Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 4, 2025
pp. 37-50
Research Paper

Voltage Harmonic Reduction in Grids by PV Panels with Extremum Seeking Control and Particle Swarm Optimization

Masoud Tababtabaei [1], Seyed Mohammad Madani[*2], Mohsen Mojiri[3]

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[2] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[3] Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract:

Using photovoltaic systems in power systems presents a significant opportunity to improve power quality in these grids. This paper proposes a novel approach to reduce voltage harmonics in the grid by leveraging the free capacity of photovoltaic systems. The proposed approach employs Extremum Seeking Control, known for its maturity and ease of implementation. To mitigate voltage harmonics at the Point of Common Coupling, photovoltaic systems inject harmonic currents of appropriate magnitude and phase, ensuring that the injected current amplitude does not exceed the required value of the grid and local loads. The parameter-tuning of Extremum-Seeking-Control, to minimize voltage harmonics, is achieved using a Particle Swarm Optimization algorithm. Simulations are used to assess the effectiveness of this approach. It is noteworthy that this method does not require prior knowledge of the harmonic content of local and grid load currents. The proposed approach achieves a noticeable mitigation in the voltage harmonics of the Point of Common Coupling.

Keywords: Extremum Seeking Control, Harmonic, Photovoltaic, PSO.

https://doi.org/10.22108/ISEE.2025.140901.1679

مقاله پژوهشی

کاهش هارمونیک شبکه توسط سیستم‌های فتوولتائیک با کنترلر جست‌وجوی اکسترموم و بهینه‌سازی اجتماع ذرات

مسعود طباطبایی جبلی[۱]، سید محمد مدنی[۲*]، محسن مجیری[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
masoud.tabatabaei@eng.ui.ac.ir

۲- دانشیار، گروه برق، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
m.madani@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
mohsen.mojiri@cc.iut.ac.ir

چکیده: به‌کارگیری سیستم‌های فتوولتاییک در سیستم قدرت فرصتی مهم برای تضمین کیفیت توان در آن‌هاست. این مقاله یک رویکرد جدید برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ در شبکه با استفاده از ظرفیت آزاد موجود سیستم‌های فتوولتاییک ارائه می‌کند. راهبرد پیشنهادی از کنترلر جست‌وجوی اکسترموم استفاده می‌کند که به دلیل بلوغ و سهولت اجرا شناخته شده است. برای جبران ولتاژ هارمونیک نقطهٔ اتصال، در سیستم فتوولتائیک جریانی هارمونیک با اندازه و فاز مناسب تزریق می‌شود؛ به گونه‌ای که دامنهٔ جریان تزریقی بیشتر از مقدار مورد نیاز شبکه و بار محلی نشود. تنظیم پارامترهای کنترلر جست‌وجوی اکسترموم برای کمینه کردن هارمونیک ولتاژ در ولتاژ نقطهٔ اتصال به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات انجام می‌شود. برای بررسی اثربخشی این تکنیک از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. گفتنی است، این روش نیازی به اطلاع قبلی از محتویات هارمونیک جریان بارهای محلی و شبکه ندارد. رویکرد پیشنهادی به بهبود جالب توجه در میزان اعوجاج هارمونیکی ولتاژ نقطهٔ اتصال دست می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: هینه‌سازی اجتماع ذرات، جست‌وجوی اکسترموم، فتوولتائیک، هارمونیک.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی یک راه اثبات‌شدهٔ اقتصادی برای تولید برق است که به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. در شرایطی که نور خورشید وجود ندارد (مانند شب‌ها) یا شدت نور خورشید کم است، ظرفیت اینورترهای خورشیدی می‌تواند با هدف کاهش جریان‌های هارمونیک، به ویژه در حضور بارهای غیرخطی به کار گرفته شود. این امر در عصر کنونی که بارهای غیرخطی بسیار متداول هستند، اهمیت بسیاری دارد.

مشکلات کیفیت توان به طرزی جالب توجه هم بر شبکه و هم بر مصرف‌کننده تأثیر نامطلوب می‌گذارند. به‌تازگی، بارهای غیرخطی رشدی جالب توجه داشته‌اند. جریان غیرخطی بارها شکل موج ولتاژ را غیرسینوسی می‌کند که ممکن است برای بارهای دیگر متصل به شبکه مضر باشد. به طور سنتی، هارمونیک‌ها در سیستم‌های توزیع توسط فیلترهای اکتیو متمرکز یا فیلترهای غیراکتیو کاهش

[۱] تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
نام نویسندهٔ مسئول: سید محمد مدنی
نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه برق

می‌یابند که راهبردهای کنترل تک‌هدفه دارند و در دنیای اقتصاد امروزی ناکارآمد تلقی می‌شوند [۱]، [۲].

میکروگریدها از منابع انرژی گوناگونی مانند توربین‌های بادی، پانل‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی، توربین‌های گازی کوچک، ادوات ذخیره‌ساز انرژی مانند فلای‌ویل، خازن‌های ظرفیت بالا و باتری‌ها و همچنین انواع بارها تشکیل شده‌اند که ممکن است به بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت توان منجر شوند [۳].

این مقاله با توجه به نفوذ فزایندهٔ منابع خورشیدی یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی زاویهٔ تزریق هارمونیک جریان برای کمینه کردن هارمونیک‌های ولتاژ شبکه در یک مبدل فتوولتاییک ارائه می‌کند. روش پیشنهادی ساده است و به دانش گستردهٔ پارامترهای سیستم نیاز ندارد که آن را به یک راه‌حل مناسب برای کاهش اعوجاج هارمونیک در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر تبدیل می‌کند. در این مقاله، پس از مروری بر پیشینهٔ موضوع در بخش دوم، روش پیشنهادی به تفصیل در بخش سوم بررسی می‌شود. ارائهٔ نتایج مدل‌سازی در یک شبکهٔ تست موضوع بخش چهارم است و جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش پایانی ارائه می‌شود.

۲- مروری بر پیشینهٔ موضوع

۲-۱- روش‌های جبران‌سازی هارمونیک

روش‌های جبران‌سازی هارمونیک بر دو نوع کلی فیلتر اکتیو و امپدانس مجازی قابل تقسیم هستند. فیلتر اکتیو با کنترل مستقیم توان یا تولید مرجع[۱] قابل اجراست. روش امپدانس مجازی از روش‌های کنترل مبتنی بر ولتاژ (VCM)[۲]، کنترل مبتنی بر جریان (CCM)[۳] یا ترکیبی قابل اجراست. این روش‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) مقایسه شده‌اند. روش‌های مبتنی بر امپدانس مجازی دارای ارجحیت نسبت به روش‌های فیلتر اکتیو هستند و در میان روش‌های امپدانس مجازی، اگرچه روش‌های هیبریدی مناسب هستند، روش‌های مبتنی بر ولتاژ از سادگی اجرا و مزایای بیشتر در برابر روش‌های مبتنی بر جریان برخوردار هستند و از این رو، در روش پیشنهادی مقالهٔ کنونی استفاده می‌شوند.

جدول (۱): مقایسه معایب روش‌های جبران‌سازی

جبران‌سازی	روش کنترل	معایب
فیلتر اکتیو	کنترل مستقیم توان	– زمان محاسباتی جالب توجه، – گسترهٔ کاربرد محدود، – فرکانس سوئیچینگ زیاد.
	تولید مرجع	–گران، – حجیم و نیازمند نگهداری منظم.
امپدانس مجازی	کنترل مبتنی بر جریان	– تغییرات زیاد فرکانس سوئیچینگ، – نیازمند نگهداری منظم.
	کنترل مبتنی بر ولتاژ	–جریان گردشی بین DGها، – حساسیت به شرایط شبکه، – تنظیم دشوار پارامترها.
	ترکیبی	– نیازمند اصلاح توپولوژی شبکه، – چالش در اتصال اینورترها.

جدول (۲): مقایسهٔ محاسن روش‌های جبران‌سازی

جبران‌سازی	روش کنترل	محاسن
فیلتر اکتیو	کنترل مستقیم توان	–اجرای آسان – کاهش تلفات سوئیچینگ، – کنترل ساده، – انعطاف‌پذیری.
	تولید مرجع	– سطح پایین اعوجاج جریان، – مناسب برای کاربردهای بلادرنگ که نیاز به پاسخ‌گویی سریع دارند.
امپدانس مجازی	کنترل مبتنی بر جریان	– مناسب برای حالت متصل به شبکه، – امکان کنترل دقیق، – کاهش افت ولتاژ، – کاهش حساسیت پارامترها، – انعطاف‌پذیری.
	کنترل مبتنی بر ولتاژ	– مناسب حالت متصل به شبکه و جزیره ای، – قابلیت تشکیل شبکه، – انتقال نرم بین حالت‌ها، – عدم نیاز به ارتباط بین DGها برای اشتراک تقاضای بار.
	ترکیبی	– بی‌نیاز از اندازه‌گیری جریان، – هزینهٔ اجرای کمتر.

۲-۲- استفاده از سیستم فتوولتائیک در کاهش هارمونیک

بیشتر تولیدات پراکنده با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می‌شوند که قابلیت ارائهٔ خدمات جانبی برای جبران‌سازی هارمونیک‌ها را دارند. این موضوع به ویژه در رابطه با سیستم فتوولتاییک بیشتر صادق است؛ زیرا این تولیدات پراکنده همیشه با ظرفیت کامل خود کار نمی‌کنند و بنابراین، می‌توان از ظرفیت آزاد باقی‌مانده برای خدمات جانبی بدون هیچ هزینهٔ اضافی استفاده کرد. همچنین، به عنوان یک مزیت، این ادوات الکترونیک توانایی پاسخ‌دهی سریع را دارند که ناشی از کنترلرهای دیجیتال و فیدبک‌های مربوط است [۴].

مرجع [۵] تأثیر زاویهٔ تزریق هارمونیک ولتاژ بر هارمونیک‌های جریان شبکه با استفاده از سیستم فتوولتاییک را بررسی کرده است. در ابتدا، یک عبارت ریاضی کلی توسط نتایج تجربی برای سطوح خروجی مختلف تبدیل‌کننده و خواص شبکه و تزریق هارمونیک ولتاژ در اندازه‌ها و مرتبه‌های مختلف اثبات شده است. از آنجا که این عبارت یک تابع محدب[۴] است، یک زاویهٔ تزریق بهینه وجود دارد که در کمینه کردن کلیهٔ هارمونیک‌های جریان در همان فرکانس کمک می‌کند. ایدهٔ مطرح‌شده در این مرجع جالب است؛ اما به هر روی، نیازمند اندازه‌گیری‌های بسیار به منظور تطبیق پارامترهای کنترلی است. علاوه بر این، با تغییر شرایط شبکه ممکن است لازم باشد با اندازه‌گیری‌های جدید تنظیمات دوباره انجام شوند.

مرجع [۶] بر استفاده از فیلترهای فعال تمرکز دارد و تزریق هارمونیک‌های ولتاژ را در زوایا و اندازه‌های ویژه برای جبران اعوجاج هارمونیک پیشنهاد می‌کند. استفاده از فیلترهای فعال گران قیمت است و با تغییرات شبکه نیازمند تنظیماتی جدید هستند. علاوه بر این، در برخی از موارد ممکن است سبب تداخلاتی با تجهیزات الکترونیکی دیگر شوند؛ از این رو، باید در پی راه‌کارهایی اقتصادی‌تر مانند منابع خورشیدی بود.

امپدانس خازنی مجازی برای جبران جریان هارمونیکی و جبران‌سازی توان راکتیو می‌تواند به کار برده شود [۷].

لازم به توضیح است، تولیدات پراکندهٔ مبتنی بر اینورتر را می‌توان در فرکانس‌های هارمونیکی به گونه‌ای کنترل کرد تا جبران‌سازی هارمونیک را نیز فراهم کنند. این روش که امپدانس مجازی خوانده می‌شود می‌تواند بدون هیچ‌گونه نیازی به اتصال اجزای اضافی به شبکه، مانند امپدانس واقعی عمل کند. این امپدانس می‌تواند مقاومت (مقاومت مجازی بدون تلفات)، سلف یا ترکیبی از هر دو باشد. همچنین، امپدانس مجازی می‌تواند در فرکانس اصلی یا هارمونیکی باشد. در عملکرد فرکانس اصلی، از امپدانس مجازی می‌توان برای کنترل پخش توان و همچنین تداوم کار شبکه در هنگام بروز اختلالات شبکه استفاده کرد. در فرکانس‌های هارمونیکی نیز می‌توان برای میرا کردن و جبران‌سازی هارمونیکی از امپدانس مجازی استفاده کرد. برای کاهش هارمونیک‌ها می‌توان امپدانس مجازی را با تغییر جریان یا ولتاژ مرجع و به دنبال آن تغییر سیگنال PWM محقق کرد. بر این اساس، پارامترهای کنترلی به شرایط شبکه حساس هستند. علاوه بر این، تنظیم پارامترها بسیار دشوار است. این موضوع سبب می‌شود امپدانس خازنی مجازی در روش پیشنهادی در [۷] با تغییر شرایط شبکه مناسب نباشد. این موضوع سبب می‌شود بهره‌برداری روش پیشنهادی بسیار گران‌تر باشد.

کنترل سیستم فتوولتاییک به عنوان یک جبران‌کنندهٔ استاتیک توزیع‌شده[۵] که با کنترل جریان اکتیو و حلقهٔ کنترل پیش‌خور عمل کند، در [۸] ارائه شده است. علاوه بر تزریق توان حقیقی به شبکه، کنترل سیستم فتوولتاییک پیشنهادی به صورت خودکار به یک DSTATCOM تبدیل می‌شود تا خدمات جانبی مختلفی از جمله کاهش هارمونیک جریان منبع، جبران‌سازی جریان راکتیو بار، کاهش مؤلفهٔ توالی صفر و اصلاح ضریب قدرت را نیز انجام دهد. این سیستم به طور دقیق مؤلفه‌های متعامد جریان را استخراج می‌کند. این سیستم بهرهٔ زیاد در هارمونیک سوم را به کار

می‌گیرد و در نتیجه، خطاهای ثابت در حلقهٔ کنترل جریان مبدل سیستم فتوولتاییک را کاهش می‌دهد و تعادل سریع توان بین سیستم فتوولتاییک و شبکه را تأمین می‌کند. اشکال اصلی این روش گرانی تجهیز پیشنهادی است و سبب می‌شود توجیه اقتصادی طرح کاهش یابد. اگر بتوان در سیاست‌های پرداخت به منابع تجدیدپذیر، اصلاحاتی را انجام داد تا مشارکت در بهبود کیفیت توان به افزایش درآمدهای آنان منجر شود، ممکن است طرح پیشنهادی در [۸] اجرایی باشد.

در [۹]، نوعی FACTS با نام کنترل‌کنندهٔ یکپارچهٔ کیفیت توان (UPQC)[۶] مبتنی بر منابع پراکنده ارائه شده است که تولید انرژی سیستم فتوولتاییک را با یک تنظیم‌کنندهٔ کیفیت توان به شبکه تزریق می‌کند و بارهای متصل به یک سیستم توزیع سه‌فاز چهارسیمهٔ محلی را تغذیه می‌کند تا به مصرف‌کنندگان مناطق روستایی یا دورافتاده که توسط یک فاز تغذیه می‌شوند، خدمت‌رسانی کند. علاوه بر تزریق توان حقیقی به شبکه، شاخص‌های کیفیت توان مانند بیش‌بود[۷] و کم‌بود[۸] ولتاژ، هارمونیک ولتاژ شبکه و ضریب توان را نیز بهبود می‌بخشد. در سیستم کنترل مدنظر با استفاده از یک کنترل‌کنندهٔ چندحلقه‌ای تناسبی - انتگرالی، کنترل ولتاژ آرایهٔ فتوولتاییک به طور مؤثر انجام می‌شود. لازم به توضیح است، کارآیی UPQC در جبران اختلالات ولتاژ و جبران هارمونیک‌های جریان به‌شدت به الگوریتم تولید ولتاژ مرجع و جریان بستگی دارد. علاوه بر این، همگام‌سازی جریان منبع با ولتاژ آن نیز ضروری است که از طریق تخمین دقیق فرکانس تغذیه به دست می‌آید [۱۰].

این موضوع سبب می‌شود منطق کنترلی پیچیده شود که به نوبهٔ خود سبب افزایش هزینهٔ بهره‌برداری (نگهداری و تعمیرات) از این سیستم می‌شود.

یک UPQC چندفازی جدید در [۱۱] پیشنهاد شده است که رابط‌هایی را برای پنل‌های فتوولتاییک و برای ذخیرهٔ انرژی در باتری‌ها در نظر می‌گیرد و قادر است مشکلات کیفیت توان را در ولتاژها (در سمت بار) و جریان‌ها (در سمت شبکه) برطرف کند؛ در عین حال، این ساختار تزریق انرژی به شبکه (از پنل‌های فتوولتاییک یا باتری‌ها) یا شارژ را امکان‌پذیر می‌کند. مشکل اصلی این پیشنهاد سرمایه‌گذاری زیاد به سبب استفاده از باتری‌هاست. علاوه بر این، منطق کنترلی پیشنهادی بسیار پیچیده است که استفاده از آن را دشوار می‌کند.

۲-۳- روش کنترلر جست‌وجوی اکسترموم

روش‌های کنترل تطبیقی بیشتر برای ردیابی یک متغیر در مسیرهای مرجعِ شناخته‌شده یا تنظیم به نقاط شناخته‌شده توسعه یافته‌اند. کنترلر جست‌وجوی اکسترموم یک روش کنترل تطبیقی است که به دنبال بهینه‌سازی یک معیار عملکرد با تنظیم پارامتر کنترل به صورت زمان واقعی[۹] است. معیار عملکرد استفاده‌شده در این مقاله مقدار مؤثر ولتاژ (شامل مؤلفه‌های هارمونیک) است. در سیستم‌هایی با پارامترهای ناشناخته، ESC می‌تواند عملکردی بسیار خوب داشته باشد و یک تابع بهینه‌سازی را در نهایت حفظ کند. دو دستهٔ اصلی

از ESC وجود دارند که عبارت‌اند از: رویکردهای مبتنی بر مدل و مبتنی بر اغتشاش [۱۲]. ESC به منظور جست‌وجو و دست‌یابی به مقادیر بیشینه یا کمینهٔ یک تابع مدنظر در سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شود. این روش کنترلی در مواردی که تابع هدف یا سیگنال مدنظر به صورت تحلیلی در دسترس نیست یا غیرخطی و پیچیده است، استفاده می‌شود. از آنجا که این الگوریتم بر مبنای اصل بهینه‌سازی تصادفی[۱۰] عمل می‌کند، بسیار سودمند است.

این روش با استفاده از سیگنال بازخورد و تغییرات کوچک در ورودی سیستم، سعی می‌کند تا بهینه‌سازی پارامترهای سیستم را انجام دهد. هدف اصلی آن پیدا کردن نقطه‌ای است که تابع هدف خود را بیشینه یا کمینه می‌کند. برای این منظور، سیستم ESC اطلاعات بازخورد را از مقادیر عملکرد دریافت و سیگنال کنترلی را تنظیم می‌کند تا به مقدار بهینه هدایت شود. مزیت اصلی استفاده از ESC در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی معمول این است که نیازی به دانش زیاد از سیستم و مدل آن ندارد و توانایی تطبیق با سیستم‌های پیچیده و غیرخطی را دارد. به طور کلی، ESC راهبرد کنترلی قدرتمندی است که برای دست‌یابی به بهینه‌سازی در سیستم‌های پیچیده و غیرخطی استفاده می‌شود.

روش ESC گرادیان تابع هدف را برای محاسبهٔ اقدامات کنترل بعدی بازسازی می‌کند. روش‌های معمول کنترل تطبیقی برای سیستم‌های خطی و غیرخطی فقط برای دست یافتن به نقاط تنظیم یا مسیرها[۱۱]ی شناخته‌شده قابل استفاده هستند. در برخی از کاربردها، نگاشت مرجع به خروجی یک نقطهٔ بیشینه دارد (بدون کاستی از کلیت، فرض می‌کنیم بیشینه است) و هدف، انتخاب نقطهٔ تنظیم است تا خروجی در مقدار بیشینه باقی بماند. عدم قطعیت در نگاشت مرجع به خروجی، لزوم استفاده از نوعی تطبیق را برای یافتن نقطهٔ تنظیم که خروجی را بیشینه می‌کند، الزامی می‌کند. این مسئله به «کنترل بیشینه» یا «کنترل خودبهینه» معروف است که در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بسیار محبوب بود.

تنظیم و ردیابی حالات سیستم تا نقطهٔ تنظیم یا مسیر بهینه از وظایف معمول در مهندسی کنترل است؛ با این حال، گاهی اوقات انتخاب بهینهٔ این نقاط تنظیم دشوار است، یا با شرایط محیطی تغییر می‌کنند. ESC نوعی از طرح‌های کنترل تطبیقی است که می‌تواند بر اساس اندازه‌گیری خروجی عملکرد یا گرادیان آن، نقاط تنظیم بهینه را به صورت آنلاین جست‌وجو کند. ESC را می‌توان به عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی در نظر گرفت و بسیاری از طرح‌های استفاده‌شده در ESC از الگوریتم‌های بهینه‌سازی منتقل می‌شوند؛ با این حال، برخی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی را نمی‌توان به‌راحتی در چارچوب ESC گنجاند؛ به این دلیل که مشکلات عملی، مانند پایداری، نویز، زمان تنظیم، بهرهٔ کنترل و محدودیت نوسان، از استفاده از برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی از زمینهٔ ESC جلوگیری می‌کنند؛ بنابراین، مطالعه بر روی ترکیب مناسب الگوریتم‌های ESC و بهینه‌سازی هم در حوزهٔ آکادمیک و هم در حوزهٔ صنعتی بسیار مورد توجه است [۱۳] و این مقاله تلاش در این زمینه خواهد بود.

پارامترهای ESC می‌توانند از طریق روش‌های مختلفی تنظیم شوند. در ادامه، چند رویکرد متداول آورده شده‌اند.

۲-۳-۱- تنظیم دستی

در تنظیم دستی، پارامترهای کنترلی بر اساس دانش و تجربهٔ طراح سیستم کنترلی تنظیم می‌شوند. فرایند تنظیم شامل تنظیم مجدد پارامترها و مشاهدهٔ پاسخ سیستم است تا عملکرد مطلوب حاصل شود. این روش نیازمند درک خوب از دینامیک سیستم و اصول کنترل آن است.

۲-۳-۲- روش آزمون و خطا

این روش شامل امتحان سیستماتیک مقادیر مختلف پارامترها و ارزیابی پاسخ دریافتی از سیستم است؛ در نتیجه، با مشاهدهٔ رفتار سیستم، پارامترها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که عملکرد قابل قبول حاصل شود. معمولاً به چندین آزمون تکراری برای یافتن مقادیر بهینهٔ پارامترها نیاز است.

۲-۳-۳- شناسایی سیستم

تکنیک‌های شناسایی سیستم می‌توانند برای تخمین دینامیک و شناسایی پارامترهای بهینهٔ ESC استفاده شوند. با جمع‌آوری داده‌ها از سیستم و تحلیل پاسخ آن، مدل‌های ریاضی توسعه داده یا شناسایی می‌شوند. این مدل‌ها سپس می‌توانند برای تعیین پارامترهای مناسب استفاده شوند.

۲-۳-٤- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان برای جست‌وجوی خودکار مقادیر بهینهٔ پارامترها استفاده کرد. این الگوریتم‌ها از روش‌های بهینه‌سازی مانند روش‌های مبتنی بر گرادیان، الگوریتم‌های تکاملی یا بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)[۱۲] برای جست‌وجوی فضای پارامتر استفاده می‌کنند و مقادیری را مشخص می‌کنند که به عملکرد بهینهٔ تابع هدفی منجر شوند که از پیش تعیین شده است. این روش در مقابل روش‌های دستی، نتایجی کارآمدتر را ارائه می‌دهد.

۲-٤- الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات از نظر مفهومی ساده و اجرای آن آسان است [۱۴] . این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده با تعداد زیادی متغیر مؤثر و بسیار انعطاف‌پذیر است. آن را می‌توان به‌راحتی برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی با توابع مختلف هدف و قیدها تنظیم کرد و معمولاً سریع‌تر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی مانند الگوریتم ژنتیک همگرا می‌شود. این موضوع سبب شده است در موضوع‌های مختلف، مانند مکان‌یابی بهینهٔ «واحدهای اندازه‌گیری فازوری» (PMUs)[۱۳] [۱۵]، برنامه‌ریزی بهینهٔ جزیره‌سازی در میکروگرید [۱۶]، جایابی بهینهٔ منابع کنترل توان راکتیو و بررسی آسیب‌پذیری سیستم انتقال [۱۷، ۱۸] استفاده شوند.

در این الگوریتم بهینه‌سازی، برای هر ذره در توده دو مؤلفهٔ موقعیت (x) و سرعت (v) در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات هر ذره در توده با این دو مؤلفه به صورت منحصربه‌فرد در فضای دوبُعدی تعیین می‌شود. بهترین تجربه برای موقعیت هر ذره با یک بردار ($pbest$) مشخص می‌شود. از سوی دیگر، بهترین تجربه برای موقعیت توده نیز با یک بردار دیگر ($gbest$) تعیین می‌شود. بر این اساس، لازم است موقعیت هر ذره نسبت به هدف اصلی که در واقع تابع هدف مورد بهینه‌سازی است، با این مؤلفه‌ها به‌روز شود. سرعت ذرهٔ iام در تکرار (k+۱)ام را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 \times (pbest_i - S_i^k) + c_2 r_2 \times (gbest_i - S_i^k) \quad (۱)$$

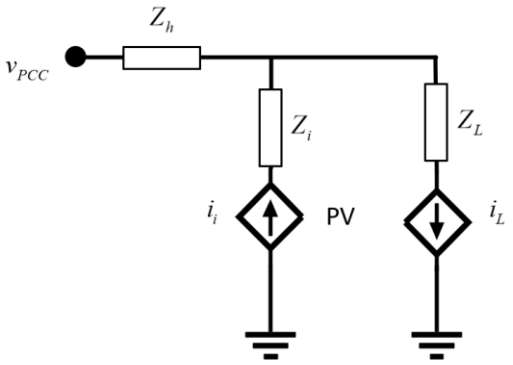
از آنجا که الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک روش تکراری است، در این رابطه به‌خوبی وابستگی سرعت هر ذره در مرحله از تکرارها به بهترین موقعیت و سرعت ذره‌های دیگر و نیز به بهترین موقعیت و سرعت خودش در تکرارهای پیشین نشان داده شده است. در این رابطه، نقش اعداد تصادفی با r_1 و r_2 مشخص شده است. دیگر پارامترهایی که در این رابطه نشان داده شده‌اند، برای وزن‌دهی هستند؛ w تابع وزن‌دهی است و c_1 و c_2 ضرایب وزن‌دهی هستند. موقعیت پیشین هر ذره در تکرار پیشین با S_i^k در فرمول‌بندی منظور شده است. c_1 ضریب شناختی[۱۴] را نشان می‌دهد که بر میزان تأثیر تجربهٔ ذره (بهترین موقعیتی که تا کنون پیدا کرده است) بر

حرکت آن تأثیر می‌گذارد. c_2 ضریب اجتماعی[۱۵] را نشان می‌دهد که بر میزان تأثیر بهترین تجربهٔ گروه (بهترین موقعیتی که توسط هر ذره‌ای پیدا شده است) بر حرکت آن تأثیر می‌گذارد.

در بخش سوم، در رابطه با چگونگی استفاده از PSO در روش پیشنهادی به‌تفصیل صحبت خواهد شد.

۳- روش پیشنهادی

برای مقابله با اثرات نامطلوب بارهای غیرخطی که جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک ایجاد می‌کنند، یک جریان هارمونیکی مناسب تزریق می‌شود که دارای حداکثر اندازهٔ ممکن و فازی مخالف جریان هارمونیکی بارهای غیرخطی مدنظر است. این تکنیک به تزریق جریان هارمونیک معروف است. مفهوم پیشنهادی به صورت مداری در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن، جبران هارمونیک با تزریق جریان مخالف به منظور کاهش هارمونیک ولتاژ نقطهٔ اتصال به شبکه در شبکهٔ معادل توضیح داده شده است.



شکل (۱): مفهوم پیشنهادی جبران هارمونیک با تزریق جریان مخالف به منظور کاهش مقدار مؤثر ولتاژ

۳-۱- فرمول‌بندی تابع هدف

هنگام اتصال سیستم فتوولتاییک به شبکه به منظور جبران‌سازی ولتاژ هارمونیکی، فرض بر این است که اندازه و فاز جریان هارمونیکی بار به‌ازای هر هارمونیک، مقداری نامعلوم است. از طرفی، مقادیر امپدانس بار و همچنین اندوکتانس پشت شبکهٔ واقعی نیز مجهول هستند. می‌توان سیستم فتوولتاییک را به گونه‌ای تنظیم کرد تا با تزریق یک جریان هارمونیکی به PCC، بیشترین کاهش در ولتاژ هارمونیکی ایجاد شود. گفتنی است، با جبران‌سازی ولتاژ هارمونیکی، پروفایل ولتاژ در نقطهٔ PCC (v_{PCC}) که به‌صورت معادلهٔ زمانی در رابطهٔ (۲) برحسب ولتاژ هر هارمونیک (v_{2k-1}) تعریف می‌شود، وضعیتی مطلوب‌تر پیدا خواهد کرد[۱۶]:

$$v(t) = v_{PCC}(t) = \sum_{k\in\mathbb{N}} v_{2k-1}(t) \qquad (۲)$$

با تعریف فازور ولتاژ هارمونیکی به صورت $\boldsymbol{V}_h \triangleq V_h \angle\theta_h$، رابطهٔ (۲) به صورت (۳) بازنویسی خواهد شد:

$$V_{PCC}^2 = \sum_{h=2k-1, k\in\mathbb{N}} V_h^2 \qquad (۳)$$

که در آن، V_h اندازهٔ ولتاژ هارمونیک h و برابر است با:

$$V_h = Z_h(I_{ih} - I_{Lh}) \qquad (٤)$$

$$\boldsymbol{I}_{ih} \triangleq I_{ih}\angle\theta_{ih} \qquad (٥)$$

$$\boldsymbol{I}_{Lh} \triangleq I_{Lh}\angle\theta_{Lh} \qquad (٦)$$

$$\boldsymbol{Z}_h \triangleq Z_h\angle\gamma_h \qquad (٧)$$

$$V_h^2 = Z_h^2|\boldsymbol{I}_{ih} - \boldsymbol{I}_{Lh}|^2 \qquad (٨)$$

$$V_h^2 = Z_h^2\{I_{ih}^2 + I_{Lh}^2 - 2I_{ih}I_{Lh}\cos(\theta_{ih} - \theta_{Lh}) \qquad (٩)$$

که در آن، $\boldsymbol{I}_{ih}$ و $\boldsymbol{I}_{Lh}$ به‌ترتیب فازور جریان هارمونیکی منبع و بار هستند. $\boldsymbol{Z}_h$ نیز امپدانس هارمونیکی است.

اکنون، اگر فرض شود تابع هدف (J) تغییرات ولتاژ نقطهٔ PCC باشد، روابط زیر به دست خواهند آمد:

$$J^2 = \Delta V_h^2 = Z_h^2\Delta|\boldsymbol{I}_{ih} - \boldsymbol{I}_{Lh}|^2 \qquad (١٠)$$

$$\begin{aligned}\Delta|I_{ih} - I_{Lh}|^2 = {} & 2I_{ih0}\Delta I_{Lh} \\ & - 2I_{Lh0}\cos(\theta_{Lh} - \theta_{ih})\Delta I_{ih} \\ & + 2I_{ih0}I_{Lh0}\sin(\theta_{Lh} - \theta_{ih})\Delta\theta_{ih}\end{aligned} \qquad (١١)$$

با فرض ثابت بودن I_{ih} و در نتیجه ΔI_{ih}=۰، می‌توان نوشت:

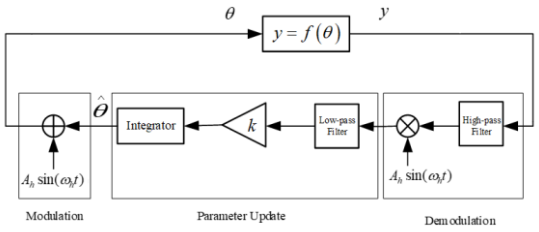
$$\Delta |I_{ih} - I_{Lh}|^2 = 2I_{ih0}I_{Lh0}\sin(\theta_{Lh} - \theta_{ih})\Delta\theta_{ih} \qquad (۱۲)$$

$$\Delta |I_{ih} - I_{Lh}|^2 = 2I_{ih0}I_{Lh0}\sin(\theta_{Lh} - \theta_{ih}) \times A_h \sin(\omega_h t) \qquad (۱۳)$$

که در آن، I_{ih0} و I_{Lh0} به‌ترتیب اندازهٔ جریان هارمونیکی منبع و بار در نقطهٔ کار هستند.

۳-۲- استفاده از جست‌وجوی اکسترموم در سیستم فتوولتاییک

برای اجرای ESC به منظور کاهش هارمونیک، سیستم کنترل PV مجهز به سیستمی است که هارمونیک‌های سیگنال ولتاژ را تخمین می‌زند. سپس، با استفاده از روش PSO، پارامترهای کنترلی سیستم کنترل تنظیم می‌شوند تا اندازهٔ مؤثر ولتاژ کل با استفاده از یک حلقهٔ بازخورد برای نظارت و تنظیم مداوم سیستم در زمان واقعی کمینه شود. بلوک دیاگرام پیشنهادی ESC از طریق روش اغتشاش در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۹].



شکل (۲): ESC با استفاده از روش اغتشاش [۱۹]

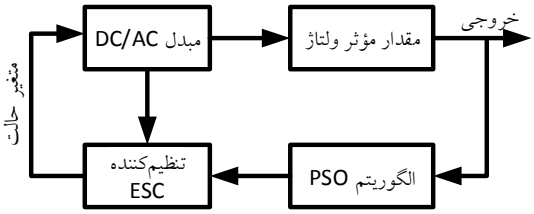
۳-۳- کاربرد بهینه‌سازی اجتماع ذرات در تنظیم جست‌وجوی اکسترموم

در اجرای ESC برای کاهش هارمونیک، سیستم کنترل PV سیگنال ولتاژ را اندازه‌گیری می‌کند. سپس، پارامترهای سیستم کنترل را تنظیم می‌کند تا مقدار مؤثر ولتاژ را در نقطهٔ اتصال کمینه کند. این منطق پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است. بر این اساس، می‌توان الگوریتم را به صورت زیر پیشنهاد داد:

- آغاز توده با N ذره[۱۷] که هر یک نمایشگر یک مقدار اولیه برای پارامترهای کنترلی ESC است.
- به هر ذره یک سرعت تصادفی اختصاص دهید.
- برای هر ذره در اجتماع باید اقدامات زیر را به تعداد دفعات از پیش تعریف‌شده تکرار کرد:
- مقدار تابع هدف را مطابق رابطهٔ (۱۱) محاسبه کنید.

این بخش به کمک شبیه‌سازی سیستم کنترل انجام می‌شود. باید اطمینان حاصل کرد که ولتاژ حاصل در بازه از پیش تعریف‌شده باشد.

- بهترین تجربه برای موقعیت هر ذره و نیز بهترین تجربه برای موقعیت اجتماع ذرات را به‌روز کنید.
- سرعت هر ذره را بر اساس رابطهٔ (۱) به‌روز کنید.
- موقعیت هر ذره را به‌روز کنید.



شکل (۳): بلوک دیاگرام استفاده‌شده در کنترلر سیستم فتولتاییک با جست‌وجوی اکسترموم مبتنی بر PSO [۲۰]

٤- نتایج شبیه‌سازی

نرم افزار PSCAD یکی از نرم‌افزارهای گرافیکی برای تحلیل و شبیه‌سازی حالت پایدار، گذرا و دینامیکی سیستم‌های قدرت است و توسط موتور شبیه‌سازی EMTDC، می‌توان مدارها را به صورت شماتیکی طراحی، شبیه‌سازی، اجرا و خروجی را آنالیز کرد.

شبکه‌ای که برای بررسی و مقایسهٔ نتایج در این مقاله استفاده شده، مانند شکل (٤) است. ولتاژ نامی ۲۰۰ ولت و مقاومت و اندوکتانس آن به‌ترتیب ۰/۳ اهم و ۳ میلی‌هانری در نظر گرفته

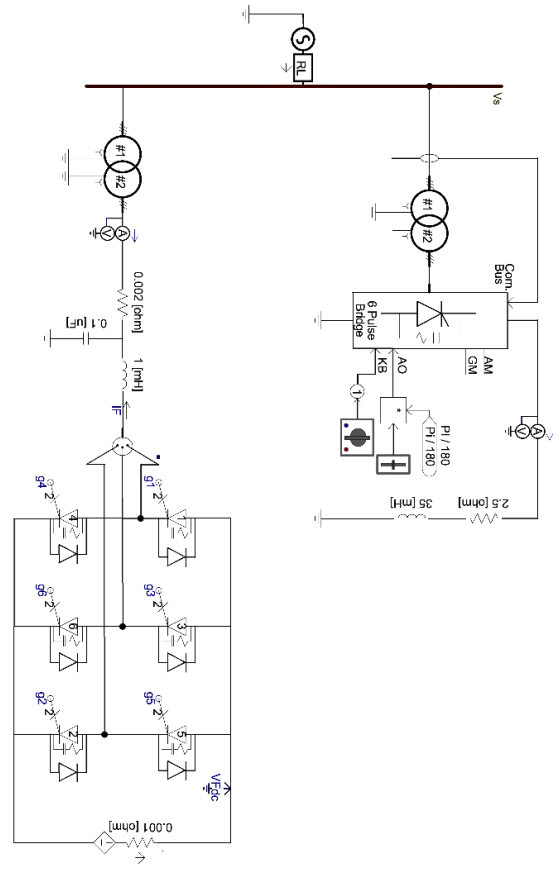
شـــده‌انـــد. پارامترهـــای اســـتفاده‌شـــده در کنترلـــر پیشنهادی در رابطه با هارمونیک مختلف در جدول (۳) و پارامترهای استفاده‌شده در PSO در جـدول (٤) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): پارامترهای استفاده‌شده در کنترلر پیشنهادی

مرتبهٔ هارمونیک	A_i	ω_i
۳	−۰/۰۱٦	۹٤۲/٤۸
۵	۰/۰۰۹۵	۱۵۷۰/۷۹
۷	−۰/۰۱۱	۲۱۹۹/۱۵
۱۱	۰/۰٤۵	۳٤۵۵/۷۵
۱۳	۰/۰۰۷	٤۰۸٤/۰۷

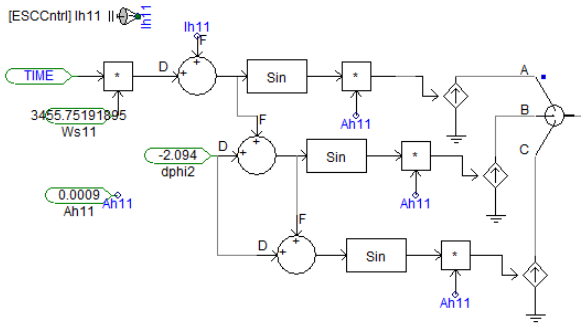
جدول (٤): پارامترهای استفاده‌شده در PSO

پارامتر	تکرار	N	c_2	c_1
مقدار	۱۰۰	۵۰	۲/۰۵	۲/۰۵



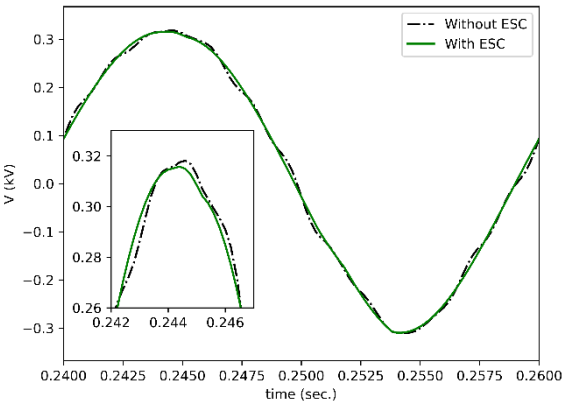
شکل (٤): شماتیک شبکهٔ مدنظر در نرم‌افزار PSCAD

پارامترهای استفاده‌شده در کنترلر پیشـنهادی در رابطـه بـا هارمونیـک مختلـف بـرای پیکربنـدی ماژول‌های ESC در PSCAD استفاده شـده‌انـد و یک نمونـه از آن‌هـا بـرای هارمونیـک یـازدهم در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): بلوک دیاگرام استفاده‌شده در کنترلر هارمونیک یازدهم در نرم‌افزار PSCAD

مقایسهٔ ولتاژ خروجـی در دو حالـت در شـکل (٦) برای یک سیکل نمـایش داده شـده اسـت. در نمـودار فرعـی درون شـکل اصـلی، یـک نمـودار کوچک درج شده است که نسـخهٔ بـزرگ‌نمـایی از دو متغیـر در نمـودار اصـلی را در بـازهٔ [۰/۲٤٦، ۰/۲٤۲] ثانیه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد دقتی قابل قبول در سیگنال‌هـای تولیدشـده توسـط ESC وجود دارد.



شکل (٦): مقایسهٔ ولتاژ خروجی در دو حالت

کنترل‌کنندهٔ ESC مقادیری برای زوایای هارمونیک جریان تزریقی تولید می‌کند که برای کاهش هارمونیک ولتاژ در میکروگرید لازم است. زوایای مختلف در شکل (۷) نشان داده شده‌اند که در آن‌ها، محور x زمان را به ثانیه و محور y زوایا را به درجه نشان می‌دهد. $\boldsymbol{\theta}_3$ و $\boldsymbol{\theta}_7$ دارای مقادیر مثبت هستند و الگوی افزایشی دارند؛ اما $\boldsymbol{\theta}_5$، $\boldsymbol{\theta}_{11}$ و $\boldsymbol{\theta}_{13}$ دارای مقادیر منفی هستند و الگوی کاهشی دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ رشد نمودارها در بیشینهٔ مقدار مدنظر در حدود ۳/۵ ثانیه ثابت می‌شود و هیچ افزایش ناگهانی ندارند که نشان می‌دهد ESC قابلیت خوبی در مقیاس زمانی مناسب دارد تا مقادیری مناسب برای زوایا که به منظور کاهش هارمونیک‌ها لازم است، ارائه دهد.

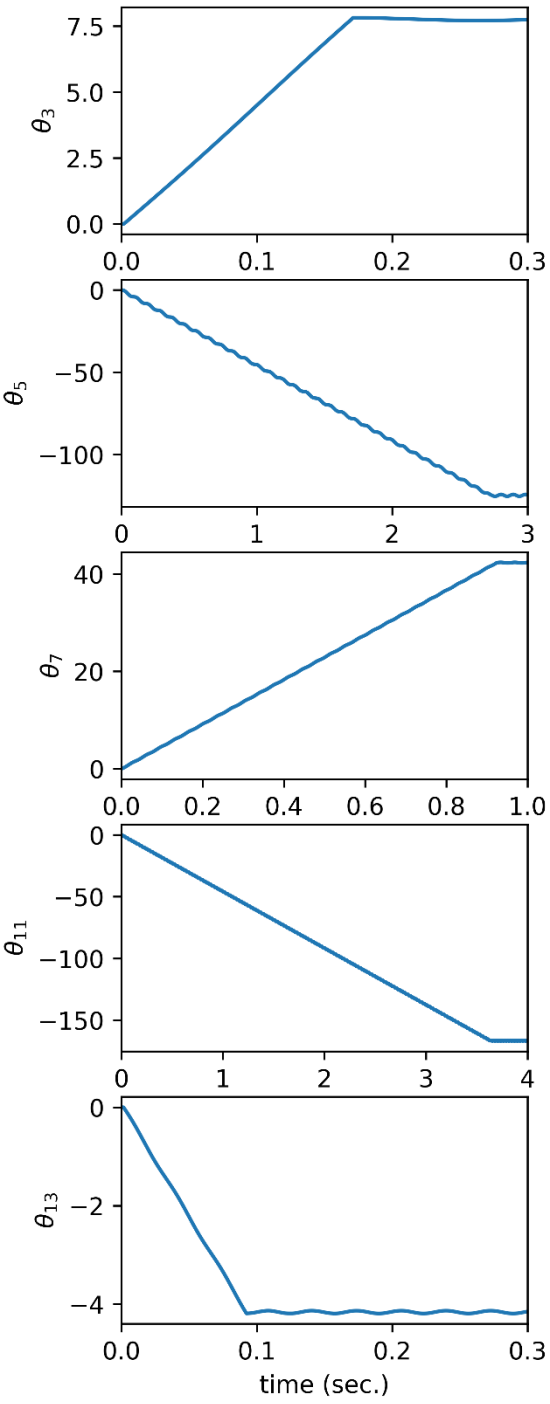
مقایسهٔ THD در جدول (۵) برای جریان و همچنین برای ولتاژ ارائه شده است. پس از اعمال ESC، مقدار THD_v به بازهٔ مجاز در استاندارد IEEE بازمی‌گردد. در استاندارد IEEE ۵۱۹-۲۰۱٤، حد مجاز آن برای شبکه‌های فشار ضعیف ۸ درصد است؛ در حالی که THD_v به‌خوبی در محدودهٔ توصیه‌شده قرار دارد، اما THD_i از محدودیت استاندارد یادشده فراتر رفته است.

جدول (۵): مقایسهٔ THD جریان و ولتاژ در حالات مختلف

حالت	THD_i (%)	THD_v (%)
بدون ESC	۹۸/۳۵۸	۹/۷۰٦
با ESC	۷۸/۱۰٦	۷/۷۷۸
تغییرات	-۲۰/۵۹	-۱۹/۸٦

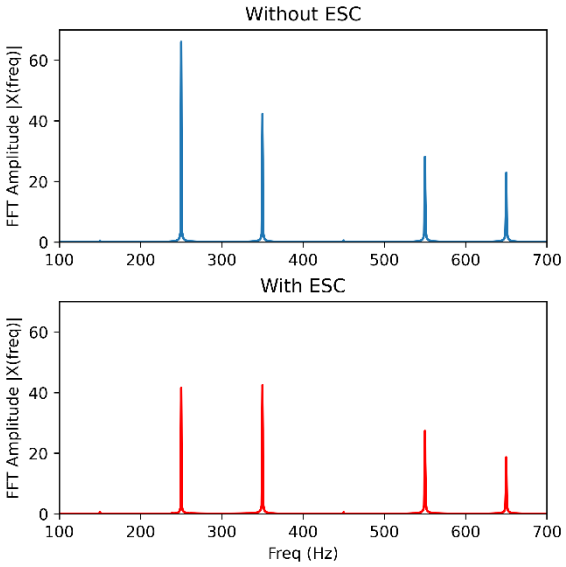
سیستم کنترلی کاهش هارمونیک به گونه‌ای طراحی شده است که جریانی با اندازهٔ برابر و فاز مخالف با هارمونیک‌های ناخواسته به سیستم تزریق کند. این روش باعث حذف یا کاهش هارمونیک‌های ناخواسته می‌شود؛ در حالی که بر مؤلفهٔ اصلی ولتاژ تأثیر نمی‌گذارد. به عبارت دیگر، این سیستم کنترلی فقط به هارمونیک‌هایی مشخص پاسخ می‌دهد و جریان‌هایی را تولید می‌کند که دقیقاً با هارمونیک‌های مزاحم مخالف هستند. از آنجا که این جریان‌ها دقیقاً مخالف هارمونیک‌ها هستند، هارمونیک‌ها را خنثی می‌کنند و باعث بهبود کیفیت توان می‌شوند؛ اما بر مؤلفهٔ اصلی ولتاژ که در فرکانس پایه قرار دارد، تأثیری نمی‌گذارند؛ بنابراین، سیستم کنترلی به صورت هوشمندانه هارمونیک‌ها را هدف قرار می‌دهد و مؤلفهٔ اصلی ولتاژ را دست‌نخورده نگه می‌دارد که این امر باعث می‌شود کیفیت توان بهبود یابد بدون اینکه تأثیری بر مؤلفهٔ اصلی ولتاژ داشته باشد.

تبدیل فوریهٔ سریع (FFT)[18] یک سیگنال را به اجزای طیفی منفرد در حوزهٔ فرکانس تبدیل می‌کند و در نتیجه، اطلاعات فرکانس سیگنال را ارائه می‌دهد. مقایسهٔ تبدیل فوریهٔ سریع شکل موج جریان‌ها در شکل (۸) ارائه شده است. جریان غیرخطی بار در نمودار بالایی و با رنگ آبی آمده است و جریان نشان داده‌شده در شکل پایینی با رنگ قرمز، جریان از دید شبکه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان تزریق‌شده به شبکه دارای اندازهٔ هارمونیک کمتری است که در نتیجه، به سینوسی نزدیک‌تر شده است. به طور ویژه، اندازهٔ هارمونیک پنجم که در فرکانس ۲۵۰ هرتز است، کاهشی چشمگیر داشته است که اتفاقاً نقشی پررنگ‌تر نسبت به دیگر مؤلفه‌های هارمونیکی در THD دارد.

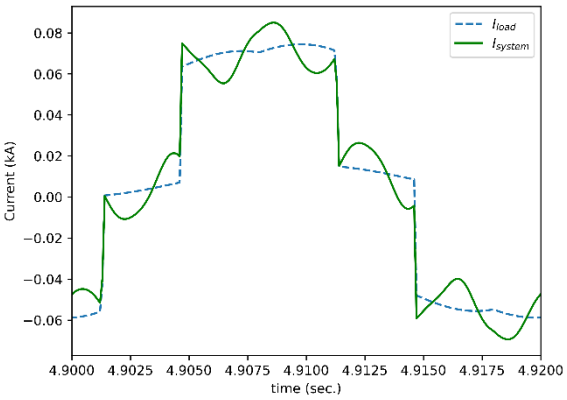


شکل (۷): زوایای مختلف تولیدشده توسط کنترل‌کنندهٔ ESC برای کاهش محتوای هارمونیک در شبکه با استفاده از PSO

مقایسهٔ جریان بار و سیستم پس از استفاده از سیستم کنترل پیشنهادی در دو سیکل در شکل (۹) انجام شده است که نشان می‌دهد روش پیشنهادی بهبودی قابل ملاحظه ایجاد کرده است.



شکل (۸): مقایسه تبدیل فوریه سریع جریان بار با و بدون استفاده از سیستم کنترل پیشنهادی



شکل (۹): مقایسهٔ جریان بار و جریان سیستم پس از استفاده از سیستم کنترل پیشنهادی در دو سیکل

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آتی

استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک یک راه‌حل امیدوارکننده برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها است. سیستم‌های برق خورشیدی متصل به شبکه ممکن است راه‌حلی برای کاهش مشکلات کیفیت برق باشند. پنل‌های فتوولتاییک را می‌توان برای کاهش هارمونیک استفاده کرد. مزیت استفاده از ESC برای کاهش هارمونیک این است که می‌تواند با تغییرات در سیستم سازگار شود و عملکرد را در زمان واقعی بهینه کند که ممکن است به ویژه در کابردهایی مفید باشد که بار یا

مشخصات سیستم الکتریکی در طول زمان تغییر می‌کنند؛ زیرا ESC می‌تواند پارامترهای کنترل را برای حفظ عملکرد بهینه تنظیم کند.

توزیع گستردهٔ اینورترهای سیستم فتوولتاییک می‌تواند به طور فعال کیفیت توان سیستم توزیع را تنظیم کند. در عمل، اینورترهای متصل به سیستم فتوولتاییک در غیاب تابش خورشیدی (یعنی در طول شب) غیرفعال هستند؛ در نتیجه، ضریب استفاده از دستگاه به‌شدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. با توجه به این موضوع، در کار پیشنهادی، اصلاحی ویژه در رویکرد کنترل ایجاد شده است و از این رو، اینورتر سیستم فتوولتاییک را به صورت مستقل در طول روز و شب به صورت یک فیلتر اکتیو به کار می‌برد؛ در نتیجه، ضریب بهره‌برداری از دستگاه‌های مزارع خورشیدی افزایش می‌یابد و از این طریق می‌توان درآمد بیشتری ایجاد کرد. علاوه بر این، مطالعات شبیه‌سازی جامعی با سیستم‌های فتوولتاییک به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر انجام شده‌اند.

در این مقاله، از یک کنترل تطبیقی به نام کنترلر جست‌وجوی اکسترموم در کاهش اعوجاج هارمونیکی در سیستم‌های فتوولتاییک در ریزشبکه استفاده شده است. به طور کلی، کنترلر جست‌وجوی اکسترموم راهبرد کنترلی قدرتمندی است که برای دست‌یابی به بهینه‌سازی در سیستم‌های پیچیده و غیرخطی استفاده می‌شود. این پیشنهاد به منظور بهبود کیفیت توان با استفاده از پنل‌های خورشیدی است. با بهره‌گیری از روش کنترلی یادشده، می‌توان اعوجاج هارمونیکی را به کمترین حد و در گسترهٔ استاندارد رساند و سیستم را در برابر نوسانات ولتاژ و تغییرات غیرخطی بار محافظت کرد.

پنل‌های خورشیدی به عنوان منابع تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها استفاده می‌شوند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله نشان دادند امکان ادغام سامانه‌های فتوولتاییک با اینورترها برای فعالیت مستمر و کاهش محتوای هارمونیکی ولتاژ وجود دارد. البته گفتنی است، روش پیشنهادی ممکن است بر عمر خازن در تبدیل‌کنندهٔ فتوولتاییک و تقلیل برخی از هارمونیک‌ها تأثیر داشته باشد. نرخ همگرایی روش کنترل ESC و روش فیلتر محلی بدون از دست دادن جالب توجه عملکرد حالت دائمی بهبود داده شده است.

در این مقاله، با کمک ESC، توانمندی اینورترهای فتوولتاییک برای کاهش محتوای هارمونیک ولتاژ PCC استفاده شد. روش کنترلی ارائه‌شده به هیچ دانشی دربارهٔ محتویات هارمونیک جریان بارهای شبکه نیاز ندارد. راهبرد کنترل پیشنهادی هارمونیک ولتاژی را به محدودهٔ استاندارد IEEE بازمی‌گرداند. بر اساس استاندارد IEEE ۵۱۹-۲۰۱٤ برای شبکه‌های فشار ضعیف، مقدار یادشده ۸ درصد است.

مراجع

[1] P. S. Prasad, A. M. Parimi, “Harmonic Mitigation in Grid Connected and Islanded Microgrid Via Adaptive Virtual Impedance”, in 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), IEEE, pp. 1–6, Jan. 2020. https://doi.org/10.1109/PESGRE45664.2020.9070598

[2] Y. W. Li, J. He, “Distribution System Harmonic Compensation Methods: An Overview of DG-Interfacing Inverters”, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 18–31, Dec. 2014. https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2295421

[3] H. Bevrani, B. Francois, and T. Ise, Microgrid Dynamics and Control. Wiley, 2017. doi: 10.1002/9781119263739

[4] Z. Cai, “The elimination of harmonics generated in PV system connected to grid”, IET Conference Proceedings, Vol. 2024, No. 19, pp. 693–697, Jan. 2025. https://doi.org/10.1049/icp.2024.4069

[5] I. D. Bouloumpasis, P. N. Vovos, K. G. Georgakas, “Voltage Harmonic Injection Angle Optimisation for Grid Current Harmonics Using a PV Converter”, IET Power Electronics, Vol. 12, No. 9, pp. 2382–2388, Aug. 2019. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5608

[6] T. K. Gimenes, M. P. C. da Silva, J. J. G. Ledesma, O. H. Ando, “Impact of Distributed Energy Resources on Power Quality: Brazilian Scenario Analysis”, Electric Power Systems Research, Vol. 211, p. 108249, Oct. 2022. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108249

[7] X. Liang, C. Andalib -Bin- Karim, “Harmonics and Mitigation Techniques Through Advanced Control in Grid-Connected Renewable Energy Sources: A Review”, IEEE Trans Ind Appl, Vol. 54, No. 4, pp. 3100–3111, Jul. 2018. https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823680

[8] N. Patel, N. Gupta, B. C. Babu, “Photovoltaic System Operation as DSTATCOM for Power Quality Improvement Employing Active Current Control”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14, No. 17, pp. 3518–3529, Sep. 2020. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1487

[9] G. M. Pelz, S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, "Distributed Generation Integrating a Photovoltaic-Based System with a Single- to Three-Phase UPQC Applied to Rural or Remote Areas Supplied by Single-Phase Electrical Power", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 117, p. 105673, May 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105673
[10]S. Devassy, B. Singh, "Design and Performance Analysis of Three-Phase Solar PV Integrated UPQC", IEEE Trans Ind Appl, Vol. 54, No. 1, pp. 73–81, Jan. 2018. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2754983
[11]V. Monteiro, C. Lopes, J. A. P. Antunes, C. H. Osório, G. J. Catalão, J. P. S. Afonso, J. L. "A Novel Three-Phase Multiobjective Unified Power Quality Conditioner", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 71, No. 1, pp. 59–70, Jan. 2024. https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3241380
[12]D. Dochain, M. Perrier, M. Guay, "Extremum seeking control and its application to process and reaction systems: A survey", Math Comput Simul, Vol. 82, No. 3, pp. 369–380, Nov. 2011, https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.10.022
[13]C. Hong, K. Li, "Swarm intelligence-based extremum seeking control", Expert Syst Appl, Vol. 38, No. 12, pp. 14852–14860, Nov. 2011. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.062
[14]J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization", in Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, IEEE, pp. 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968
[15]E. Karimi, A. Ebrahimi, M. R. Tavakoli, "How Optimal PMU Placement Can Mitigate Cascading Outages Blackouts?", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 29, No. 6, 2019. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12015
[16]M. H. Oboudi, R. Hooshmand, A. Karamad, "A feasible method for controlled intentional islanding in microgrids based on PSO algorithm", Swarm Evol Comput, Vol. 35, pp. 14–25, Aug. 2017. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.02.003
[17]M. R. AlRashidi, M. E. El-Hawary, "A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 13, No. 4, pp. 913–918, 2009. https://doi.org/10.1109/TEVC.2006.880326
[18]Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 12, No. 2, pp. 171–195, 2008. https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.896686
[19]M. Krstić, H.-H. Wang, "Stability of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear Dynamic Systems", Automatica, Vol. 36, No. 4, pp. 595–601, Apr. 2000. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00183-1
[20]C. Zhang, R. Ordonez, "Numerical Optimization-Based Extremum Seeking Control with Application to ABS Design", IEEE Trans Automat Contr, Vol. 52, No. 3, pp. 454–467, Mar. 2007. https://doi.org/10.1109/TAC.2007.892389

[1] Reference Generation
[2] Voltage Control Method
[3] Current Control Method
[4] Convex
[5] DSTATCOM
[6] Unified Power Quality Controller
[7] Swell
[8] Sag
[9] Real time
[10] Stochastic Optimization
[11] Trajectories
[12] Particle Swarm Optimization (PSO)
[13] Phasor Measurement Units (PMUs)
[14] Cognitive Coefficient
[15] Social Coefficient
[۱۶] در روابط مقادیر فازوری با حروف بزرگ و مقادیر زمانی با حروف کوچک نمایش داده خواهند شد.
[17] Particle
[1818] Fast Fourier Transform (FFT)