

## **Improvement of power quality in photovoltaic systems using genetic-ant hybrid algorithm in order to reduce harmonics**

Department of Electrical Engineering and Computer, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran  
saeedaslani404@gmail.com , rastegar.fatemi@gmail.com , alireza.solat@iau.ac.ir

### **Abstract:**

In photovoltaic systems, it is used to become a grid-connected inverter, which is located between the main source and the power grid. Due to the presence of electronic devices and dead time in the switching operation of the inverter, it causes a disturbance in the power quality in photovoltaic systems, which causes total harmonic distortion (THD) in the output form of the system. In this paper, by using the combined genetic-ant algorithm to optimize the proportional-integral (PI) controllers, it has improved the pulse width modulation (PWM) functions in the three-phase Q ZSI inverter, which leads to the reduction of (THD) is output, and not only improves the overall operation time of the inverter, but also improves the switching speed. The simulation results are presented using MATLAB/SIMULINK software to check the superiority and effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Power quality, harmonics, impedance source inverter (Q-ZSI), combined genetic-ant algorithm, Pulse width modulation (PWM), PI controller.

**Received:** 29 January 2024

**Revised:**

**Accepted:**

**Corresponding Author:** Dr.Seyed Mohammad Javad Rastegar Fatemi

## بهبود کیفیت توان در سیستم‌های فتولتائیک با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان به منظور کاهش هارمونیک

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران  
saeedaslani404@gmail.com , rastegar.fatemi@gmail.com , alireza.solat@iau.ac.ir

**چکیده:** در سیستم‌های فتوولتائیک برای تبدیل توان از اینورتر متصل به شبکه استفاده می‌شود، که بین منبع اصلی و شبکه برق قرار دارد. به دلیل وجود ادوات الکترونیکی و زمان مرده در عملیات سوئیچینگ اینورتر، باعث اختلال در کیفیت توان در سیستم‌های فتوولتائیک می‌گردد، که باعث ایجاد اعوجاج هارمونیک کل (THD) در شکل موج خروجی سیستم می‌شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک - مورچگان جهت بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر تناسبی-انتگرالی (PI)، باعث بهبود سیگنال‌های مدولاسیون عرض پالس (PWM) در اینورتر (Q ZSI) سه فاز گردیده است، که منجر به کاهش (THD) خروجی می‌شود، و نه تنها زمان عملکرد کلی اینورتر را کاهش می‌دهد، بلکه سرعت کلید زنی را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB/SIMULINK برای تأیید برتری و اثربخشی روش پیشنهادی ارائه می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** اعوجاج هارمونیک کل (THD)، اینورتر منبع امپدانس (Q ZSI)، الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان، کیفیت توان، کنترلر PI، مدولاسیون عرض پالس (PWM).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

تاریخ بازنگری مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد جواد رستگار فاطمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ساوه- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه- دانشکده مهندسی برق- گروه قدرت

## ۱- مقدمه

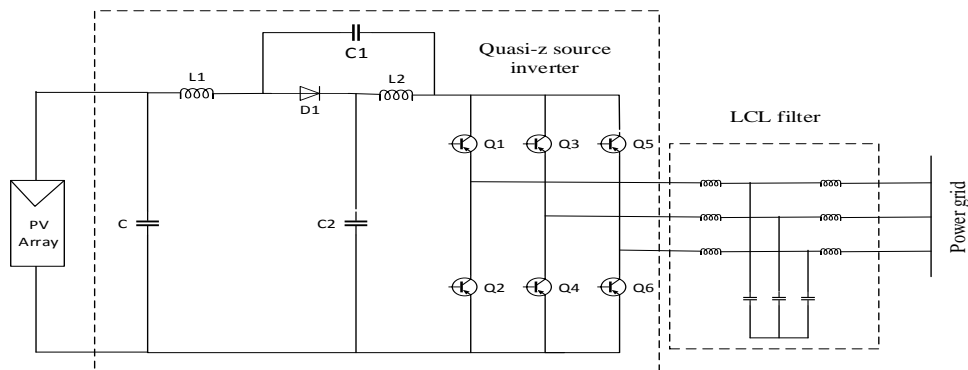
امروزه بحران جهانی انرژی باعث شده است که عزم جدی برای رشد و توسعه منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر ایجاد کند. تجهیزات فتوولتائیک طراحی ساده ای دارند که نیاز به حداقل تعمیر و نگهداری دارند و دارای محدوده توان خروجی از میکرووات تا مگاوات هستند. از این رو، آنها برای منبع انرژی، پمپاژ آب، سیستم های خورشیدی خانه، مناطق مسکونی دور افتاده، مخبرات، ماهواره ها و فضاپیما ها استفاده می شوند. با چنین طیف گسترده ای از کاربردها، نیاز به سیستم های فتوولتائیک نیز هر سال افزایش می یابد. اتصال آرایه های خورشیدی به شبکه به شرایط سیستم مبدل برق مربوط می شود که توان DC خروجی پانل ها باید بسته به سطح شبکه توزیع با فرکانس و دامنه مورد نظر به برق AC تبدیل شود. تبدیل برق DC به AC با استفاده از اینورترهای فرکانس بالا روش بهتری است، زیرا اینورترهای فرکانس پایین باعث کاهش ضریب توان و تزریق هارمونیک به شبکه قدرت می شوند و کیفیت توان<sup>۱</sup> در خروجی سیستم کاهش می یابد [۱]. کیفیت توان اصطلاحی برای بیان کیفیت جریان و ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان در شبکه می باشد [۶-۲]. کیفیت ولتاژ و جریان را می توان تفسیر کرد که چقدر به موج سینوسی با اندازه و فرکانس نامی نزدیک است. مشکل کیفیت توان تولید شده توسط منابع انرژی تجدید پذیر سال ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عوامل اختلال در کیفیت توان در سیستم های فتوولتائیک شامل هارمونیک های جریان و ولتاژ، اعوجاج فرکانسی، نوسانات توان در منابع خورشیدی و غیره است [۱۴-۷]. بنابراین هرگونه اختلال در پارامترهای ذکر شده باعث کاهش ضریب توان شبکه و افزایش تلفات سیستم می شود. با توجه به پارامترهای کیفیت توان و اثرات آنها، تمرکز اصلی این مقاله کاهش هارمونیک ها در نیروگاه های خورشیدی است. در اینورترهای سنتی برای رسیدن به ولتاژ خروجی پنل های خورشیدی به حد مطلوب، از مبدل الکترونیک قدرت برای افزایش ولتاژ استفاده می شود، از سوی دیگر به دلیل وجود ادوات الکترونیکی در کلید زنی و به دلیل وجود زمان مرده، باعث ایجاد اعوجاج هارمونیک کل<sup>۲</sup> (THD) در شکل موج خروجی می شود. در نهایت، پدیده اعوجاج هارمونیک ظاهر می شود و به طور کلی، یک مشکل هارمونیک در سیستم های<sup>۳</sup> (PV) را می توان به عنوان یک اختلال خاص تعریف کرد [۱۵-۲۰]. یک بررسی جامع از هارمونیک ها در شبکه فتوولتائیک یکپارچه ارائه شده است [۲۱]. با توجه به نتایج به دست آمده، اعوجاج هارمونیک کل در سیستم های فتوولتائیک در سناریوهای مختلف متفاوت است. اثرات اعوجاج هارمونیک در شبکه های الکتریکی به مکان و تعداد سیستم های فتوولتائیک بستگی دارد، زمانی که اینورتر به انتهای خط نزدیک است، هارمونیک افزایش می یابد و باعث میشود که جریان و ولتاژ ایده آلی در شبکه ایجاد نگردد [۲۲]. و همچنین امپدانس بین سیستم فتوولتائیک و نقطه اتصال مشترک<sup>۴</sup> (PCC) بر اعوجاج هارمونیک در شکل موج خروجی تأثیر می گذارد [۲۴].

در بیشتر تحقیقات، شکافی در مورد روش های جدید در حال تکامل برای بهبود ضریب توان در خروجی اینورتر وجود دارد. بنابراین، برای پر کردن شکاف تحقیق، در این مقاله راه حل جدید برای از بین بردن تلفات کلید زنی اینورتر پیشنهاد شده است. با توجه به نوآوری در این مقاله با هدف رسیدن به بهبود کیفیت توان، با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک - مورچگان و بهینه کردن سیگنالهای مدولاسیون عرض پالس<sup>۵</sup> (PWM) و ساختن پالس ها مناسب برای IGBT های اینورتر، تلفات در کلیدزنی را کاهش میدهد. با توجه [۳۱] که هارمونیک را در اینورتر<sup>۶</sup> (Q ZSI) در حالت الگوریتم فازی ارائه داده است، در این مقاله با استفاده از الگوریتم ترکیبی و بهینه کردن مقادیر کنترلر تناسبی-انترگالی<sup>۷</sup> (PI)، هارمونیک ها را کاهش داده و ضریب توان شبکه را بهبود بخشیده است.

در ادامه ساختار این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. بخش ۲ معرفی ساختار اینورتر منبع شبه امپدانس (Q ZSI) را نشان می دهد، در بخش ۳ ساختار سیستم مورد مطالعه توضیح داده شده است، در بخش ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی و عملکرد موثر با استفاده از نرم افزار MATLAB Simulink مشهود می باشد و در نهایت، بخش ۵ نتیجه گیری ارائه شده است.

## ۲- اینورتر منبع شبه Z: (QZSI)

در سال‌های اخیر، اینورتر منبع  $Z$  به دلیل مزایایی که دارد به عنوان یک کانون تحقیقاتی در نظر گرفته شده است که می‌تواند به طور فعال افزایش و کاهش ولتاژ را متوجه شود و محدودیتی در منبع تغذیه اینورتر ندارد. با این حال، ولتاژ خازن اینورتر منبع  $Z$  بسیار زیاد است و در نتیجه مقاومت ولتاژ قوی و حجم خازنی زیاد ایجاد می‌شود که هزینه را افزایش می‌دهد [۲۵-۲۷]. در عین حال، جریان ضربه راه‌اندازی زیاد است که باعث می‌شود جریان از مقدار حالت پایدار فراتر رود و به اینورتر آسیب برساند. با توجه به معایب فوق، برخی از محققان یک اینورتر منبع شبه  $Z$  را پیشنهاد کردند. در مقایسه با اینورتر منبع  $Z$  (ZSI)، اینورتر منبع شبه  $Z$  (QZSI) دارای مزایای تنش ولتاژ پایین، جریان ورودی پیوسته، سمت  $dc$  پل اینورتر و زمین مشترک منبع  $dc$  و غیره است [۲۸-۳۰]. ویژگی‌های اینورتر منبع  $Z$  را دارد و برای اتصال به شبکه فتوولتائیک مناسب تر است. اینورتر شامل اندوکتانس ذخیره انرژی  $L1$ ،  $L2$ ، ظرفیت ذخیره انرژی  $C1$ ،  $C2$  و دیود  $D1$  است که یک شبکه منبع شبه  $Z$  را تشکیل می‌دهند و  $C$  ظرفیت فیلتر  $DC$  است. ساختار اینورتر منبع شبه  $Z$  در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار اینورتر QZSI متصل به شبکه

Figure (1) Grid connected QZSI inverter structure

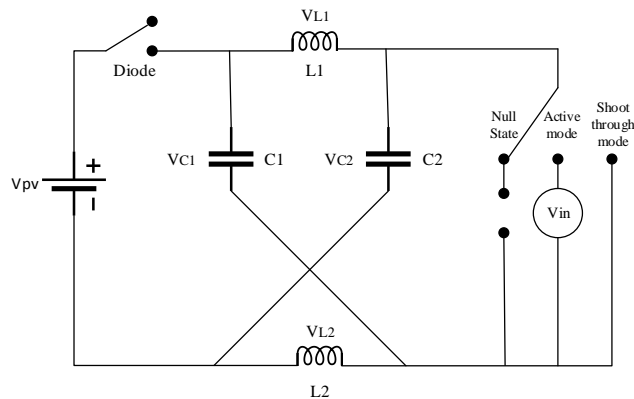
ساختار QZSI دارای دو حالت عملیات کلی است، حالت پرتاب<sup>۸</sup> (shoot-through) و حالت غیر پرتاب<sup>۹</sup> (non shoot-through). (QZSI) از پانزده حالت سوئیچینگ تشکیل شده است. شش حالت فعال (non shoot-through) دو حالت صفر و هفت حالت (shoot-through) وجود دارد که در جدول (۱) آورده شده است.

Table (1): Switching modes

جدول (۱): حالت‌های سوئیچینگ

Switching state	$S_1$	$S_4$	$S_3$	$S_6$	$S_5$	$S_2$
Active state (1 0 0)	on	of	of	on	of	on
Active state (1 1 0)	on	of	on	of	of	on
Active state (0 1 0)	of	on	on	of	of	on
Active state (0 1 1)	of	on	on	of	on	of
Active state (0 0 1)	of	on	of	on	on	of
Active state (1 0 1)	on	of	of	on	on	of
Null state (0 0 0)	of	on	of	on	of	on
Null state (1 1 1)	on	of	on	of	on	of
Shoot through state	on	on	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$
Shoot through state	$\phi$	$\phi$	on	on	$\phi$	$\phi$
Shoot through state	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	on	on
Shoot through state	on	on	on	on	$\phi$	$\phi$
Shoot through state	on	on	$\phi$	$\phi$	on	on
Shoot through state	$\phi$	$\phi$	on	on	on	on
Shoot through state	on	on	on	on	on	on

مدار معادل در حالت صفر (null)، shoot-through و (non shoot-through) در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): مدار معادل اینورتر منبع امپدانس  
Figure (2): equivalent circuit of impedance source inverter

### ۲-۱- حالت صفر

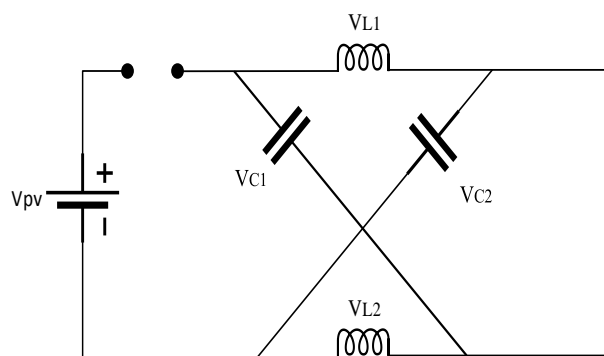
در این حالت، سه ساق بالایی یا سه ساق پایینی در اینورتر سه فاز که دارای شش ساق هستند (همانند شکل ۱) دچار اتصال کوتاه می‌شوند، و در نهایت هیچ توانی به بار منتقل نمیشود، بنابراین به عنوان یک مدار باز عمل می‌کند که در مدار معادل منبع امپدانس مشاهده می‌شود.

### ۲-۲- حالت shoot-through

در این حالت انرژی ذخیره شده در خازن به سمت سلف‌ها هدایت می‌شود که در این حالت دیود بایاس معکوس است. سلف‌ها از طریق خازن‌ها شارژ می‌شوند و جریان به صورت خطی از طریق سلف افزایش می‌یابد. هدف سلف محدود کردن جریان ریپل در حالت بوست است. در این حالت، با توجه به سه فاز بودن اینورتر، شش ساق بالا و پایین می‌توانند در هفت حالت اتصال کوتاه داشته باشند: هر یک از پایه‌ها (۳ موقعیت)، دو پایه سه پایه (۳ موقعیت)، هر سه پایه (۱ موقعیت). این ویژگی در اینورترهای سنتی غیرقابل قبول است، زیرا اتصال هر دو کلید در یک پایه باعث اتصال کوتاه منبع می‌شود. به دلیل برابری سلف‌های  $L1$  و  $L2$  و خازن‌های  $C1$  و  $C2$ ، شبکه منبع  $Z$  متقارن می‌شود. از تقارن و مدار معادل به دست می‌آید:

$$V_{c1} = V_{c2} = V_c \quad \& \quad V_{L1} = V_{L2} = V_L \quad (1)$$

مدار معادل qZSI در طول shoot-through در شکل (۳) نشان داده شده است.



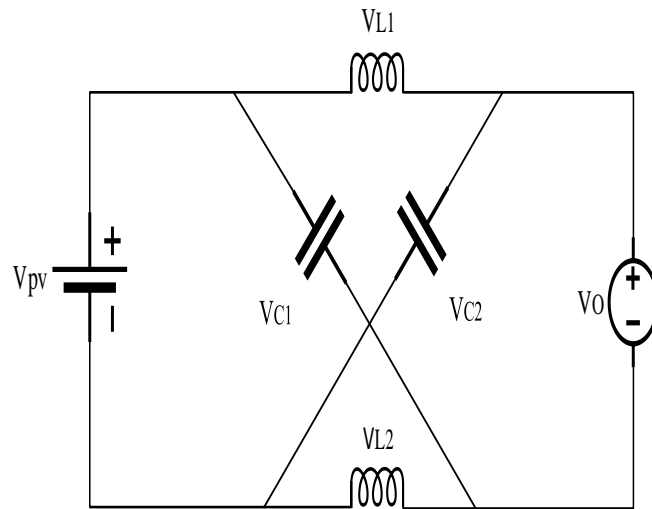
شکل (۳): مدار معادل shoot-through  
Figure (3): shoot-through equivalent circuit

در طول shoot-through بدست می‌آید:

$$V_L = V_C \quad V_o = 0 \quad (2)$$

### ۳-۲- حالت اکتیو (non shoot-through)

در این حالت جریان سلف کاهش می‌یابد و انرژی به اینورتر هدایت می‌شود. اینورتر منبع ولتاژ سه فاز سنتی دارای شش حالت فعال است، با توجه به حالت‌های سوئیچینگ در جدول (۱)، یک شکل موج سینوسی در خروجی اینورتر ظاهر می‌شود. ضمناً در این حالت قابلیت اتصال همزمان دو ساق روبروی هم را ندارند. مدار معادل در حالت non shoot-through در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): مدار معادل non shoot-through

Figure (4): non shoot-through equivalent circuit

در طول shoot-through دریافت می‌کنیم:

$$V_o = V_C - V_L = 2V_C - V_{pv} \quad V_L = V_{pv} - V_C \quad (3)$$

ولتاژ خازن را میتوان بدست آورد:

$$\frac{T_{nsh}}{T_{nsh} - T_{sh}} V_{pv} = \frac{1 - D}{1 - 2D} V_{pv} \quad (4)$$

که در آن  $T = T_{nsh} + T_{sh}$ ، زمان سوئیچینگ و  $D = T_{sh}/T$  نسبت وظیفه زمان shoot-through است. VC مقدار حالت پایدار ولتاژ خازن و  $V_{pv}$  مقدار حالت پایدار ولتاژ ورودی است. به واسطه:

$$V_o = \frac{1 - D}{1 - 2D} V_{pv} \quad (5)$$

$$M = 1 - D \quad \text{or} \quad D = 1 - M \quad (6)$$

در جایی که M شاخص مدولاسیون است، ضریب تقویت B را میتوان بدست آورد:

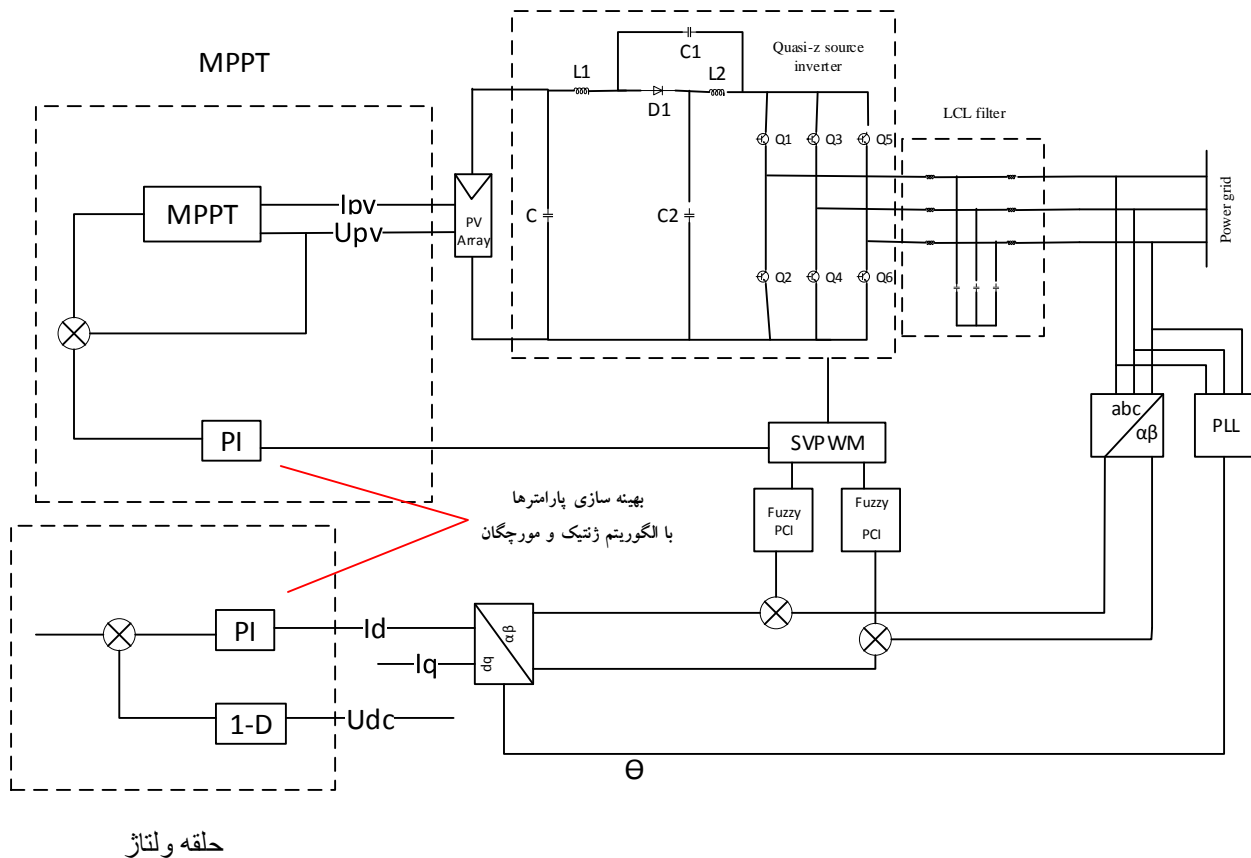
$$B = \frac{1}{1 - 2D} \geq 1 \quad (7)$$

از معادلات ۶ و ۷ بدست می‌آید:

$$B = \frac{1}{2M - 1} \quad (8)$$

### ۳- ساختار سیستم مورد مطالعه

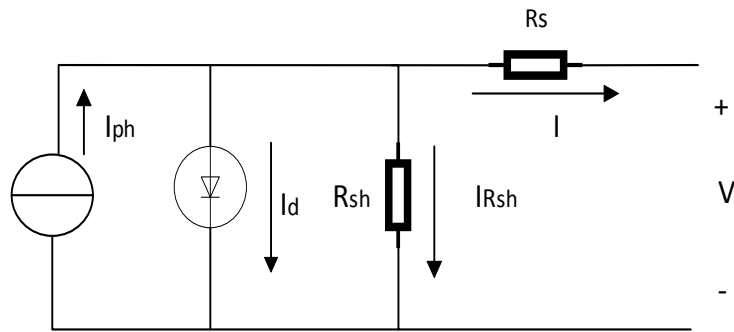
با توجه به شکل (۵) سیستم PV انرژی دریافتی از نور خورشید را با استفاده از سیستم کنترلی<sup>۱۰</sup> (MPPT) جهت جذب حداکثر توان قبل از ورود به اینورتر استفاده شده است. برای تبدیل توان از اینورتر QZSI که دارای ویژگی shoot-through می باشد استفاده شده است. با توجه به [۳۱] که از سیستم کنترل فازی طبق شکل (۵) جهت کاهش هارمونیک در خروجی اینورتر استفاده شده است، در این مقاله از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان جهت بهینه کردن پارامترهای کنترلر PI و کاهش THD اینورتر استفاده شده است.



شکل (۵): ساختار کلی سیستم  
Figure (5): general structure of the system

### ۳-۱- آرایه PV

سلول های خورشیدی سیلیکونی به طور گسترده در سیستم های فتوولتائیک استفاده می شود. آرایه PV از تعداد زیادی سلول PV کوچک تشکیل شده است و مدار معادل آن در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): مدار معادل سلول PV  
Figure (6): PV cell equivalent circuit

جریان خروجی PV بدست می آید:

$$I = I_{ph} - I_d \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (9)$$

جایی که، I جریان خروجی سلول PV است.  $I_{ph}$  در حال تولید نور است. ID معادل جریان دیود مدل است.  $R_s$  مقاومت سری است.  $R_{sh}$  یک مقاومت شنت است.  $I_{Rsh}$  جریان مقاومت به صورت موازی است. V ولتاژ خروجی سلول های PV است. Q مقدار بار موجود در یک الکترون است. K ثابت بولتزمن است. T دمای سطح پانل PV است. n فاکتور ایده آل پانل PV است.  $n = 1-5$ . تحت شرایط مرجع،  $I_{sc}$  جریان اتصال کوتاه،  $V_{oc}$  ولتاژ مدار باز،  $I_m$   $V_m$  جریان و ولتاژ نقطه توان حداکثر است، سپس زمانی که ولتاژ آرایه فتوولتائیک V است، جریان مربوطه است.

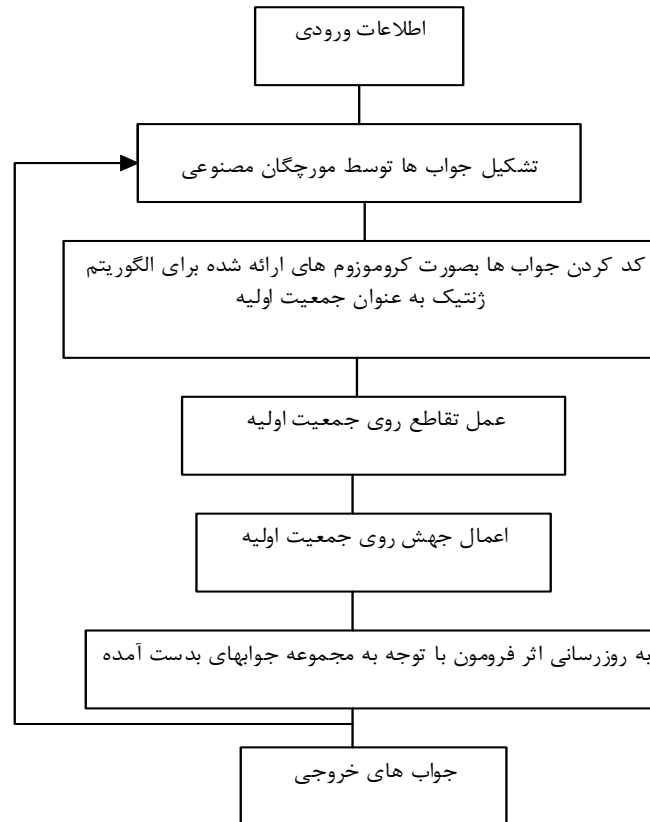
## ۲-۳- الگوریتم ترکیبی ژنتیک - مورچگان

الگوریتم ترکیبی یک روش کنترل و بهینه سازی کامپیوتری است که به عنوان یکی از شاخه های مهم کنترل هوشمند محسوب میشود، و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. منظور از الگوریتم های ترکیبی این است که یک مسئله مشابه را حل می کنند ولی از لحاظ ویژگی و عملکرد با هم متفاوت هستند که با هم ترکیب میشوند و هدف نهایی را ارائه میدهند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

### ۱-۲-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش های جستجو و بهینه سازی است که بر اصول و مکانیزم های ژنتیک طبیعی و انتخاب بقای اصلح بنا گردیده است. مفاهیم اولیه در الگوریتم ژنتیک و انواع عملگرهای آن :  
 کروموزوم: گروهی از بیت ها که برای بیان هر عضو مجموعه بکار می رود.  
 کدگذاری: نحوه نمایش کروموزوم ها را کد گذاری کروموزوم گویند.  
 جمعیت: مجموعه ای از کروموزوم ها.  
 عملگر تقاطع: این عملگر بر روی یک جفت کروموزوم عمل کرده و دو کروموزوم به طور تصادفی از یک نقطه شکسته و بخش های دو کروموزوم را جابجایی کند. بدین ترتیب دو کروموزوم جدید بدست می آید.  
 جهش: این عملگر به طور تصادفی یک کروموزوم از یک جمعیت را انتخاب کرده، و با استفاده از تغییر آن بطور تصادفی یک کروموزوم جدید می سازد.





شکل (۷): الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان  
Figure (7): Combined genetics- ants algorithm

### ۲-۲-۳- الگوریتم مورچگان

الگوریتم مورچگان از دو بخش اساسی، یکی تشکیل جواب و میزان فرمون موجود در بین کاندیدها و دیگری به روزرسانی فرمون، تشکیل شده است.

ساختن جواب: براساس استفاده از مفهوم مورچگان مصنوعی و ماهیت احتمالی حرکت این مورچگان، به انتخاب کاندیدها از بین کاندیدهای موجود پرداخته می‌شود. به این ترتیب که مورچه‌ها با احتمال زیر در هر مرحله به انتخاب یک کاندید از بین کاندیدها می‌پردازد.

$$P_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij(t)}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{i \in N_i^k} \tau_{il(t)}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta} \quad (10)$$

Table (2) parameters of the ant algorithm

جدول (۲) پارامترهای الگوریتم مورچگان

$\tau_{ij(t)}$	میزان فرمون موجود	$\eta_{ij}$	عکس فاصله بین گره $i$ و $j$
----------------	-------------------	-------------	-----------------------------

به روزرسانی فرمون: پس از یافتن جواب باید میزان فرمون در هر مسیر به صورت فرمول زیر به روز شود:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (11)$$

فرمول بالا بیان می‌کند که میزان فرمون برای تکرار  $t+1$  ام در مسیر  $i$ ،  $\rho$  برابر میزان فرمون موجود در تکرار مرحله قبل، به اضافه مجموع فرمونی که از هر مورچه در این مسیر باقی می‌ماند، می‌باشد و همچنین  $m$  تعداد مورچه‌هایی که در آن انتخاب جواب نقش مهمی دارند. در جدول (۳) مقادیر و پارامترهای الگوریتم ژنتیک و مورچگان ارائه شده است.

Table (2) parameters of the combined algorithm  
جدول (۳) پارامترهای الگوریتم ترکیبی

پارامترها	مقدار
جمعیت مورچه‌ها	۳۰
تعداد تکرار	۱۰۰
مقدار فرمون ابتدایی	۳۰
تأثیر نسبی رد فرمون	۱
اطلاعات اکتشافی رد فرمون	۲
نرخ تبخیر فرمون	۰.۰۸۵
نرخ تقاطع فرمون	۰.۵
نرخ جهش کروموزوم	۰.۰۸

### ۳-۳- تابع هدف

برای مینیمم کردن THD در خروجی اینورتر از توابع زیر استفاده است.

که در آن  $f_1$ ،  $f_2$ ،  $f_3$  به صورت زیر تعریف میشود:

$$\min_{u,w \in Z} f_1 = THD_i(x, u, w) \quad (12)$$

$$\min_{u,w \in Z} f_2 = \max_{i \in \Omega_l} THD_{v,i}(x, u, w) \quad (13)$$

$$\min_{w \in Z} f_3 = \sum (d_i + s_{ci} q_{ci} + s_{ri} q_{ri})_{i \in \Omega} \quad (14)$$

قیود :

$$L(x, u, w) = 0 \quad (15)$$

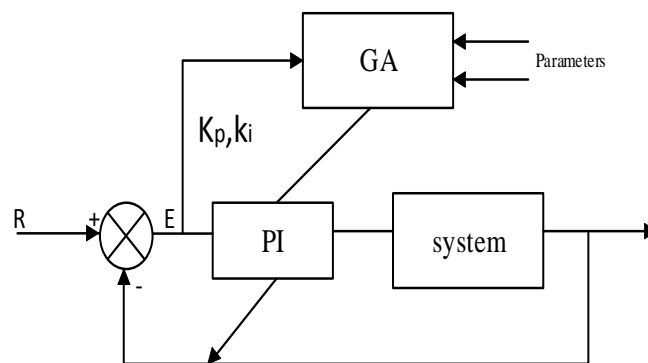
$$G(x, u, w) \leq 0 \quad (16)$$

که در آن  $x$  یک بردار متغیر حالت است.  $u$  یک بردار متغیر کنترلی است،  $w$  یک بردار متغیر جدید در فیلترهای هارمونیک است،  $\Omega$  مجموعه‌ای از تمام فیلترهای هارمونیک تک تنظیم شده است،  $\Omega_l$  مجموعه‌ای از باس‌های بارمی باشد،  $d$  ابزار هزینه در فیلتر هارمونیک می‌باشد.  $s_{ri}$  و  $s_{ci}$  به ترتیب هزینه‌های واحد خازنی و راکتور می‌باشد.  $q_{ri}$  و  $q_{ci}$  به ترتیب جبران خازنی و القایی اضافه شده در فیلتر هارمونیک می‌باشد.  $THD_i$  اعوجاج جریان هارمونیک کل در نقطه کولپینگ مشترک است.  $THD_{v,i}$  اعوجاج ولتاژ هارمونیک کل در باس  $i$  است.  $L$  مجموعه محدودیت برابری و  $G$  مجموعه محدودیت نابرابری است.

#### ۳-۴- کنترلر پیشنهادی اینورتر

در این مقاله از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) که دارای مزایای سازگاری قوی و دامنه کاربرد وسیعی دارد استفاده شده است.  $K_p$  و  $K_i$  به ترتیب پارامترهای کنترل‌کننده هستند. هدف از این روش، تنظیم بهینه پارامترهای ضرایب  $K_p$  و  $K_i$  کنترل‌کننده PI می‌باشد که با استفاده از الگوریتم ترکیبی، میتوان ضرایب بهینه را به نحوی اتخاذ کرد که تابع هدف به مقدار کمینه خود برسد. محدودده مقادیر پارامترهای کنترلر PI جهت بهینه کردن  $0 < K_i < 800$  ،  $0 < K_p < 1$  در نظر گرفته شده است. و مقادیر ایده‌آل  $K_i = 210.54$  و  $K_p = 0.74$  می‌باشند.

در تکنیک کنترل مبتنی بر PI، در اینورتر QZSI سیگنالهای PWM تولید شده برای کلید زنی بهینه اینورتر استفاده میشود که باعث کاهش تلفات در عملیات کلید زنی اینورتر می‌شود.



شکل (۸): بلوک دیاگرام کنترلی سیستم

Figure (8): System control block diagram

#### ۴- شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی در نرم افزار Simulink/ MATLAB ارائه شده است. پارامترهای سیستم در جدول (۴) نشان داده شده است. در این مقاله یک مدل سیستم کنترلی متصل به شبکه بر اساس کنترل PI با نتایج شبیه سازی سیستم ارائه میگردد.

Table (4) system parameters

جدول (۴) پارامترهای سیستم

مقدار	پارامترها
۳۸۰	ولتاژ شبکه / V
۵۰	فرکانس خط / Hz
۱*۱۰ <sup>۴</sup>	فرکانس سوئیچینگ / Hz
۳	اندوکتانس فیلتر / mH
۲	کاپاسیتانس فیلتر / $\mu$ F
۲۰۰۰	کاپاسیتانس فیلتر DC / $\mu$ F
۵۷۰	کاپاسیتانس شبکه منبع امپدانس / $\mu$ F
۱۰۰۰	اندوکتانس شبکه منبع امپدانس / $\mu$ H

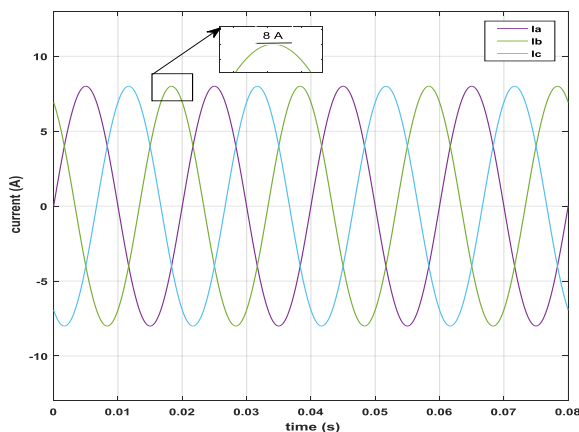
پارامترها و مقادیر سیستم PV در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه، با سری بستن ماژول های سیستم PV افزایش جریان را به دنبال داشته است و با موازی بستن ماژول ها افزایش ولتاژ را در سیستم فتوولتائیک نشان میدهد، در این مقاله از ۱۰ ماژول سری و ۲ ماژول موازی در سیستم PV استفاده شده است.

Table (5) system parameters

جدول (۵) پارامترهای PV

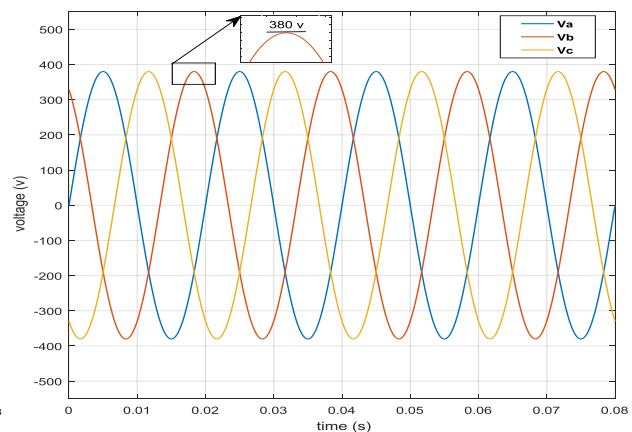
پارامترها	مقدار
ولتاژ / V	۳۷.۶
جریان / A	۷.۴۵
حداکثر ولتاژ نقطه توان / V	۳۱
حداکثر جریان نقطه توان / A	۸
تعداد ماژول های سری	۱۰
تعداد ماژول های موازی	۲

با توجه به خروجی اینورتر در سمت AC، شکل موج جریان و ولتاژ در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. آرایه تحت شدت نور  $21000 \text{ W/m}^2$ ، ولتاژ خروجی دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، تحت شدت های مختلف تابش خورشیدی است. هنگامی که دما ثابت است، ولتاژ خروجی آرایه ۳۸۰ ولت و جریان خروجی ۸ آمپر است.



شکل (۹): جریان خروجی سه فاز

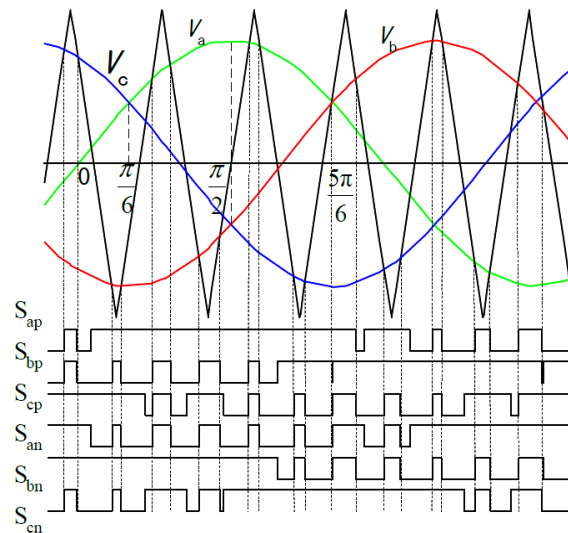
Figure (9): Three-phase output current



شکل (۱۰): ولتاژ خروجی سه فاز

figure (10): Three-phase output voltage

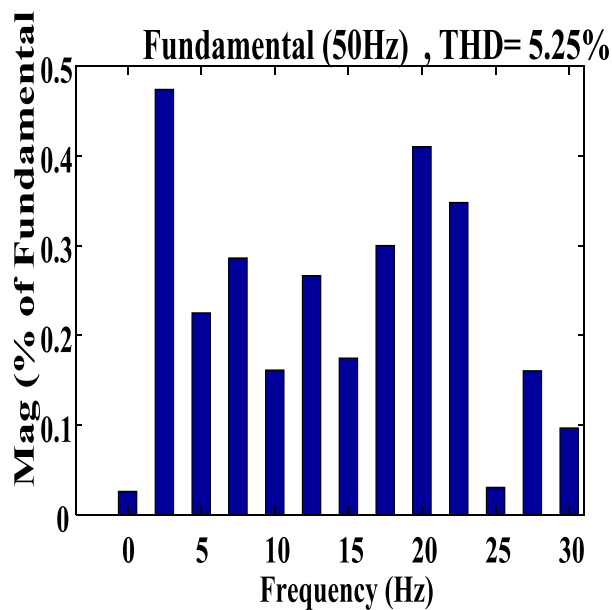
شکل موج خروجی برای تولید پالس های PWM در QZSI در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با مقایسه خطوط shoot-through با امواج مثلثی، پالس های مربوط به shoot-through ایجاد می شود که در آن موج مثلثی بزرگتر از پیک سینوسی مثبت و کوچکتر از پیک سینوسی منفی است، خروجی یک و در غیر این صورت خروجی صفر است. همچنین برای تولید پالس های حالت فعال، شکل موج سینوسی با سیگنال شکل موج مثلثی مقایسه می شود، در نتیجه در جایی که موج مثلثی بزرگتر از شکل موج سینوسی است، سیگنال خروجی یک و در غیر این صورت صفر است. در ادامه، پالس های تولید شده برای سوئیچینگ IGBT ها به اینورتر سه فاز منتقل می شوند.



شکل (۱۱): پالس‌های خروجی QZSI

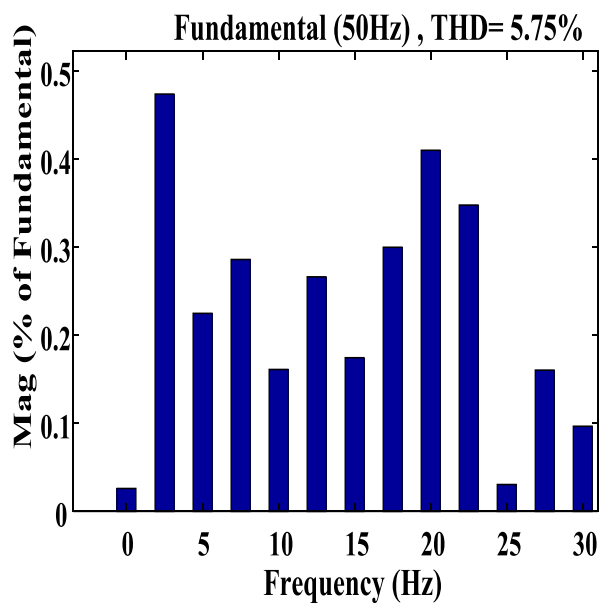
Figure (11): QZSI output pulses

همانطور که در شکل‌های زیر نشان داده شده است، محتویات هارمونیک سه کنترل‌کننده مختلف، تحت چندین هارمونیک ثبت و مقایسه می‌شود.



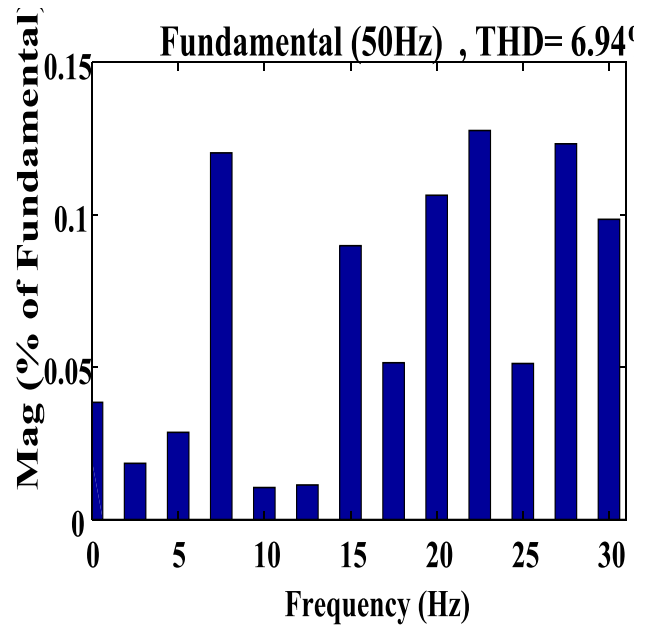
شکل (۱۲): هارمونیک خروجی الگوریتم ترکیبی

Figure (12): output harmonic of the Hybrid algorithm



شکل (۱۳): هارمونیک خروجی سیستم فازی

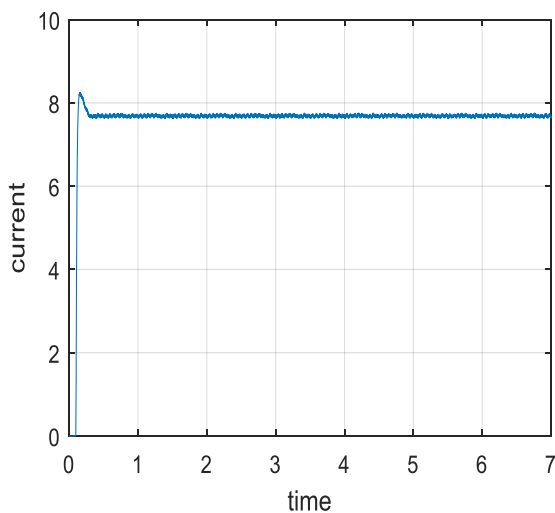
Figure (13): output harmonic of the fuzzy system



شکل (۱۴): هارمونیک خروجی با کنترلر PI  
Figure (14): harmonic output with PI controller

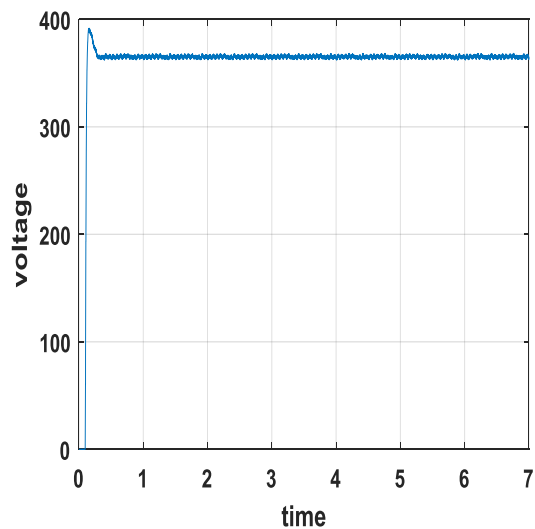
طبق نتایج بدست آمده در بالا ، THD خروجی اینورتر در سیستم FUZZY، الگوریتم ترکیبی و کنترلر PI به ترتیب ۵.۷۵ و ۵.۲۵ و ۶.۹۴ می باشند. نتایج نشان می دهد که استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک- مورچگان دارای کمترین مقدار THD و کمترین تأثیر را روی شبکه بزرگ برق در هنگام اتصال به شبکه دارد. در همین حال تأیید می شود که سیستم کنترلی الگوریتم ترکیبی نسبت به سیستم فازی در سرکوب هارمونیک ها برتری دارد.

با توجه به شکل های زیر، منحنی خروجی جریان و ولتاژ نشان داده شده است. در ابتدا با در مدار آمدن پانل ها یک بالا زدگی<sup>۱۱</sup> ولتاژ و جریان به وجود می آید. طبق شکل (۱۵) منحنی ولتاژ بعد از گذشت ۰.۲ ثانیه میرا می شود و با مقدار ۳۸۰ ولت به حالت پایدار خود میرسد. جریان راه اندازی در زمان ۰.۳ ثانیه میرا می شود و در نهایت با جریان ۸ آمپر به حالت پایدار می رسد که در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۱۶) منحنی خروجی جریان

Figure (16): current output curve



شکل (۱۵) منحنی خروجی ولتاژ

Figure (15): voltage output curve

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله از اینورتر منبع شبه امپدانس (QZSI) سه فاز با قابلیت shoot-through جهت تبدیل DC/AC و انتقال توان در سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. با توجه به تمرکز اصلی که کاهش هارمونیک می باشد، در این مقاله با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان، توانسته ایم مقادیر (پارامترهای) کنترلی PI را به گونه ای تنظیم کنیم که سیگنالهای مدولاسیون عرض پالس (PWM) را بهینه کند و با ساختن پالس های ایده ال برای (IGBT) های اینورتر، هارمونیک ها در سمت AC اینورتر را کاهش داده و با سیستم فازی مقایسه شده است. در مقایسه، استراتژی الگوریتم ترکیبی ژنتیک-مورچگان دارای کمترین مقدار (THD) و کمترین تأثیر را روی شبکه بزرگ برق در هنگام اتصال به شبکه دارد. طبق نتایج بدست آمده، الگوریتم ترکیبی نسبت به سیستم فازی در سرکوب هارمونیک ها برتری دارد و پیچیدگی ساختار کنترل را کاهش می دهد، که دارای ارزش مرجع خاصی در کاربردهای مهندسی می باشد. نتایج شبیه سازی در نرم افزار MATLAB/ Simulink توانایی سیستم پیشنهادی را در تبدیل توان به منظور بهبود کیفیت توان در سیستم فتوولتائیک را ثابت کرده است.

## Reference

## مراجع

- [1] S. Semeskandeh, M. Hojjat, and M. Hosseini-, "Improving the Efficiency of Floating Photovoltaic System in the Northern Part of Iran Using a Two-stage Multi-String Inverter," vol. 15, no. 57, pp. 85–98, 2024.
- [2] Jayachandran, J. & Malathi, S. Improved power quality buck boost converter for SMPS. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* **9**, 789 (2019).
- [3] Rahimi, K., Mohajeryami, S. & Majzooobi, A. Effects of photovoltaic systems on power quality. *NAPS 2016 - 48th North Am. Power Symp. Proc.* (2016) doi:10.1109/NAPS.2016.7747955.
- [4] Grycan, W., Brusilowicz, B. & Kupaj, M. Photovoltaic farm impact on parameters of power quality and the current legislation. *Sol. Energy* **165**, 189–198 (2018).
- [5] Zhang, X. P. & Yan, Z. Energy Quality: A Definition. *IEEE Open Access J. Power Energy* **7**, 430–440 (2020).
- [6] Jayaraju, G. & Rao, G. S. Intelligent controller based power quality improvement of microgrid integration of photovoltaic power system using new cascade multilevel inverter. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* **9**, 1514–1523 (2019).
- [7] Mahela, O. P. et al. Recognition of Power Quality Issues Associated With Grid Integrated Solar Photovoltaic Plant in Experimental Framework. *IEEE Syst. J.* **15**, 3740–3748 (2020).
- [8] Lamsal, D., Sreeram, V. & Mishra, Y. Reducing power fluctuations from wind and photovoltaic systems using discrete Kalman filter. *Proc. 2016 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2016* 1–5 (2016) doi:10.1109/AUPEC.2016.07749297.
- [9] Babu, N. P., Guerrero, J. M., Siano, P., Peesapati, R. & Panda, G. A Novel Modified Control Scheme in Grid-Tied Photovoltaic System for Power Quality Enhancement. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **68**, 11100–11110 (2021).
- [10] Rezvani, F., Mozafari, B. & Faghihi, F. Power quality analysis for Photovoltaic system considering unbalanced voltage. *Indian J. Sci. Technol.* **8**, (2015).
- [11] Elkholy, A. Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems. *Sol. Energy* **183**, 315–326 (2019).
- [12] Ortega, M. J., Hernández, J. C. & García, O. G. Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations. *Electr. Power Syst. Res.* **96**, 23–35 (2013).
- [13] Moghassemi, A., Hosseini, M. & Olamaei, J. Power Quality Improvement of Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Trans-Z-Source Inverter Under Partial Shading Condition. *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.* **44**, 1429–1447 (2020).
- [14] Yu, S., Zhang, L., Iu, H. H. C., Fernando, T. & Wong, K. P. A DSE-Based Power System Frequency Restoration Strategy for PV-Integrated Power Systems Considering Solar Irradiance Variations. *IEEE Trans. Ind. Informatics* **13**, 2511–2518 (2017).
- [15] A-Lsabouchi, A. et al. Standardized Procedure to Assess Actual Harmonic Emissions of Distributed Photovoltaic Plants. *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.* **2020–October**, 8–13 (2020).
- [16] Fan, Y., Zhou, Q., Wang, J., Mu, S. & Wang, L. N. Application of Superconducting-Magnetic-Energy-Storage-Based Current-Source Active Power Filter in Photovoltaics for Harmonic Mitigation. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31**, 8–11 (2021).

- [17] Chicco, G., Schlabbach, J. & Spertino, F. Characterisation and assessment of the harmonic emission of grid-connected photovoltaic systems. *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech* 1–7 (2005) doi:10.1109/PTC.2005.4524744.
- [18] Tadjer, S. A., Habi, I., Nadji, B. & Khelifi, F. Harmonics compensation system based on photovoltaic generator. *SPEEDAM 2012 - 21st Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion* 1119–1122 (2012) doi:10.1109/SPEEDAM.2012.6264596.
- [19] Pandey, S., Yadav, R. S., Singh, S. P. & Upadhyay, K. G. A Remedy for Elimination of Harmonics in Solar Integrated Grid System. *2018 Int. Conf. Comput. Charact. Tech. Eng. Sci. CCTES 2018* 143–147 (2019) doi:10.1109/CCTES.2018.8674074.
- [20] Kulka, A. & Undeland, T. Voltage Harmonic Control of Z-source Inverter for UPS Applications. 657–662 (2008).
- [21] Schlabbach, J. Harmonic current emission of photovoltaic installations under system conditions. *2008 5th Int. Conf. Eur. Electr. Mark. EEM* (2008) doi:10.1109/EEM.2008.4579000.
- [22] Çelebi, A. & Çolak, M. The effects of harmonics produced by grid connected photovoltaic systems on electrical networks. *Univ. Power Eng. Conf. Proc.* (2016).
- [23] De Oliveira, P. S., Lima, M. A. A., Cerqueira, A. S., Duque, C. A. & Ferreira, D. D. Harmonic analysis based on scica at PCC of a grid-connected micro solar PV power plant. *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP 2018-May*, 1–6 (2018).
- [24] Mahela, O. P. *et al.* Recognition of Power Quality Issues Associated With Grid Integrated Solar Photovoltaic Plant in Experimental Framework. *IEEE Syst. J.* **15**, 3740–3748 (2020).
- [25] Ellabban, O. & Abu-Rub, H. Z-Source Topology Improvements. *IEEE Ind. Electron. Mag.* **39**, 504–510 (2016).
- [26] H. Compensation and M. Voltage, “Harmonic Compensation and Micro-Grid Voltage and Frequency Control based on,” vol. 14, no. 53, pp. 33–60, 2023.
- [27] Moghassemi, A., Padmanaban, S., Ramachandaramurthy, V. K., Mitolo, M. & Benbouzid, M. A Novel Solar Photovoltaic Fed TransZSI-DVR for Power Quality Improvement of Grid-Connected PV Systems. *IEEE Access* **9**, 7263–7279 (2021).
- [28] Akshath, N. S. S. *et al.* Analysis and simulation of even-level quasi-Z-source inverter. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* **12**, 3477–3484 (2022).
- [29] Ge, B. *et al.* An Active Filter Method to Eliminate DC-Side Low-Frequency Power for a Single-Phase Quasi-Z-Source Inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **63**, 4838–4848 (2016).
- [30] M. Mohammadzamani, M. Moazzami, A. Professor, and I. Sadeghkhan, “Voltage THD Minimization in Multilevel Cascade Inverters Using Repetitive Quadratic Programming,” *JIPET J. Intell. Proced. Electr. Technol.*, vol. 12, no. 48, pp. 31–42, 2022.
- [31] T. Hou, C. Y. Zhang, and H. X. Niu, “Quasi-Z Source Inverter Control of PV Grid-Connected Based on Fuzzy PCI,” *J. Electron. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 274–286, 2021, doi: 10.1016/j.jnlest.2020.100021.

زیر نویس ها:

1. Power quality
2. Total harmonic distortion
3. Photovoltaic systems
4. Point common connection
5. Pulse width modulation
6. Quasi-Z-source inverter
7. Proportional-integral controller
8. shoot-through
9. Non shoot-through
10. Maximum power point tracking
11. Over Shoot