بالاتر محاسبه شده و براي هر هارمونيک باقي مانده يک شکل موج PWM در خلاف آن و هم فرکانس با آن توليد شده و از شکل موج ولتاژ اصلي براي حذف اين هارمونيک کم مي‌شود. از مزاياي روش حذف هارمونيک فعال اين است که تعداد هارمونيک هاي قابل حذف با استفاده از اين روش بيشتر از s-1 مي‌باشد و با همان تعداد سطوح اعوجاج کلي هارمونيک خروجي نسبت به روش SHE براي شکل موج پلکاني کمتر خواهد بود. متاسفانه در اين روش براي حذف هر هارمونيک اضافي، تعداد کليدزني ها به تعداد مرتبه آن هارمونيک افزايش مي‌يابد و در نتيجه مجموع کل کليدزني ها با افزايش تعداد هارمونيک هاي حذف شده به شدت زياد مي‌شود. بنابراين در ميان روش هاي فوق، تکنيک SHE-PWM به شرطي که بتوان زواياي آتش را محاسبه کرد، داراي شکل موج خروجي با کيفيت بالاتر و با تعداد کليدزني هاي کمتر مي‌باشد.

در اين مقاله الگوريتم مهاجرت پرندگان که جزو الگوريتم هاي تکاملي مي‌باشد براي غلبه بر مشکلات محاسباتي زواياي آتش مناسب روش SHE و روش حذف SHE-PWM هنگامي که تعداد زوايا افزايش يافته و قابل محاسبه با روش هاي مرسوم نمي‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. الگوريتم مهاجرت پرندگان يک روش جستجوي تصادفي براي بهينه‌سازي مي‌باشد که مي‌تواند براي پيدا کردن حداقل توابع مورد استفاده قرار گيرد. اين الگوريتم بدليل سادگي اجرا، سرعت همگرائي بالا و هم چنين همگرائي به جواب با کيفيت بالا مشهور مي‌باشد [۱۲ و ۱۳]. اين الگوريتم با يک فرمول بندي ساده و بدون نياز به مشتقات تابع هزينه مي‌تواند براي حل معادلات غيرجبري و در نتيجه براي حذف هارمونيک‌هاي دلخواه و يا کاهش مقدار اعوجاج هارمونيک کلي ولتاژ خروجي اينورتر چندسطحي به کار گرفته شود. نتايج شبيه سازي براي اينورتر ۱۱ سطحي نشان دهنده کارائي بالاي روش پيشنهادي در محاسبه زواياي آتش بهينه براي کاهش دامنه‌ي هارمونيک هاي مراتب بالا و توليد شکل موج خروجي با مقدار اعوجاج هارمونيک کلي بسيار کم مي‌باشد و زماني که تعداد زواياي آتش با روش SHE-PWM افزايش يابد و قابل محاسبه با روش هاي مرسوم نباشد اين روش به نحو موثري مي‌تواند به کار گرفته شود. در مقايسه با ساير روش هاي PWM و هم چنين حذف هارمونيک فعال که اخيرا در مرجع [۱۱] معرفي شده است اين روش

دو مزيت اعوجاج هارمونيک کلي کمتر و تعداد کليدزني هاي کمتر را دارا مي‌باشد.

اينورتر چند سطحي سري

اينورترهاي چند سطحي سري شامل اتصال سري پلهاي H شکل مي‌باشند. هر يک از پل ها نياز به منبع dc جداگانه دارند که مي‌تواند شامل سلول هاي شيميائي، سلولهاي خورشيدي، باتري ها و خازن ها باشد به عنوان يک نمونه ساختار اينورتر ۱۱ سطحي سري تک فاز و شکل موج هاي خروجي در شکل (۱) نشان‌داده شده است. هر يک از پل ها مي‌توانند ولتاژهاي $-V_{dc}$ ، 0، $+V_{dc}$ را در خروجي خود توليد کنند که بستگي به وضعيت کليدهاي Q_1، Q_2، Q_3 و Q_4 دارد . با روشن کردن کليدهاي Q_1 و Q_4 ولتاژ خروجي سلول $+V_{dc}$ و با وصل کليدهاي Q_2 و Q_3 ولتاژ خروجي سلول $-V_{dc}$ و با روشن کردن کليدهاي Q_1 و Q_3 يا Q_2 و Q_4 ولتاژ خروجي صفر است. ولتاژ متناوب توليد شده توسط هر سلول به صورت سري با هم ديگر جمع مي‌شوند بدين معني که ولتاژ مطلوب خروجي اينورتر جمع ولتاژهاي سلول ها مي‌باشد. تعداد سطوح ولتاژ خروجي m در اينورتر چند سطحي برابر $m=2s+1$ است که s تعداد منابع dc جداگانه مي‌باشد. براي کاربردهاي سه فاز، ولتاژ خروجي اينورترها مي‌توانند به صورت ستاره يا مثلث به يکديگر متصل شوند.

حـذف هارمونيـک انتخـابي در اينـورتر چنـد سطحي

شکل موج پلکاني

براي توليد شکل موج پلکاني در اينورتر چند سطحي کليدزني المان هاي اکتيو در فرکانس اصلي انجام مي-گيرد و شکل موج خروجي هر يک از پل ها همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است به صورت مربعي مي-باشد. تعداد هارمونيک هاي قابل حذف براي شکل موج پلکاني برابر s-1 است که s تعداد منابع dc جداگانه در اينورتر مي‌باشد. اگر ولتاژ dc هر يک از سلول ها برابر V_{dc} باشد در آن صورت بسط سري فوريه‌ي شکل موج پلکاني به صورت زير خواهد بود.

$$V(\omega t)=\sum_{n=1,3,5,...}^{\infty}\frac{4V_{dc}}{n\pi}(k_1\cos(n\theta_1)+k_2\cos(n\theta_2)+k_3\cos(n\theta_3)+...+k_s\cos(n\theta_s))\sin(n\omega t) \quad (۱)$$

براي کنترل بهينه اينورتر زواياي θ_1، θ_2، ...θ_s بايد طوري تعيين شوند که دامنه هارمونيک اصلي حفظ شده و هارمونيک هاي مراتب بالاي مشخص ايجاد نشوند. براي مثال در اينورتر ۱۱سطحي زواياي آتش بايد دسته معادلات (۲) را ارضا کنند و هارمونيک هاي پنجم، هفتم، يازدهم و سيزدهم قابل حذف مي‌باشند. در اين رابطه $M=V_1/sV_{dc}$ و V_1 دامنه ولتاژ هارمونيک اول است.

معمولاً زواياي کليدزني محاسبه شده در يک جدول مراجعه‌اي قرار داده مي‌شوند و مدار کنترلي اينورتر بسته به دامنه‌ي فرکانس اصلي خواسته شده، زواياي کليدزني مربوطه را از اين جدول فراخواني مي‌کند. پروسه‌ي محاسبه‌ي زواياي کليدزني يک پروسه‌ي آف-لاين بوده و بعد از انجام اين مرحله اين زوايا در داخل يک حافظه براي استفاده‌ي آن-لاين ذخيره مي‌شوند.

شکل موج مدولاسيون پهناي پالس

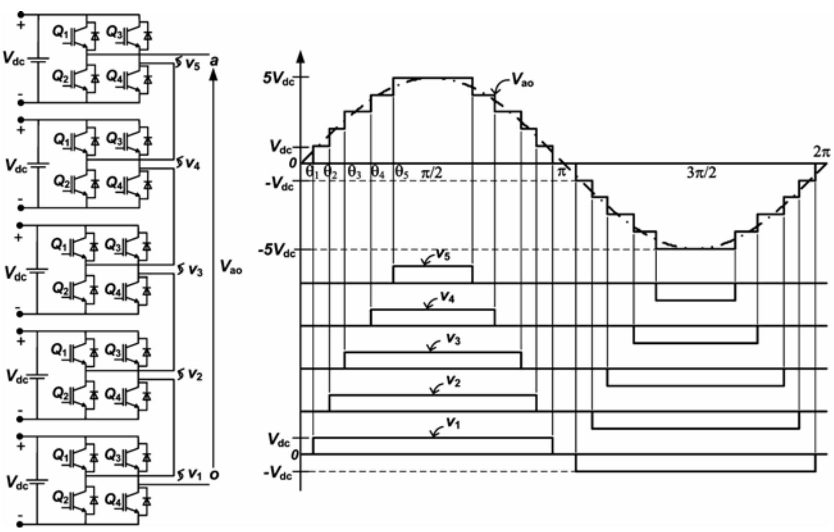
روش SHE-PWM براي اينورتر چندسطحي يکي از تئوري هاي قدرتمند براي حذف هارمونيک هاي مراتب بالا با کمترين تعداد کليدزني و توليد شکل موج با کيفيت بالا در مقايسه با ساير روش هاي PWM مي‌باشد. در اين روش بر خلاف روش SHE براي شکل موج پلکاني، فرکانس کليدزني k برابر فرکانس اصلي بوده و شکل موج خروجي هر يک از پل ها به شکل PWM است. شکل موج خروجي براي اينورتر ۱۱ سطحي زمانيکه فرکانس کليدزني ۳ برابر فرکانس اصلي در نظر گرفته شود (k=3) در شکل (۲) نشان‌داده شده است. تعداد هارمونيک هاي قابل حذف با استفاده از اين روش برابر ks-1 مي‌باشد که k نسبت فرکانس کليدزني به فرکانس اصلي بوده و s تعداد منابع dc جداگانه در اينورتر مي‌باشد. براي مثال براي شکل موج نشانداده شده در شکل (۲) پانزده درجه آزادي داريم و تعداد هارمونيک هاي قابل حذف از نظر تئوري برابر با ۱۴ مي‌باشد. بسط سري فوريه شکل موج خروجي توليد شده با اين روش به صورت زير است.

$$V(\omega t)=\sum_{n=1,3,5,...}^{\infty}\frac{4V_{dc}}{n\pi}(\cos(n\theta_1)\pm\cos(n\theta_2)\pm\cos(n\theta_3)\pm...\pm\cos(n\theta_{ks}))\sin(n\omega t) \quad (۳)$$

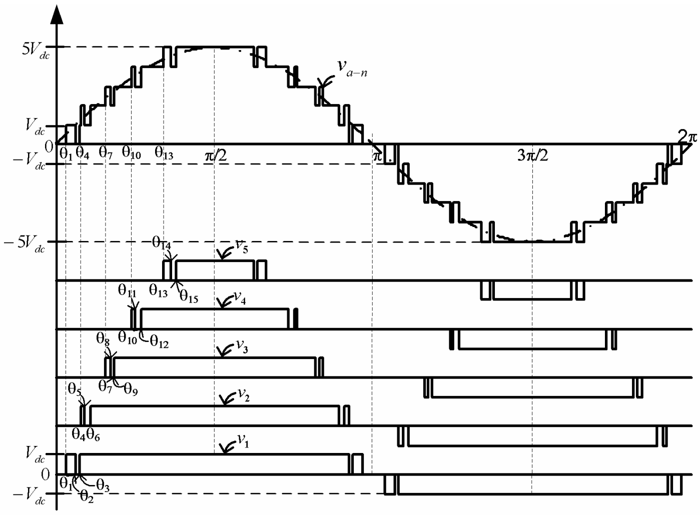
زواياي آتش θ_1 تا θ_{ks} بايد شرط زير را ارضاء کنند:

$$0<\theta_1<\theta_2<...<\theta_{ks}<\pi/2$$

در معادله (۳)، علامت هاي مثبـت بيـانگر لبـه‌هـاي بالارونده و علامت هاي منفي بيانگر لبه‌هاي پائين‌رونده‌ي



شكل ١ : ساختار اينوتر چندسطحي سري تكفاز و شكل موج خروجي پلكاني.



شكل ٢ : شكل موج خروجي مبدل با استفاده از روش مدولاسيون **SHE-PWM**.

شكل موج خروجـي مـي‌باشـند. تعـداد درجـات آزادي در شكل موج مدولاسيون پهنـاي پـالس k برابـر شـكل مـوج پلكاني بوده و در نتيجه تعداد هارمونيک هاي بيشـتري در اين حالت قابل حذف مـي‌باشـند. هـدف محاسـبه زوايـاي آتش نامعلوم $\theta_{ks},...,\theta_2,\theta_1$ است بـه طـوري كـه دامنـه‌ي هارمونيـــک اول برابـــر بـــا مقـــدار دلخـــواه V_f بـــوده و هارمونيک هاي مراتب بالاي مشخصي توليد نشوند. چنـان چه كاربردهاي سيستم هاي قدرت سه فاز مورد نظر باشـد هارمونيک هاي مضارب سه نيز در ولتاژ فاز نيازي به حذف ندارند زيرا كه اين هارمونيک هـا خـود بـه خـود در ولتـاژ خط-خط حـذف مـي شـوند. بـا حـل ks دسـته معـادلات غيرجبري (۴) مي‌توان ks-1 هارمونيک دلخواه مرتبه‌ي بالا را به شرطي كـه دامنـه‌ي هارمونيـک اول برابـر بـا مقـدار مشخصي باشـد حـذف كـرد. هنگـامي كـه ks فـرد باشـد هارمونيک هاي فرد غير مضـرب ۳ تـا مرتبـه $3ks$-2 قابـل حذف هستند و زماني كه ks زوج باشد هارمونيک هاي تـا مرتبه $3ks$-1 قابل حذف مي‌باشند.

$$\begin{cases}\cos(\theta_1)\pm\cos(\theta_2)\pm...\pm\cos(\theta_{ks-1})\pm\cos(\theta_{ks})=(s\pi/4)M\\ \cos(5\theta_1)\pm\cos(5\theta_2)\pm...\pm\cos(5\theta_{ks-1})\pm\cos(5\theta_{ks})=0\\ \cos(7\theta_1)\pm\cos(7\theta_2)\pm...\pm\cos(7\theta_{ks-1})\pm\cos(7\theta_{ks})=0\\ ...\\ \cos((3ks-2)\theta_1)\pm\cos((3ks-2)\theta_2)\pm...\pm\cos((3ks-2)\theta_{ks})=0\end{cases} \quad (۴)$$

الگوريتم مهاجرت پرندگان

الگوريتم مهاجرت پرندگان در سال ۱۹۹۵ توسط كندي و ابرهارت معرفي شده است [۱۱]. اين الگوريتم در اصل از رفتار اجتماعي پرندگان براي جستجوي غذا الهام گرفته شده است و جزو الگوريتم هاي تكاملي مبتني بر جمعيت است. در فرمول بندي الگوريتم مهاجرت پرندگان

هر ذره به عنوان یک پتانسیل براي راه حل مسئله در فضاي m بعدي با حافظه‌اي از بهترين موقعيت قبلي خود و بهترين موقعيت در ميان همه ذرات، و هم چنين مقدار سرعت تعريف مي‌شود. ذرات به تدريج موقعيت خود را در فضاي جستجوي چندبعدي تا زماني که با يکي از معيارهاي توقف الگوريتم برخورد کنند تغيير مي‌دهند اين معيارها مي‌توانند شامل رسيدن به حالت سکون يا حالت بهينه و يا اتمام زمان محاسباتي و هم چنين تعداد تکرارهاي مشخص در الگوريتم باشند. از ويژگي‌هاي جالب اين الگوريتم سادگي اجرا، همگرائي سريع و نداشتن نياز به اطلاعات گراديان تابع هدف مي‌باشد. مثل ساير الگوريتم‌هاي مبتني بر جمعيت، الگوريتم در ابتدا با یک جمعيت اوليه تصادفي شامل n ذره در فضاي جستجوي چندبعدي شروع مي‌شود. در هر تکرار مقدار سرعت ها و همه‌ي موقعيت ها به روز مي‌شوند. براي هر ذره i، بردار سرعت آن $\vec{v}_i$ با توجه به رابطه (۵) به روز مي شود. ضريب اينرسي $\omega > 0$ تاثير بردار سرعت قبلي را در سرعت کنوني ذره کنترل مي‌کند موقعيت کنوني ذره با $\vec{x}_i$ نشان‌داده مي‌شود. ضرائب c_1 و c_2 ثابت‌هاي شتاب ناميده مي‌شوند و تعيين مي‌کنند که یک ذره در هر تکرار تا چه فاصله‌اي حرکت مي‌کند. پارامتر $c_1 > 0$ تاثير بهترين موقعيت شخصي $\vec{y}_i$، يعني موقعيتي که ذره کمترين مقدار تابع را تا به حال به دست آورده است با فرض اين که حداقل-سازي تابع هدف مورد نظر باشد را کنترل مي‌کند. پارامتر $c_2 > 0$ تعيين کننده تاثير بهترين موقعيت سراسري $\hat{\vec{y}}$ مي‌باشد که تاکنون توسط هر یک از ذرات در همسايگي ذره‌ي i پيدا شده است. معمولا مقادير c_1 و c_2 يکسان در نظر گرفته مي‌شوند و مقادير آنها به طور معمول به مقدار ۲ تنظيم مي‌شود. مقادير r_1 و r_2 اعداد تصادفي با توزيع يکنواخت در بازه‌ي (۰،۱) مي‌باشند که براي هر ذره در هر تکرار توليد مي‌شوند.

بعد از اين که سرعت تمام ذرات به‌روز شد، ذرات با سرعت جديد خود به موقعيت جديد با استفاده از رابطه (۶) حرکت مي‌کنند.

$$\vec{v}_i(t+1)=\omega.\vec{v}_i(t)+c_1.r_1.(\vec{y}_i-\vec{x}_i)+c_2.r_2.(\hat{\vec{y}}-\vec{x}_i) \quad (۵)$$

$$\vec{x}_i(t+1)=\vec{x}_i(t)+\vec{v}_i(t+1) \quad (۶)$$

سپس، براي هر ذره i تابع هدف f در موقعيت جديد خود ارزيابي مي‌شود و بهترين موقعيت شخصي $\vec{y}_i$ با توجه به رابطه (۷) و بهترين موقعيت سراسري $\hat{\vec{y}}$ با استفاده از رابطه (۸) به روز مي‌شوند.

$$\vec{y}_i(t+1)=\begin{cases}\vec{y}_i(t) & if\ f(\vec{y}_i(t))\le f(\vec{x}_i(t+1))\\ \vec{x}_i(t+1) & if\ f(\vec{y}_i(t))> f(\vec{x}_i(t+1))\end{cases} \quad (۷)$$

$$\hat{\vec{y}}(t)\in\{\vec{y}_1(t),\vec{y}_2(t),...,\vec{y}_m(t)\}\mid f(\hat{\vec{y}}(t))= \min\{f(\vec{y}_1(t)),f(\vec{y}_2(t)),...,f(\vec{y}_m(t))\} \quad (۸)$$

مقدار سرعت $\vec{v}_i$ (بردار سرعت) در هر بعدي به بازه $[-V_{\max},+V_{\max}]$ محدود مي‌شود تا احتمال ترك فضاي جستجو توسط ذره را کم کند که $V_{\max}=\lambda(x_{\min}-x_{\max})$ و λ یک ضريب تناسبي مي‌باشد ضريب اينرسي در رابطه (۵) براي کنترل رفتار همگرايي الگوريتم به کار مي‌رود. معمولا در هنگام اجراي الگوريتم مقادير کم ω منجر به همگرائي سريع در یک مکان نيمه بهينه مي‌شوند در حالي که مقادير خيلي زياد احتمالاً از همگرايي جلوگيري کنند. معمولاً در اجراي الگوريتم مقدار ω در طي يادگيري تنظيم مي‌شود و به صورت خطي از يك تا مقادير نزديک به صفر طبق رابطه (۹) کاهش مي‌يابد.

$$\omega=\omega_{\max}-\frac{\omega_{\max}-\omega_{\min}}{iter_{\max}}.iter \quad (۹)$$

که $iter_{\max}$ ماکزيمم شماره تکرار است و $iter$ شماره تکرار کنوني مي‌باشد.

فرمولبندي مسئله‌ي کاهش هارمونيک در اينورترهاي چندسطحي توسط الگوريتم مهاجرت پرندگان

تابع هزينه براي کاهش محتواي هارمونيکي ولتاژ خروجي اينورتر مي‌تواند به دو شکل زير تعريف شود:

کاهش دامنه هارمونيک هاي مراتب بالاي دلخواه

زواياي آتش $\theta_1,\theta_2,...,\theta_{ks}$ در اينورتر چندسطحي براي شکل موج مدولاسيون پهناي پالس مي‌توانند طوري محاسبه شوند که دسته معادلات (۴) را ارضاء کنند که در اين صورت هارمونيک هاي فرد غير مضرب ۳ تا مرتبه $3ks$-2 زماني که مقدار ks فرد باشد و تا مرتبه $3ks$-1 زمانيکه مقدار ks عددي زوج باشد قابل حذف مي‌باشند. تابع هزينه براي دست يابي به اين هدف مي‌تواند به صورت رابطه (۱۰) که در زير صفحه نشان داده شده است تعريف شود. زماني که k=1 باشد، يعني فرکانس کليدزني برابر فرکانس اصلي در نظر گرفته شود شکل موج خروجي به صورت پلکاني مي‌باشد. بنابراين تابع فوق هم چنين مي-

تواند براي شكل موج پلكاني با جاگذاري k=1 به كار گرفته شود.

$$f(\theta_1,\theta_2,...,\theta_{ks})=100\times[|M-\frac{|V_1|}{sV_{dc}}|+(\frac{|V_5|+|V_7|+...+|V_{3ks-2\ or\ 3ks-1}|}{sV_{dc}})] \qquad (۱۰)$$

$$f(\theta_1,\theta_2,...,\theta_{ks})=100\times[|M-\frac{|V_1|}{sV_{dc}}|+(\frac{|V_5|+|V_7|+|V_{11}|+...+|V_{49}|}{sV_{dc}})] \qquad (۱۱)$$

كاهش مقدار اعوجاج هارمونيكي كلي ولتاژ خروجي اينورتر

روش ديگر براي كاهش محتواي هارمونيكي مي‌تواند حداقل كردن مقدار اعوجاج هارمونيک كلي ولتاژ خروجي اينورتر در نظر گرفته شود. در اين مقاله براي محاسبه اعوجاج هارمونيک كلي، هارمونيک هاي تا مرتبه‌ي ۵۰ در نظر گرفته شده است. بنابراين تابع هدف بدين منظور مي‌تواند به صورتي كه در رابطه (۱۱) در زير صفحه براي شكل موج مدولاسيون پهناي پالس نشانداده شده است بيان شود و مشخص است كه براي شكل موج پلكاني با جا گذاري k برابر يک مي‌توان از اين رابطه استفاده كرد.

فرمولبندي مسئله

هدف مينيمم‌سازي تابع

$$f(\theta_1,\theta_2,...,\theta_{ks}) \qquad (۱۲)$$

به شرط

$$0<\theta_1<\theta_2<...<\theta_{ks}<\pi/2 \qquad (۱۳)$$

كه s نشان دهنده تعداد منابع dc جداگانه در اينورتر بوده و k نسبت فركانس سوئيچينگ به فركانس اصلي مي‌باشد.

ترتيب اجراي الگوريتم پيشنهادي به صورت زير است:

۱) مقداردهي اوليه: شمارنده‌ي زمان را به صفر تنظيم كرده و جمعيت اوليه متشكل از n ذره بصورت تصادفي به شكل زير توليد كنيد. براي هر ذره‌ي i بردار موقعيت $\vec{x}_i(0)$ و بردار سرعت $\vec{v}_i(0)$ را مقداردهي اوليه كنيد.

مقدار بردار $\vec{x}_i(0)$ در بعد kام با انتخاب تصادفي يک مقدار با توزيع يكنواخت در بازه $[x_{kmin},x_{kmax}]$ كه در اين جا برابر $[0,\pi/2]$ مي‌باشد توليد مي‌شود. به طور مشابه مقدار بردار سرعت در بعد kام با انتخاب تصادفي يک مقدار با توزيع يک نواخت در بازه‌ي $[-V_{max},+V_{max}]$ توليد مي‌شود. شايستگي هر ذره در جمعيت اوليه با تابع f ارزيابي مي‌شود. بهترين موقعيت شخصي ذرات را به صورت $\vec{y}_i(0)=\vec{x}_i(0)$ براي هر يک از ذرات تنظيم كنيد. بهترين موقعيت سراسري $\hat{\vec{y}}(0)$ با استفاده از رابطه زير به دست مي‌آيد كه مرتبط با ذره‌اي است كه بهترين مقدار شايستگي را در ميان بهترين موقعيت هاي شخصي $\vec{y}_i(0)$ دارد.

$$\hat{\vec{y}}(0)\in\{\vec{y}_1(0),\vec{y}_2(0),...,\vec{y}_m(0)\}\,|\,f(\hat{\vec{y}}(t))=\min\{f(\vec{y}_1(0)),f(\vec{y}_2(0)),...,f(\vec{y}_m(0))\} \qquad (۱۴)$$

۲) شمارنده‌ي زمان را به روز كنيد. يعني: $t=t+1$

۳) ضريب اينرسي را با استفاده از رابطه‌ي (۹) به‌روز كنيد.

۴) سرعت ذرات را با استفاده از رابطه (۵) به‌روز كنيد و اگر سرعت ذره‌اي در هر يک از ابعاد از محدوده‌اش تجاوز كند مقدار سرعت را در آن بعد به مقدار مرزي تنظيم كنيد.

۵) موقيت ذرات را با استفاده از رابطه (۶) به روز كنيد. اگر موقعيت ذره‌اي در هر يک از ابعاد از محدوده‌اش تجاوز كند، مقدار موقعيت ذره در آن بعد به مقدار مرزي تنظيم مي‌شود.

۶) مقدار شايستگي هر يک از ذرات را با استفاده از تابع f به دست آوريد.

۷) بهترين موقعيت شخصي هر يک از ذرات را با استفاده از رابطه (۷) به روز كنيد.

۸) بهترين موقعيت سراسري را با استفاده از رابطه (۸) به روز كنيد.

۹) اگر يكي از معيارهاي توقف الگوريتم ارضا شود به مرحله‌ي ۱۰ برويد در غير اين صورت به مرحله‌ي ۲ برگرديد.

۱۰) پايان

نتايج محاسباتي و مقايسه

در اين بخش نتايج حاصل از محاسبه زواياي آتش با استفاده از روش پيشنهادي براي شكل موج هاي پلكاني و هم چنين شكل موج مدولاسيون پهناي پالس با فركانس-

هاي كليدزني مختلف براي اينورتر ۱۱ سطحي نشانداده شده است. محاسبه زواياي آتش توسط الگوريتم پيشنهادي با استفاده از برنامه‌نويسي در نرم‌افزار *MATLAB* انجام گرفته است.

در حالت اول زواياي آتش به منظور حذف هارمونيک-هاي مراتب پائين شكل موج پلكاني با استفاده از الگوريتم پيشنهادي محاسبه شده است. براي شكل موج پلكاني در اينورتر ۱۱ سطحي ۵ درجه آزادي داريم و مي‌توان ۴ هارمونيک را در شكل موج ولتاژ خروجي حذف كرد. بنابراين تابع هدف براي حذف هارمونيک هاي غالب مراتب پنجم، هفتم، يازدهم و سيزدهم با توجه به رابطه‌ي (۱۰) به صورت زير مي‌باشد.

$$f(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5) = 100\times[|\,M-\frac{|V_1|}{5V_{dc}}\,|+(\frac{|V_5|+|V_7|+|V_{11}|+|V_{13}|}{5V_{dc}})]$$

(۱۵)

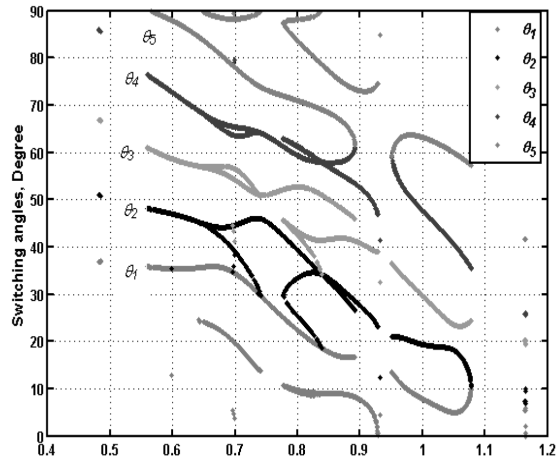
با توجه به تابع هزينه‌ي فوق و با استفاده از الگوريتم پيشنهادي براي حل زوايا جواب ها براي زواياي آتش نسبت به شاخص مدولاسيون كه به طور گسسته با پله-هاي ۰/۰۰۰۵ به دست آمده‌اند در شكل (۳-الف) نشان داده شده است. تنها جواب هائي كه مقدار تابع هزينه آنها كمتر از ۰/۰۱ باشند در نظر گرفته شده‌اند. مقدار تابع هزينه متناظر در شكل (۳-ب) و هم چنين مقدار اعوجاج هارمونيک كلي خروجي در شكل (۳-ج) نشانداده شده است. نتايج نشان داده شده در شكل (۳الف) براي زواياي كليدزني، دقيقا مشابه با نتايج به دست آمده از روش هاي حل عددي گزارش شده در مقالات [۹] و [۱۱] بوده و صحت و كيفيت جواب هاي به دست آمده از اين روش را تاييد مي‌كند.

همان طوركه در شكل (۳-الف) ديده مي‌شود در بعضي از بازه‌ها جواب وجود ندارد و در برخي ديگر چندين جواب موجود است كه روش پيشنهادي قادر به محاسبه همه‌ي آنها مي‌باشد. با توجه به تابع هزينه‌ي متناظر كه در شكل (۳-ب) نشان‌داده شده است، ديده مي‌شود كه مقدار تابع هزينه در بيشتر شاخص‌هاي مدولاسيون تقريبا نزديک به صفر است. بنابراين اين روش به طور موثري مي‌تواند براي حذف هارمونيک هاي مراتب پائين به كار گرفته شود. هم چنين مقدار اعوجاج هارمونيكي كل در شكل (۳-ج) نشان داده شده است و بنابراين در بازه‌هائي كه بيش از يک جواب موجود است مي‌توان جوابي را كه داراي اعوجاج هارمونيک كلي كمتري است انتخاب كرد.

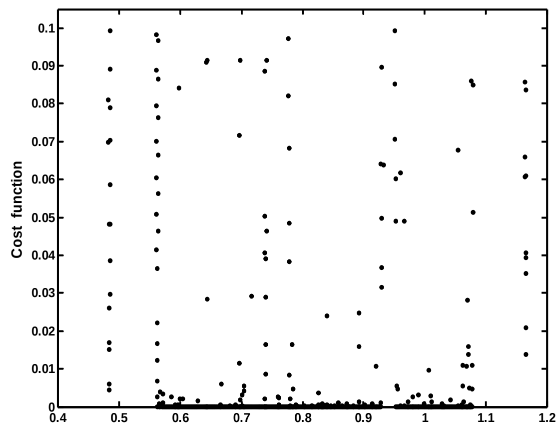
در حالت دوم شكل موج خروجي را به صورت مدولاسيون پهناي پالس در نظر مي‌گيريم و هم چنين فركانس كليدزني سه برابر فركانس اصلي در نظر گرفته شده است. در اين حالت هدف تعيين زواياي آتش مي‌باشد به‌نحوي كه مقدار اعوجاج هارمونيک كلي ولتاژ خروجي حداقل شود. تابع هدف براي اين منظور با توجه به رابطه (۱۱) به صورت زير براي k=3 نتيجه مي‌شود.

$$f(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_{15}) = 100\times[|\,M-\frac{|V_1|}{5V_{dc}}\,|+(\frac{|V_5|+|V_7|+|V_{11}|+\ldots|V_{49}|}{5V_{dc}})]$$

(۱۶)

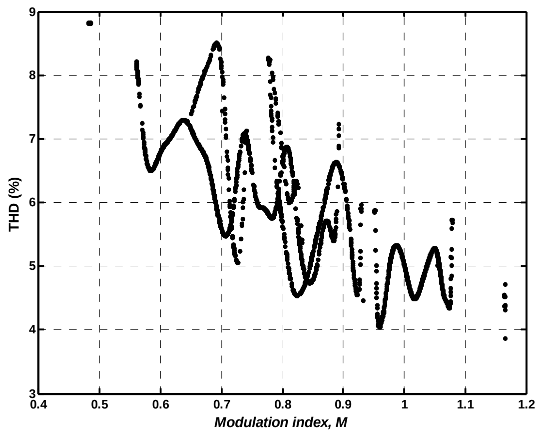


الف



ب

شكل ۳ - الف: حل زواياي آتش $\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_5$ ب) مقدار تابع هزينه متناظر ج) مقدار **THD** نسبت به شاخص مدولاسيون.



ادامه شکل ۳ - الف: حل زواياي آتش $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_5$ ب) مقدار تابع هزينه متناظر ج) مقدار **THD** نسبت به شاخص مدولاسيون.

هدف حداقل کردن تابع فوق مي‌باشد و اين بدين معني است که زواياي آتش $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_{15}$ بايد طوري محاسبه شوند که دامنه‌ي هارمونيک اصلي حفظ شده و در عين حال دامنه هارمونيک هاي فرد غير مضرب ۳ تا مرتبه‌ي ۴۹ نيز به حداقل برسند. هارمونيک هاي مراتب بالاتر نيز به سادگي با فيلتر پائين گذر فيلتر مي‌شوند. براي مثال زواياي آتش زير با استفاده از الگوريتم پيشنهادي براي M=1 حاصل مي‌شود.

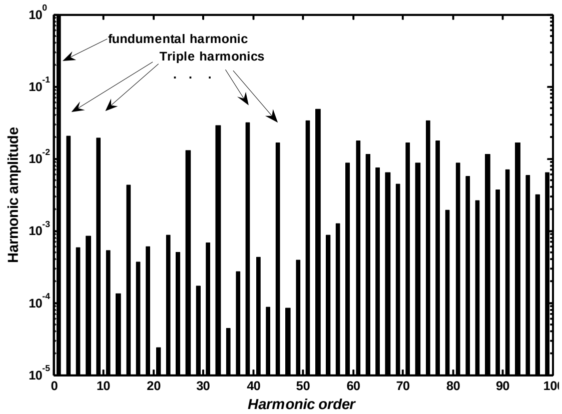
$$\theta_1 = 6.19^o, \theta_2 = 11.56^o, \theta_3 = 13.89^o, \theta_4 = 14.06^o$$
$$\theta_5 = 16.48^o, \theta_6 = 19.77^o, \theta_7 = 28.40^o, \theta_8 = 31.07^o$$
$$\theta_9 = 33.03^o, \theta_{10} = 43.01^o, \theta_{11} = 44.97^o, \theta_{12} = 48.49^o$$
$$\theta_{13} = 61.10^o, \theta_{14} = 65.49^o, \theta_{15} = 68.08^o$$

(۱۷)

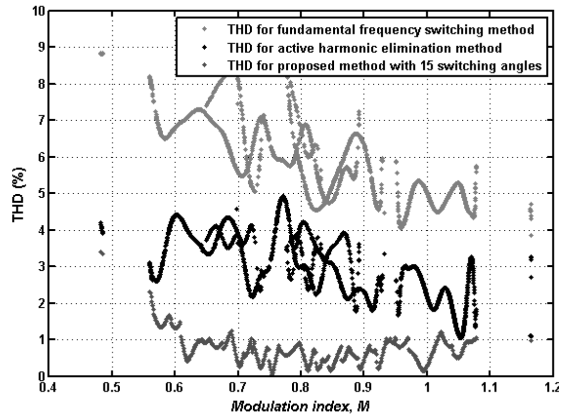
تحليل فوريه‌ي شکل موج خروجي فاز با استفاده از زواياي فوق در شکل (۴) نشان‌داده شده است. هم چنين مقدار THD براي اين زوايا که از رابطه (۱۸) محاسبه مي‌شود برابر ۰/۱۹۵۱% بدست مي‌آيد در حاليکه با استفاده از روش حذف هارمونيک فعال که در مرجع [۱۱] پيشنهاد شده است، با حذف هارمونيک هاي تا مرتبه‌ي ۳۱ تعداد کليدزني ها تقريبا برابر ۱۵۰ مي‌باشد که ۱۰برابر بيشتر از روش پيشنهادي در اين مقاله مي‌باشد و هم چنين مقدار THD برابر ۲/۱۷% مي‌باشد که بيش از ۱۰برابر روش پيشنهادي مي‌باشد.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=5,7,11,...}^{49} V_n^2} \Big/ V_1 \qquad (۱۸)$$

شکل (۵) نشان دهنده مقدار اعوجاج هارمونيک کلي براي شکل موج پلکاني، روش حذف هارمونيک فعال و روش پيشنهادي با k=3، نسبت به شاخص مدولاسيون مي‌باشد. همان طور که از شکل (۵) ديده مي‌شود مقدار اعوجاج هارمونيک کلي روش پيشنهادي در تمام شاخص-هاي مدولاسيون کمتر از دو روش ديگر بوده و حتي در بعضي از شاخص‌هاي مدولاسيون اين مقدار بسيار نزديک به صفر است. هم چنين تعداد کليدزني ها نيز نسبت به روش حذف هارمونيک فعال تقريبا ۱۰برابر کمتر مي‌باشد.



شکل ۴ : تحليل فوريه شکل موج خروجي روش مدولاسيون **SHE-PWM** و ***k*=3** (۱۵ زاويه آتش) نسبت به مرتبه هارمونيک براي ***M*=1** .

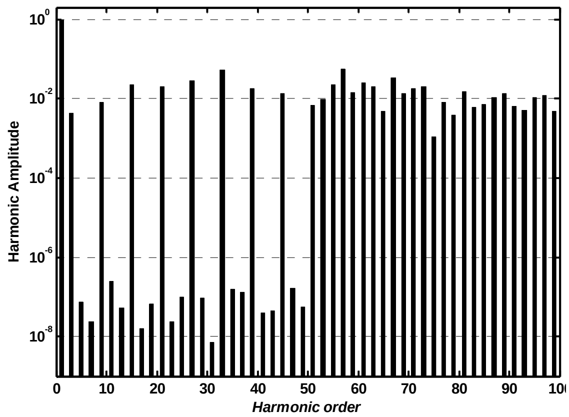


شکل ۵ : **THD** به ترتيب از بالا به پائين براي شکل موج پلکاني، روش حذف هارمونيک فعال و روش پيشنهادي با **k=3.**

با افزايش تعداد کليدزني ها مي‌توان مقدار اعوجاج هارمونيک کلي را بيشتر نيز کاهش داد. بنابراين در حالت سوم فرکانس کليدزني را افزايش داده و پنج برابر فرکانس اصلي در نظر مي‌گيريم و در نتيجه تعداد کليدزني ها در هر ربع سيکل به ۲۵ کليدزني مي‌رسد. براي مثال چنان چه زواياي آتش براي M=1 توسط الگوريتم پيشنهادي محاسبه شوند مقادير زير به دست مي‌آيند.

$$\theta_1 = 0.57^o, \theta_2 = 2.81^o, \theta_3 = 6.82^o, \theta_4 = 8.53^o$$
$$\theta_5 = 11.14^o, \theta_6 = 12.23^o, \theta_7 = 15.51^o, \theta_8 = 18.31^o$$
$$\theta_9 = 21.03^o, \theta_{10} = 21.90^o, \theta_{11} = 27.01^o, \theta_{12} = 28.62^o$$
$$\theta_{13} = 31.23^o, \theta_{14} = 35.47^o, \theta_{15} = 36.37^o, \theta_{16} = 38.76^o$$
$$\theta_{17} = 39.57^o, \theta_{18} = 43.44^o, \theta_{19} = 49.69^o, \theta_{20} = 52.18^o$$
$$\theta_{21} = 58.18^o, \theta_{22} = 60.04^o, \theta_{23} = 64.18^o, \theta_{24} = 72.70^o$$
$$\theta_{25} = 75.23^o$$
(۱۹)

طيف فركانسي شكل موج خروجي براي M=1 در شكل (۶) نشانداده شده است. مقدار اعوجاج هارمونيكي كلي براي شكل موج حاصله كه از رابطهي (۱۸) محاسبه ميشود برابر %۴/۱۷۶۵e-۰۰۵ است كه تقريبا نزديک به صفر بوده و با استفاده از يک فيلتر پائين گذر كه هارمونيک هاي بالاتر از مرتبهي ۴۹ را حذف كند ميتوان شكل موج بسيار نزديک به سينوسي به دست آورد.



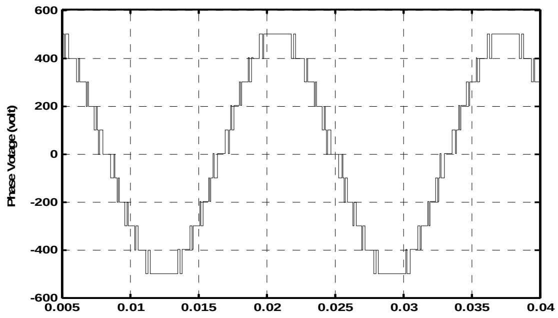
شكل ۶ : تحليل فوريه شكل موج خروجي روش مدولاسيون **SHE-PWM** و **k=5** نسبت به مرتبهي هارمونيک براي ***M*=1** .

نتايج شبيهسازي در MATLAB/SIMULINK

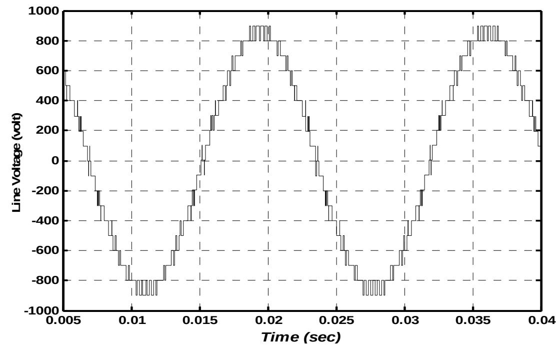
در اين بخش نتايج حاصل از شبيهسازي در محيط MATLAB/SIMULINK براي يک اينورتر ۱۱سطحي سهفاز بمنظور تائيد نتايج به دست آمده براي زواياي كليدزني، ارائه شده است. هر فاز اينورتر شامل ۵ پل سري همانند شكل (۱) بوده و مقادير لينک *dc* براي هر پل ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شده است.

نتايج حاصل از شبيهسازي براي شكل موج ولتاژ فاز و خط-خط براي حالت M=1 و k=3 بترتيب در شكل هاي (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده است، هم چنين طيف فركانسي ولتاژ خط-خط براي اين شكل موج كه توسط جعبه ابزار FFT تا هارمونيک مرتبهي ۱۵۰ محاسبه شده، به ترتيب بدون بزرگ نمائي و با بزرگ نمائي نسبت به محور Y در شكل هاي (۷-ج) و (۷-د) نشان داده شدهاند.

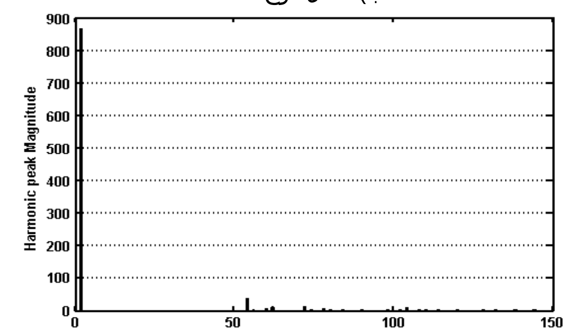
همان گونه كه از شكل (۷-د) ديده ميشود، هارمونيک هاي پائين تر از مرتبه ۵۰ دامنهي ناچيزي دارند كه نتايج محاسباتي ارائه شده در بخش قبل را تاييد مينمايند.



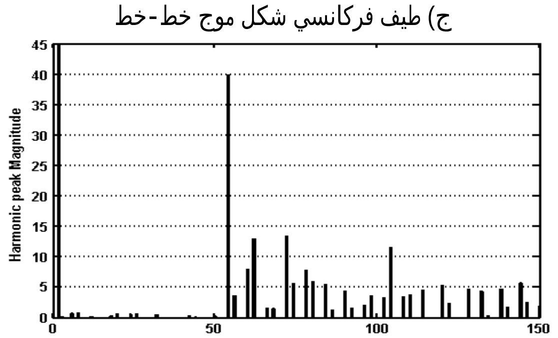
الف) شكل موج فاز



ب) شكل موج خط-خط

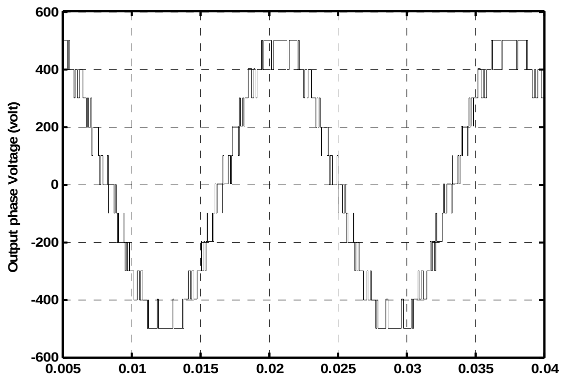


ج) طيف فركانسي شكل موج خط-خط

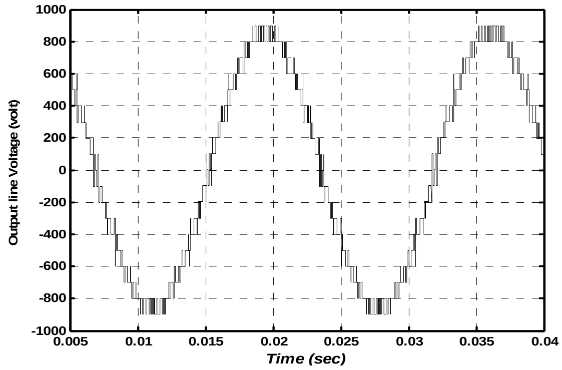


د) طيف فركانسي با بزرگنمائي نسبت به محور **Y**

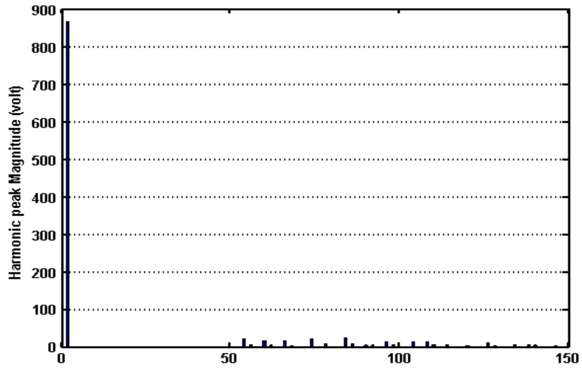
شكل ۷ : نتايج شبيهسازي براي حالت ***M*=1, *k*=3** .



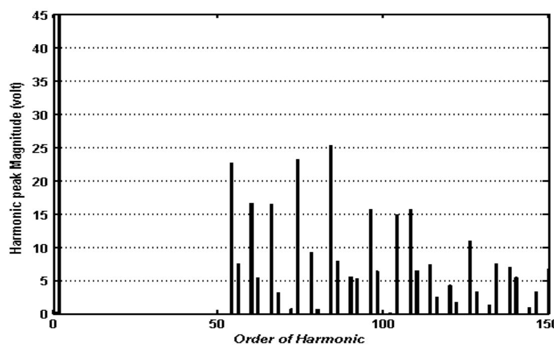
الف) شكل موج فاز



ب) شكل موج خط-خط



ج) طيف فركانسي شكل موج خط-خط



د) طيف فركانسي با بزرگنمائي نسبت به محور **Y**

شكل ۸ : نتايج شبيه‌سازي براي حالت **M=1, k=5** .

شبيه‌سازي ديگر، براي حالت M=1 و k=5 كه ۲۵ زاويه‌ي كليدزني را در هر ربع سيكل شكل موج فاز شامل مي‌شود به انجام رسيده است. نتايج حاصل از شبيه‌سازي براي شكل موج ولتاژ فاز و خط-خط به ترتيب در شكل هاي (۸-الف) و (۸-ب) و طيف فركانسي شكل موج ولتاژ خط-خط تا هارمونيک مرتبه‌ي ۱۵۰ در شكل هاي (۸-ج) و (۸-د) به ترتيب بدون بزرگ نمائي و با بزرگ نمائي نسبت به محور Y نشان داده شده است. با توجه به شكل (۸-د) دامنه‌ي هارمونيک هاي پائينتر از مرتبه‌ي ۵۰ تقريبا برابر صفر مي‌باشند كه نتايج محاسباتي بخش قبل را تاييد مي‌نمايند. هارمونيک هاي بالاتر از مرتبه‌ي ۵۰ نيز به سادگي با يک فيلتر پائين‌گذر با سايز كوچک قابل حذف مي‌باشند.

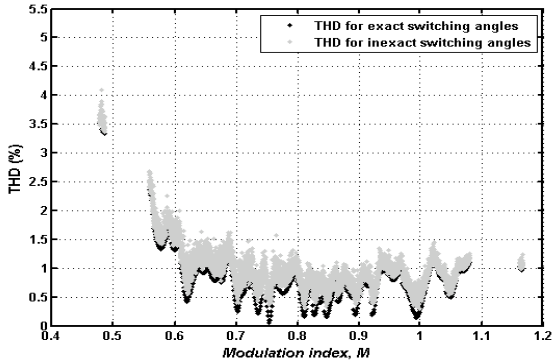
حساسيت هارمونيک ها به دقت زوايا

ممكن است زمان پالس هاي ارسالي به كليدهاي قدرت دقيقا برابر با مقادير محاسبه شده بهينه نباشد، كه اين موضوع مي‌تواند مقدار THD شكل موج ولتاژ خروجي اينورتر را تحت تاثير قرار دهد. از اين رو در اين بخش تاثير دقت زواياي كليدزني بر مقدار THD مورد بررسي قرار گرفته است. پارامترهاي بسيار زيادي مي‌توانند در دقت پالس هاي ارسالي به كليدهاي قدرت نقش داشته باشند كه از جمله آن ها مي‌توان به نوع و سرعت كليدهاي قدرت استفاده شده، مدار گيت درايور مربوطه، مدار سيستم كنترلي، مدار و سيستم توليد پالس هاي آتش و مسائلي از اين قبيل اشاره كرد. از آن جائي كه زواياي ارسالي به دليل پارامترهاي ذكر شده، ماهيتي تصادفي داشته و زمان پالس ارسالي ممكن است جزئي بيشتر يا جزئي كمتر از مقدار بهينه مربوطه باشد لذا با يک بررسي احتمالاتي مي‌توان اين تاثير را مورد بررسي قرار داد. توزيع احتمالاتي زواياي كليدزني به صورت توزيع نرمال $N(\alpha_k,\sigma)$ در نظر گرفته شده است كه α_k زاويه‌ي بهينه‌ي k ام و σ پارامتر واريانس است كه به عوامل موثر در دقت زوايا بستگي دارد و از يک سيستم به سيستم ديگر مي‌تواند متفاوت باشد.

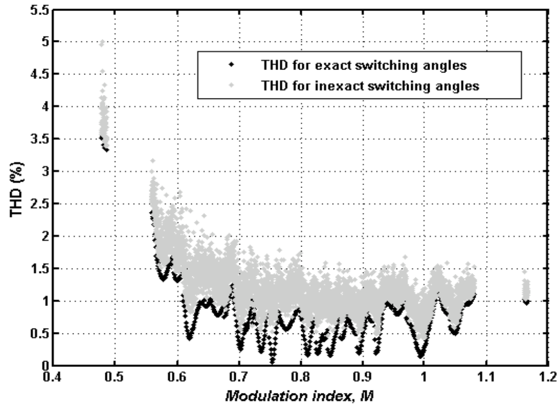
بررسي دقت زوايا بر مقدار THD براي شكل موج روش SHE-PWM با ۱۵ زاويه‌ي كليدزني كه زواياي بهينه‌ي كليدزني آن توسط روش پيشنهادي محاسبه شده است، براي دو مقدار نوعي واريانس σ=۰/۱ و σ=۰/۱۵ به صورت زير مورد بررسي قرار گرفته است.

در بررسي اول مقدار نوعي ۰/۱ درجه واريانس براي σ در نظر گرفته شده است. براي هر شاخص مدولاسيون

۱۰ مجموعه زواياي كليدزني با توزيع احتمالاتي نرمال $N(\alpha_k,\sigma)$ توليد شده است، سپس مقادير THD براي اين زواياي نادقيق كه مقداري انحراف نسبت به زاويه‌ي بهينه دارند محاسبه شده و در شكل (۹) نشان داده شده است. با توجه به اين شكل مقدار THD ولتاژ خروجي براي زواياي غيردقيق همواره از مقدار آن براي زواياي بهينه بيشتر است.



شكل ۹ : مقادير **THD** نسبت به شاخص مدولاسيون براي زواياي بهينه و و زواياي غير دقيق براي مقدار نوعي σ =۰/۱ .



شكل ۱۰ : مقادير **THD** نسبت به شاخص مدولاسيون براي زواياي بهينه و و زواياي غير دقيق براي مقدار نوعي σ =۰/۱۵ .

بررسي دوم با مقدار نوعي σ =۰/۱۵ با همان شرايط فوق به انجام رسيده و نتايج حاصله در شكل (۱۰) نشانداده شده است. با مقايسه‌ي دو شكل (۹) و (۱۰) مشاهده مي‌شود كه با افزايش مقدار σ، افزايش مقدار THD بيشتر خواهد بود. از اينرو در طراحي سيستم اينورتر و مدارات جانبي اين مسائل بايد مد نظر طراح قرار گرفته كه تا حد امكان عدم دقت زوايا پائين باشد.

نتيجه گيري

روش جديدي براي محاسبه زواياي آتش در مبدل-هاي چندسطحي براي كاهش محتواي هارمونيكي با استفاده از الگوريتم مهاجرت پرندگان معرفي شد. زماني كه تعداد زواياي آتش افزايش يابند و روش هاي مرسوم قادر به حل معادلات غير جبري براي محاسبه‌ي زوايا نباشند روش پيشنهادي مي‌تواند به كار گرفته شود. در مقايسه با ساير روشهاي مدولاسيون پهناي پالس و همچنين روش حذف هارمونيک فعال كه اخيرا معرفي شده است، اين روش شكل موج با كيفيت بالاتري را با تعداد كليدزني‌هاي كمتر توليد مي‌كند. نتايج محاسباتي و هم چنين شبيه‌سازي در سيمولينک نرم‌افزار MATLAB نشان مي‌دهد كه اين الگوريتم قادر به محاسبه‌ي زواياي آتش و كاهش محتواي هارمونيكي شكل موج خروجي به طور موثري مي‌باشد.

مراجع

1 - Lai, J. S. and Peng, F. Z. (1996). “Multilevel converters—A new breed of power converters.” *IEEE Trans. Ind. Applicat*., Vol. 32, No. 3, PP. 509-517.

2 - Tolbert, L. M., Peng, F. Z. and Habetler, T. G. (1999). “Multilevel converters for large electric drives.” *IEEE Trans. Ind. Applicat.,* vol. 35, PP. 36-44.

3 - Carrara, G., Gardella, S., Marchesoni, M., Salutari, R. and Sciutto, G. (1992). “A new multilevel PWM method: A theoretical analysis.” *IEEE Trans. Power Electron.,* Vol. 7, No. 4, PP. 497-505.

4 - Menzies, R. W., Steimer, P. and Steinke, J. K. (1994). “Five-level GTO inverters for large induction motor drives.” *IEEE Trans. Ind. Applicat*., Vol. 30, PP. 938-944.

5 - Patel, H. S. and Hoft, R. G. (1973). “Generalized harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I –harmonic elimination.” *IEEE Trans. Ind. Applicat*., Vol. IA-9, No. 3, PP. 310-317.

6 - Patel, H. S. and Hoft, R. G. (1974). “Generalized harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part II -voltage control technique.” *IEEE Trans. Ind. Applicat.,* Vol. IA-10, No. 5, PP. 666-673.

7 - Enjeti, P. N., Ziogas, P. D. and Lindsay, J. F. (1990). “Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation.” *IEEE Trans. Ind. Applicat*., Vol. 26, No. 2, PP. 302-316.

8 - Czarkowski, L. Li, D., Liu, Y., and Pillay, P. (2000). “Multilevel selective harmonics elimination PWM technique in series-connected voltage inverters.” *IEEE Trans. Ind. Applicat.,* Vol. 36, PP. 160-170.

9 - Chiasson, J. N., Tolbert, L. M., McKenzie, K. J. and Du, Z. (2003). “Control of a multilevel converter using resultant theory.” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.,* Vol. 11, No. 3, PP. 345-354.

10 - Ozpineci, B., Tolbert, L. M. and Chiasson, J. N. (2005). “Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms.” *IEEE Letters*. *Power Electron,* Vol. 3, PP. 92-95.

11 - Du, Z., Tolbert, L. M. and Chiasson, J. N. (2006). “Active Harmonic Elimination in Multilevel Converters.” *IEEE Trans. Power Electron,* Vol. 21. No. 2, PP. 459-469.

12 - Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995). “Particle swarm optimization.” *in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.,* Vol. IV, PP. 1942-1948.

13 - Eberhart, R. C. and Shi, Y. (1998). “Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization.” *in Proc. 7th Conf. vol. Program,* Vol. 1447, PP. 611-616.

واژه‌هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Sinusoidal PWM
2 - Non-Sinusoidal PWM
3 - Space Vector PWM (SVPWM)
4 - Selective Harmonic Elimination (SHE)
5 - Selective Harmonic Elimination PWM (SHE-PWM)
6 - Resultant Theory
7 - Active Harmonic Elimination