

Vol. 12/ No. 46/Winter 2023

Research Article

Particle Swarm Optimization Based Sliding Mode Controller for Performance Improvement of Unified Power Quality Controllers Inverters

Mohammad Amin Heidari, Ph.D. Student ¹  | Mehdi Nafar, Assistant Professor ^{2*}  | Taher Niknam, Professor³ 

¹Ph.D Student of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, e_aminheidari@miau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, mnafar@miau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, niknam@sutech.ac.ir

Correspondence

Mehdi Nafar, Assistant Professor of Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, mnafar@miau.ac.ir

Received: 16 June 2022

Revised: 3 August 2022

Accepted: 20 September 2022

Abstract

In this paper Particle Swarm Optimisation (PSO) based Sliding Mode Controller (SMC) introduced to control inverters of Unified Power Quality Controllers (UPQC) to control and improve the power quality in microgrids through controlling the output power of the distributed generation source. In the proposed control scheme, the standard sliding mode controller is used as a robust nonlinear controller, with the addition of the PSO algorithm - to determine the optimal parameters of the SMC controller. Using PSO added extra advantages like reducing chattering problems and increasing accuracy and tracking capability to the commonly known SMC benefits. To confirm the accuracy of the proposed controller's performance, computer simulation is performed under different system load conditions in the MATLAB/Simulink software environment. The obtained results show the effectiveness of the proposed control compared to the standard sliding mode controller in reducing harmonics, reducing voltage imbalance and improving other power quality indicators.

Keywords: PSO, UPQC, inverter control, power Quality

Highlights

- The combination of the second generation and the third generation of power quality improvement methods.
- Providing an economic method to reduce the cost of DG integration into network.
- Improving the sliding mode control method with PSO algorithm.

Citation: M. A. Heidari, M. Nafar, and T. Niknam, "Particle Swarm Optimization Based Sliding Mode Controller for Performance Improvement of Unified Power Quality Controllers Inverters," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, pp. 59–76, 1401, doi: 10.30495/jce.2022.1961181.1162, (in Persian).

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد مبدل‌های کنترل‌کننده یکپارچه کیفیت توان به کمک کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات

محمد امین حیدری^۱ | مهدی نفر^{۲*} | طاهر نیکنام^۳ | ID

چکیده:

در این مقاله کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات برای بهبود عملکرد مبدل‌های کنترل‌کننده یکپارچه کیفیت توان (UPQC) برای کنترل و بهبود کیفیت توان در ریزشبکه‌ها از طریق کنترل توان خروجی منبع تولید پراکنده ارائه می‌گردد. در طرح پیشنهادی کنترل‌کننده مد لغزشی (SMC) استاندارد به‌عنوان یک کنترل‌کننده غیرخطی مقاوم، با اضافه کردن الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) - برای تعیین بهینه پارامترهای کنترل‌کننده SMC مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات به کنترل‌کننده مد لغزشی مزیت‌های متعددی از قبیل کاهش تأثیر پدیده چترینگ و دقت بالای کنترل‌کننده در دنبال کردن تغییرات را به سایر مزایای شناخته‌شده کنترل‌کننده مد لغزشی چون استحکام بیشتر در برابر اختلالات بیرونی و نامعینی پارامترها می‌افزاید. برای تأیید صحت عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی کامپیوتری در شرایط مختلف بارگذاری سیستم در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده کارایی کنترل پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده مد لغزشی استاندارد در کاهش هارمونیک‌ها، کاهش نامتعادلی ولتاژ و بهبود سایر شاخص‌های کیفیت توان را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: ریزشبکه، سیستم فتوولتائیک، کیفیت توان، UPQC.

^۱ دانشجوی دکترا، گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران،
e_aminheidari@miau.ac.ir

^۲ استادیار گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران،
mnafar@miau.ac.ir

^۳ استاد گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران،
niknam@sutech.ac.ir

نویسنده مسئول

* مهدی نفر، استادیار گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران،
mnafar@miau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۶ خرداد ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۲ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۹ شهریور ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.1961181.1162>

۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های تأمین انرژی الکتریکی با چالش‌هایی از قبیل رشد و تغییرات شدید بار در سمت مشترکین روبرو هستند. از سوی دیگر مسائل زیست‌محیطی و نگرانی‌های اقتصادی، بهره‌برداری از شبکه‌های بزرگ سنتی را با مشکلاتی مواجه کرده است. در سال ۲۰۰۹ بیش از دوسوم از انرژی الکتریکی در جهان از طریق سوخت‌های فسیلی [۱] و ۴۱ درصد گازهای زیان‌آور گلخانه‌ای از این طریق تولید شده است [۲]. این موضوع وقتی حادتر می‌شود که بدانیم طبق پیش‌بینی‌ها تقاضای جهانی انرژی الکتریکی تا سال ۲۰۳۵، رشد شدیدی (در حدود ۴۹ درصد) را تجربه خواهد کرد [۳]. در این میان ریزشبکه‌ها نقشی اساسی برای نیل به این اهداف و تحقق چنین سیاست‌هایی دارند و مطالعات زیادی در این حوزه انجام شده و یا در حال انجام است. طبق تعریف دپارتمان انرژی ایالات متحده به گروهی از تکنولوژی‌های انرژی تجدید پذیر که برای تأمین توان انرژی الکتریکی مجموعه‌ای از بارهای معرفی شده و قابلیت کنترل واحد را دارند ریزشبکه گفته می‌شود [۴]. به عبارت دیگر ریزشبکه به مجموعه‌ای از بارها و منابع کوچک تولید انرژی گفته می‌شود که قادرند به صورت یک واحد مستقل کنترل شوند و پاسخگوی تقاضای توان الکتریکی و گرمایی در منطقه مورد نظر باشند. اینورترهای منبع ولتاژی به‌عنوان بخشی اساسی در ساختار ریزشبکه‌ها وظیفه اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه اصلی را بر عهده دارند و کنترل مؤثر این اینورترها به منظور اطمینان از عملکرد مناسب آن‌ها

ضروری است. از بین روش‌های کنترلی متعدد، استراتژی‌های کنترل مستقیم توان^۱(DPC) در مقالات زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. این نوع کنترل‌کننده‌ها باید قادر باشند چالش‌های مهمی چون ولتاژ نامتعادل، نوسانات توان و جریان غیر سینوسی شبکه مقاوم باشند.

روش کنترل مستقیم توان برای بهبود عملکرد اینورترها در شرایط شبکه نامتعادل به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۵] کنترل توان مستقیم مبتنی بر روش کنترلی مد لغزشی برای کاهش نوسانات توانهای اکتیو و راکتیو و دستیابی به جریان شبکه متعادل استفاده شده است. چگونگی بهبود عملکرد اینورترهای منبع ولتاژی تحت کنترل‌کننده‌های مبتنی بر کنترل مستقیم توان در شرایط شبکه نامتعادل و نوسان فرکانس به‌طور کامل [۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله استفاده از زاویه فاز مجازی باعث شده به تابع حلقه قفل شده نیازی نباشد و به کمک کنترل‌کننده پروفایل توان صاف‌تری حاصل شده است. برای دستیابی به مرجع توان مطلوب در اینورترهای متصل به شبکه در [۷] الگوریتم کنترل مستقیم توان به کمک کلیدزنی بهینه^۲(OSS) کاهش یافته معرفی گردیده است. همچنین در مرجع [۸] مدل ریاضی کامل اینورتر منبع ولتاژی برای استفاده در کنترل‌کننده‌ها در قاب مرجع ساکن معرفی شده است. در این مدل به کمک فیلترهای پیچیده‌ای اجزاء توالی مثبت و منفی جریان‌ها و ولتاژهای شبکه استخراج و خطای توان توسط یک کنترل‌کننده ساده PID دنبال شده است. حذف تابع حلقه قفل شده PLL نه تنها باعث کاهش هزینه‌ها که موجب ساده‌تر شدن اعمال کنترل‌کننده به سیستم می‌شود. از اینرو پژوهش‌های متعددی بر ساختارهای کنترلی بدون PLL برای اینورترهای منبع ولتاژی متمرکز شده است. در [۹] برای کاهش ضریب توان اینورترهای منبع ولتاژی تحت ولتاژ نامتعادل یک استراتژی کنترلی مد لغزشی با استفاده از فیدبک جبران ساز برای توانهای اکتیو و راکتیو معرفی و تابع حلقه قفل شده فاز حذف شده است. برای بهبود کیفیت توان در اینورترهای منبع ولتاژی تحت ولتاژ نامتعادل روش‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. یک روش کنترل تطبیقی مبتنی بر فیلتر شکافی برای کنترل اینورترهای منابع تولید پراکنده متصل به شبکه در [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده است که عملکردهای مختلف اینورترها از قبیل کنترل توان راکتیو بار، تزریق توان مرجع به شبکه و جبران سازی جریان‌های هارمونیک و نامتعادل از طریق استخراج اجزای توالی تطبیقی فرکانس قابل دستیابی است. غیرخطی بودن رفتار یک سیستم می‌تواند ریشه در معادلات حالت غیرخطی، تغییرات پارامترها و نامعینی‌های موجود در مدل ریاضی آن سیستم باشد. از میان روش‌های کنترل غیرخطی، روش کنترل مد لغزشی به دلیل مقاوم بودن در برابر اختلالات خارجی، نامعینی‌های پارامترها و تغییر متغیرها [۱۱-۱۳] و نیاز به محاسبات کمتر و سادگی اعمال [۱۴-۱۵] به سیستم مورد توجه زیادی قرار گرفته است. هرچند این روش کنترلی در برابر پدیده چترینگ که باعث افزایش تلفات در سیستم قدرت و تحریک سیستم از طریق مدهای فرکانس بالا می‌شود دارای ضعف است [۱۶]. طرح پیشنهادی نحوه اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه از طریق مبدل‌های UPQC^۳ در [۱۷] امکان‌سنجی شده است در این مقاله اتصال نیروگاه بادی به شبکه از طریق مبدل موازی UPQC مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد صحیح سیستم با طرح اتصالی پیشنهادی اثبات گردیده است.

در این مقاله ترکیب استراتژی کنترلی مد لغزشی (SMC)^۴ و الگوریتم توده ذرات (PSO)^۵ برای کنترل و بهبود عملکرد سوئیچینگ مبدل‌های سری و موازی UPQC جهت بهبود کیفیت توان در ریزشبه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در روش کنترلی پیشنهادی الگوریتم توده ذرات وظیفه انتخاب بهینه پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی را بر عهده دارد که ضمن افزایش استحکام کنترل‌کننده و افزایش مقاومت در برابر اختلال خارجی، به افزایش دقت دنبال کردن تغییرات منجر می‌شود. اهداف کلی این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- مدل‌سازی، مطالعه و بهبود عملکرد مبدل‌های UPQC در جبران سازی نوسانات ولتاژ و جریان یک ریزشبه.
- معرفی کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر PSO جهت افزایش دقت و استحکام سیستم در برابر اختلالات بیرونی و نامعینی‌ها و کاهش پدیده چترینگ.

^۱ - Direct Power Control

^۲ - Optimal Switching Sequence

^۳ - Unifield Power Quality Controller (UPQC)

^۴ - Sliding Mode Controller (SMC)

^۵ - Particle Swarm Optimization

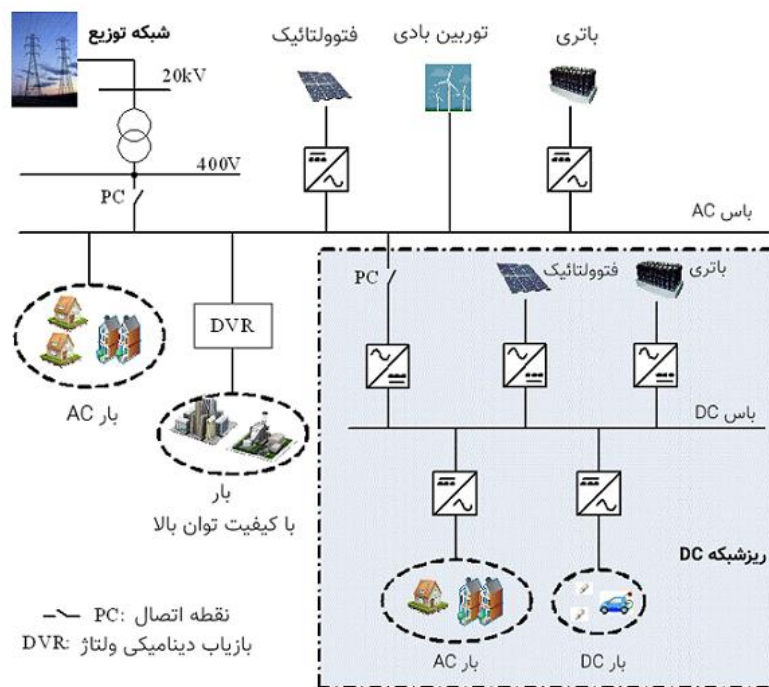
- ارائه روش اقتصادی برای اتصال منابع تولید پراکنده از جمله سیستم فتوولتائیک به شبکه از طریق UPQC به منظور کاهش هزینه نهایی استفاده از این منابع.

در ادامه به توصیف مدل کامل ریاضی روش کنترل مد لغزشی و الگوریتم توده ذرات می‌پردازیم. سپس به ساختار کلی روش کنترلی مد لغزشی مبتنی بر PSO خواهیم پرداخت و در نهایت به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری رفتار سیستم تحت کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط مختلف بارگذاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و عملکرد کنترل‌کننده ارزیابی می‌شود.

۲- طرح مسئله

۲-۱- ریزش‌بکه

هر ریزش‌بکه شامل تعدادی منابع تولید پراکنده، بارهای متنوع و سیستم کنترل و مدیریت است. اجزاء اصلی و مهم ریزش‌بکه‌ها را می‌توان در گروه سه کلی منابع، بارها و سیستم کنترلی دسته‌بندی کرد. اجزاء اصلی یک ریزش‌بکه در شکل ۱ نشان داده شده است. برای هر ریزش‌بکه لازم است هر یک از اجزاء توسط کنترل‌کننده مرکزی از طریق یک بستر ارتباطی دوطرفه مدیریت شوند.



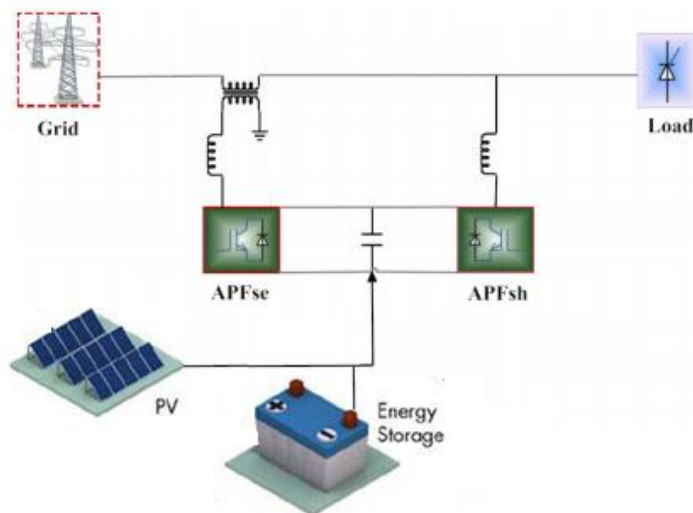
شکل ۱: ساختار کلی یک ریزش‌بکه

ریزش‌بکه مورد مطالعه در این مقاله شامل سیستم فتوولتائیک و باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی است. روش اتصال این واحدهای تولید پراکنده به شبکه طوری است که برای هر یک از این مولدها از یک مبدل واسط استفاده نمی‌شود و برای صرفه‌جویی منابع DG از طریق مبدل‌های UPQC به شبکه وصل می‌شوند. ایده اصلی این روش اتصال به شبکه DG‌ها در مراجع [۱۸-۱۹] معرفی شده است. این روش اتصال، علاوه بر کاهش هزینه‌ها به کارایی هرچه بیشتر UPQC در بهبود کیفیت توان کمک می‌کند. این روش اتصال به UPQC قابلیت تزریق توان راکتیو نیز می‌افزاید. ساختار کلی ریزش‌بکه مورد مطالعه در شکل ۲ دیده می‌شود. در این روش اتصال به شبکه، منابع تولید پراکنده به لینک DC مبدل‌های UPQC وصل می‌شوند. با استفاده از این ساختار روابط تبادل توان در این ریزش‌بکه به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{grid} + P_{DG} = (P + Q + H)_{load} + P_{loss} + P_{series} + P_{Storage} \quad \text{and} \quad (Q + H)_{shunt} = -(Q + H)_{load} \quad (1)$$

$$P_{DG} + P_{Storage} = (P + Q + H)_{load} + P_{loss} \quad \text{and} \quad (Q + H)_{shunt} = -(Q + H)_{load}$$

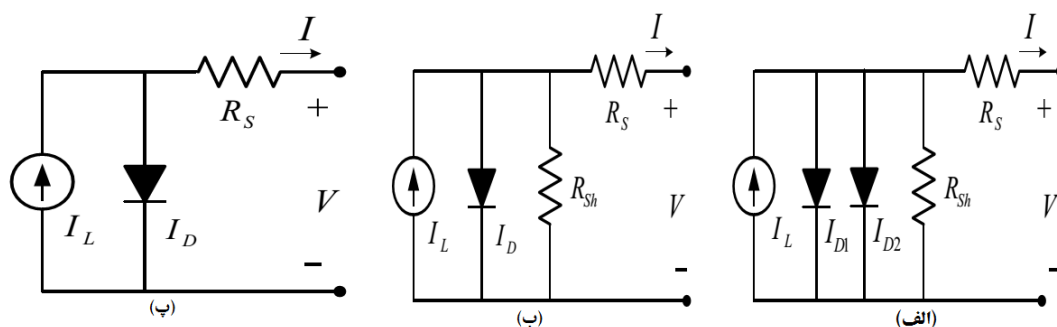
در معادلات فوق P، Q و H به ترتیب توانهای اکتیو، راکتیو و هارمونیک است. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مدل ریاضی سلول‌های فتوولتائیک انجام شده است و مدل‌های متنوعی برای آنالیز رفتار یک سلول فتوولتائیک وجود دارد که متداول‌ترین آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: ساختار ریزشبه مورد مطالعه

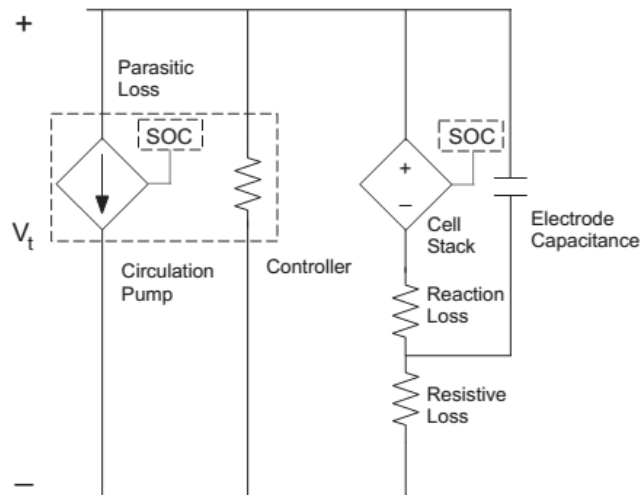
در [۱۹] یک ساختار دو دیودی برای سلول فتوولتائیک پیشنهاد شده است (شکل ۳ الف). در این مدل از یک منبع جریان برای شار نوری به صورت موازی با دو دیود استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی در این مرجع دو مقاومت سری و موازی برای نشان دادن تلفات داخلی به کار رفته است. برای سادگی در این مقاله از مدل تک دیودی برای بررسی رفتار یک سلول PV استفاده می‌شود (شکل ۳ ب).

همچنین در این پژوهش از مجموعه‌ای از باتری‌های (VRB) ^۶ به عنوان ادوات ذخیره‌ساز برای ریزشبه استفاده شده است. مدل کامل باتری‌های VRB باید قادر باشد رفتار هر یک از زیرسیستم‌های آن را به درستی و به صورت یک مجموعه واحد نشان دهد. در [۲۱] مدار معادل الکتریکی باتری VRB با جزئیات کامل آمده است (شکل ۴).



شکل ۳: مدار معادل سلول PV: الف: مدل دو دیودی ب: مدل تک دیودی پ: مدل تک دیودی ساده شده [۱۹]

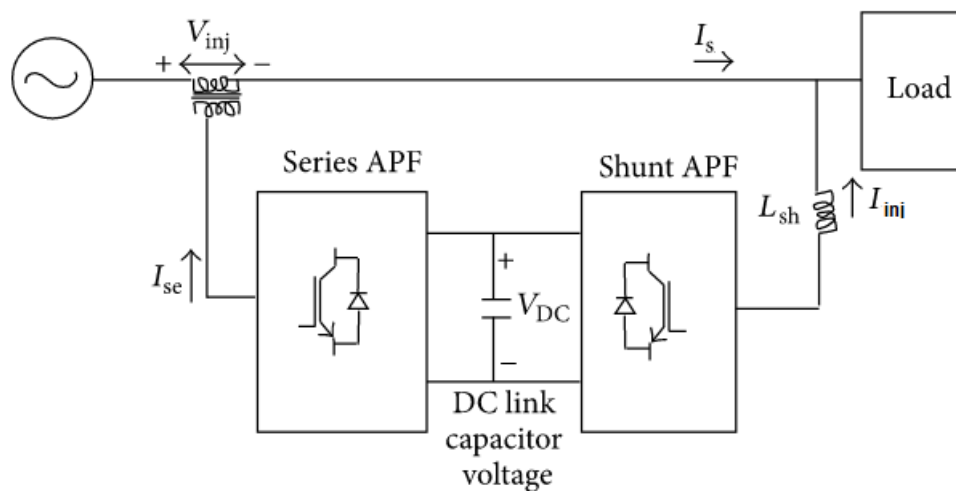
^۶ - Redox Flow Vanadium



شکل ۴: مدار معادل کامل VRB [۱۹]

۲-۲- UPQC و به‌کارگیری آن در ریزشبکه

کنترل‌کننده یکپارچه کیفیت توان تجهیز می‌شود که برای جبران تغییرات ولتاژ و عدم تعادل آن در سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تجهیز ترکیبی از دو فیلتر اکتیو سری و موازی است. فیلتر موازی برای حذف هارمونیک‌های بار و عاری ساختن جریان منبع از هرگونه هارمونیک استفاده می‌شود و به‌صورت موازی به شبکه متصل می‌گردد. فیلتر اکتیو سری نیز برای کاهش اعوجاجات و نامتعادلی ولتاژ سمت منبع به‌منظور متعادل‌سازی ولتاژ سمت بار استفاده می‌شود و به‌صورت سری در مدار قرار می‌گیرد. دو اینورتر موازی و ولتاژی و به‌صورت پشت به پشت و از طریق خازن DC به یکدیگر وصل می‌شوند. اینورتر موازی به‌عنوان منبع جریان متغیر و اینورتر سری به‌صورت منبع ولتاژ متغیر کنترل می‌شوند. ساختار عمومی یک UPQC در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: ساختار کلی یک UPQC

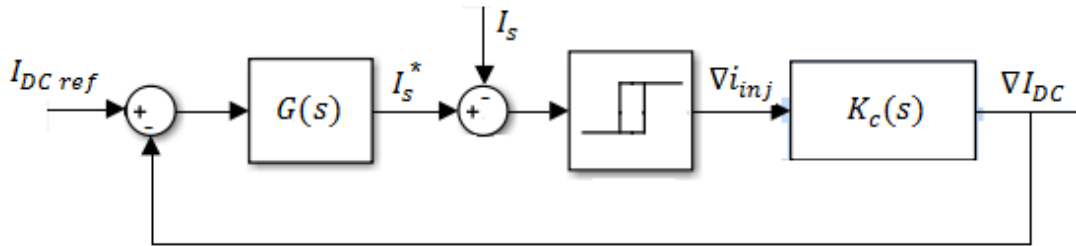
ایده اصلی در روش پیشنهادی در این مقاله برای کنترل اینورتر موازی، ثابت نگه‌داشتن ولتاژ دو سر خازن لینک DC برای ایجاد جریان مناسب برای حذف هارمونیک‌ها است. از آنجاکه جریان لینک DC توسط فیلتر موازی کنترل می‌شود با توجه به شکل ۵ معادلات اساسی زیر را می‌توان برای آن نوشت.

$$I_s = I_{Load} - I_{inj} \tag{۲}$$

$$I_{inj} = MI_{DC} \tag{۳}$$

$$L_{sh} \frac{d i_{inj}}{dt} = V_{load} - V_{sh} \quad (۴)$$

برای کنترل جریان تزریقی به شبکه تنها متغیر کنترلی مدت زمان قطع و وصل کلیدهای اینورتر است که در روابط فوق با M نشان داده شده است. هدف نهایی کنترل تعیین M به گونه‌ای است که جریان لینک DC (CDI) ثابت بماند و جریان مناسبی به شبکه تزریق گردد (jini) که بتواند هارمونیک‌های جریان را حذف کند. jini به طور غیرمستقیم از کنترل جریان منبع و جریان مرجعی که در یک کنترل کننده هیستریزس تخمین زده می‌شود و از طریق CDI تنظیم می‌شود کنترل می‌گردد [۲۲]. با توجه به این توضیحات بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان در مبدل موازی به صورت شکل ۶ خواهد بود.



شکل ۶: بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان [۲۲]

به منظور استخراج مدل ریاضی سیستم نرخ تغییرات متوسط انرژی سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_{ind} = P_{CONV} - P_{LOSS} - P_{Cap} \quad (۵)$$

در معادلات فوق P_{CD} نرخ متوسط جذب انرژی توسط سلف، P_{VNOCP} توان خروجی از مبدل، P_{ap} نرخ متوسط تغییرات انرژی فیلتر خازنی است که از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$P_{ind} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_{DC} I_{DC}^2 \right) = L_{DC} I_{DC} \frac{dI_{DC}}{dt} \quad (۶)$$

$$P_{CONV} = 3 I_{inj} V_{sh} \quad (۷)$$

$$P_{LOSS} = 3 I_{inj}^2 R_{sh} \quad (۸)$$

$$P_{Cap} = 3 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} 3 I_{sh}^2 V_{sh} \right) \quad (۹)$$

با جایگذاری روابط ۶ الی ۹ در معادله ۴ خواهیم داشت:

$$L_{DC} I_{DC} \frac{dI_{DC}}{dt} = 3 I_{inj} V_{sh} - 3 I_{inj}^2 R_{sh} - 3 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} 3 I_{sh}^2 V_{sh} \right) \quad (۱۰)$$

به منظور خطی کردن معادلات توان یک تغییر کوچک در مقدار جریان تزریقی ($\Delta jini$) حول نقطه کار حالت دائم این جریان $jiniO$ ایجاد می‌شود که تغییر کوچکی در جریان لینک DC (ΔCDI) حول نقطه کار حالت دائم این جریان $CDIO$ به دنبال خواهد داشت. بنابراین با قرار دادن هر یک از عبارتهای $jini = jiniO + \Delta jini$ و $CDI = CDIO + \Delta CDI$ در رابطه ۱۰ و صرف نظر از قسمت‌های مرتبه بالاتر خواهیم داشت:

$$L_{DC} I_{DCO} \frac{d\Delta I_{DC}}{dt} = 3 \left(I_{injO} V_{sh} + \Delta I_{inj} V_{sh} - I_{injO}^2 R_{sh} - 2 I_{injO} \Delta I_{injO} R_{sh} - v_{sh} c_{sh} \frac{d}{dt} v_{sh} \right) \quad (۱۱)$$

معادله فوق در حالت کار دائم به صورت زیر است:

$$0 = 3 \left(I_{injO} V_{sh} - I_{injO}^2 R_{sh} \right) \quad (۱۲)$$

رابطه خطی بین

$\Delta jini$ و ΔCDI نیز به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آید:

$$L_{DC} I_{DCO} \frac{d\Delta I_{DC}}{dt} = 3 \left(\Delta I_{inj} V_{sh} - 2 I_{injO} \Delta I_{inj} R_{sh} - v_{sh} c_{sh} \frac{d}{dt} v_{sh} \right) \quad (۱۳)$$

و تابع تبدیل مبدل موازی در یک نقطه عملیاتی مطابق رابطه ۱۴ خواهد بود:

$$K_c = \frac{\Delta I_{DC}}{\Delta I_{inj}} = 3 \left(\frac{V_{sh} - c_{sh} V_{sh} S - 2I_{injO} R_{sh}}{L_{DC} I_{DCO} S} \right) \quad (14)$$

و در نهایت معادله مشخصه حلقه کنترل جریان به دست می‌آید:

$$1 + \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \frac{3(V_{sh} - c_{sh} V_{sh} S - 2I_{injO} R_{sh})}{L_{DC} I_{DCO} S} = 0 \quad (15)$$

۳- روش کنترلی

۳-۱- کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر PSO

کنترل‌کننده پیشنهادی یک کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه دوم (SOSM) مبتنی بر PSO است که هرگونه تغییر در بار را، که بر عملکرد کل سیستم اثر می‌گذارد، به‌عنوان یک اختلال در نظر می‌گیرد. ایده اصلی روش پیشنهادی ثابت نگه‌داشتن ولتاژ دو سر خازن لینک DC برای ایجاد جریان مناسب برای حذف هارمونیک‌ها توسط فیلتر موازی و نیز تزریق ولتاژ مناسب برای حذف اختلالات ولتاژ توسط فیلتر سری به‌طور هم‌زمان است. حلقه کنترلی بیرونی ولتاژ دو سر خازن لینک DC و ضریب توان را کنترل می‌کند و نیز جریان مرجع موردنیاز برای حلقه کنترلی داخلی را مشخص می‌نماید. حلقه کنترل جریان مقادیر مطلوب مرتبط باکیفیت جریان (مثل هارمونیک‌ها) را دنبال می‌کند. معادلات دینامیکی جریان شبکه و ولتاژ خازن لینک DC در قاب مرجع سنکرون چرخان با فرکانس شبکه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۱۷]:

$$L \frac{di_{inj_d}}{dt} = -r i_{inj_d} + \omega L i_{inj_q} + v_{load_d} - M V_{dc} \quad (16)$$

$$L \frac{di_{inj_q}}{dt} = -r i_{inj_q} + \omega L i_{inj_d} + v_{load_q} - M V_{dc} \quad (17)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = M (i_{inj_d} + i_{inj_q}) - i_{load} \quad (18)$$

که در آن V_{load_d} و V_{load_q} ولتاژ بار، V_{DC} ولتاژ لینک DC، i_{inj_d} و i_{inj_q} توان تزریقی فیلتر موازی، M تابع سوئیچینگ و ω فرکانس زاویه‌ای شبکه اصلی است.

در اغلب مطالعات مدل‌سازی و کنترل سیستم برای ساده‌سازی با فرض‌هایی همراه است. به‌عنوان مثال اغلب از تلفات سوئیچینگ صرف‌نظر می‌شود که باعث می‌شود مدل دقیق نبوده و رفتار آن به‌طور کامل مطابق با رفتار سیستم واقعی نباشد. بنابراین کنترل‌کننده باید در برابر هرگونه نامعینی پارامترها مقاوم باشد. در طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی نامعینی‌های پارامتریک مربوط به فیلترها شامل اندوکتانس صاف‌کننده، مقاومت پارازیتی هر فاز و تغییر در فرکانس زاویه‌ای شبکه کاملاً در نظر گرفته شده تا مقاوم بودن کنترل تضمین گردد. پارامترهای نام برده شده به‌صورت زیر مدل می‌شوند:

$$L = L_0 + \Delta L, r = r_0 + \Delta r, \omega = \omega_0 + \Delta \omega \quad (19)$$

در روابط فوق L_0, r_0, ω_0 مقادیر نامی اندوکتانس صاف‌کننده، مقاومت پارازیتی هر فاز و فرکانس زاویه‌ای $\Delta L, \Delta r$ و $\Delta \omega$ نامعینی‌های این پارامترها هستند که به‌عنوان یک سیگنال تغییر در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که پیشتر گفته شد کنترل‌کننده پیشنهادی شامل دو حلقه کنترلی است. برای بررسی کنترل مد لغزشی یک سیستم غیرخطی تک ورودی را در نظر بگیرید. این سیستم را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(x) + b(x, u) \\ y &= s(t, x) \end{aligned} \quad (20)$$

که در آن بردار حالت، u ورودی سیستم، $s(t, x)$ متغیر لغزش و $a(x)$ و $b(x, t)$ توابع نامشخص هستند. هدف کنترل سوق دادن s و مشتق آن به سمت صفر است. با دو بار مشتق‌گیری از متغیر $s(t, x)$ خواهیم داشت:

$$\dot{s} = \frac{\delta}{\delta t} s(t, x) + \frac{\delta}{\delta x} s(t, x) [a(x) + b(x, u)] \quad (21)$$

$$\ddot{s} = \frac{\delta}{\delta t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\delta}{\delta x} \dot{s}(t, x, u) [a(x) + b(x, u)] + \frac{\delta}{\delta u} \dot{s}(t, x, u) \dot{u} = \varphi(t, x, u) + \gamma(t, x, u) \dot{u} \quad (22)$$

با فرض اینکه متغیر لغزش S نسبت درجه اول با ورودی u دارد مقادیر ثابت و مثبت Γ_m و Φ ، Γ_M وجود دارند که شرایط زیر را برآورده سازند:

$$0 < \Gamma_m < \gamma(t, x, u) < \Gamma_M \quad (23)$$

$$-\Phi \leq \varphi(t, x, u) \leq \Phi$$

تحت شرایط بالا می توان نوشت:

$$\ddot{s} \in [-\Phi, +\Phi] + [\Gamma_m, \Gamma_M] \dot{u} \quad (24)$$

بنابراین قانون کنترل بر مبنای STA طراحی می شود. این قانون شامل دو بخش است:

$$u = u_1 + u_2$$

$$u_1 = -\alpha \text{sign}(s) \quad (25)$$

$$u_2 = -\lambda |s|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s)$$

کمیت های λ و α پارامترهای طراحی هستند که از شرایط مرزی ۲۴ به دست می آیند. شرط کافی برای همگرا شدن پاسخ صفر شدن لغزش و مشتق آن به صورت زیر خواهد بود [۲۰]:

$$\alpha > \frac{\Phi}{\Gamma_m}, \lambda^2 \geq \frac{4\Phi}{\Gamma_m^2} \frac{\Gamma_M}{\Gamma_m} \frac{\alpha + \Phi}{\alpha - \Phi} \quad (26)$$

۳-۲- الگوریتم PSO

با وجود اینکه قوانین کنترل در بخش قبل تعیین شد اما همچنان به شرایط مرزی (حد بالا) و نیز نامعینی های سیستم- که به دست آوردن آن اغلب سخت و پیچیده است- نیاز است. استفاده از یک مقدار ثابت در شرایط مختلف شبکه برای این پارامترها در عمل نمی تواند به کنترل مؤثر و واقعی کمک کند چون انتخاب مقادیر بزرگ می تواند باعث تشدید پدیده چترینگ و انتخاب مقادیر کم به ناپایداری احتمالی سیستم منجر شود.

برای رفع این مشکل از PSO که یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است و از الگوی رفتار دسته جمعی پرندگان برای یافتن پاسخ بهینه تقلید می کند استفاده می کنیم. برای ارائه مختصری از این تکنیک، فرض کنید فضای جستجو تابع هدف به صورت زیر است:

$$\Phi \subset R \quad (27)$$

$$f: \Phi \rightarrow \Gamma \subseteq R$$

از دحام و تعداد ذرات به عنوان یک مجموعه به صورت زیر تعریف می شود:

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (28)$$

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \Phi, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

هر ذره در فضای جستجوی Φ حرکت می کند و در این فضا می تواند با یک سرعت مناسب در جابجایی که به صورت زیر تعریف می شود، به نقطه ای مطلوب برسد:

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

بنابراین در هر تکرار (Te)، هر ذره توسط یک مجموعه مختصات که نشان دهنده موقعیت فعلی و سرعت تعریف می شود و می تواند جابجایی خود را طبق اطلاعات موجود از موقعیت پیشین انجام و بهترین موقعیت p_i خود را که در خلال جستجو داشته، ذخیره کند. این موقعیت بهینه ذره را می توان به صورت زیر ذخیره کرد:

$$p_i(t) = \arg \min f_i(t_e) \quad (30)$$

و در نهایت بهترین موقعیت ذرات به شکل زیر خواهد بود:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \tag{31}$$

به منظور شبیه‌سازی رفتار جمعی ذرات، PSO بهترین موقعیت کلی را که ذرات تاکنون داشته‌اند را تخمین می‌زند:

$$p_{\beta}(t_e) = \arg \min f_i(p_i(t_e)) \tag{32}$$

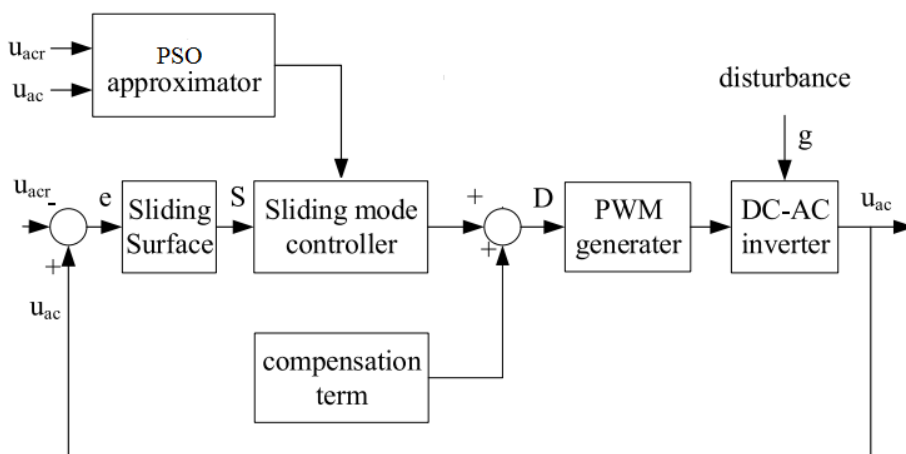
که در آن β شاخص بهترین موقعیت با کمترین مقدار تابع هدف (بهترین مقدار) در تکرار t_e است. دینامیک PSO به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} v_{ij}(t_e+1) = \omega v_{ij}(t_e) + R_p \psi_p(p_{ij}(t_e) - x_{ij}(t_e)) + R_{\beta} \psi_{\beta}(p_{\beta j}(t_e) - x_{ij}(t_e)) \\ x_{ij}(t_e+1) = x_{ij}(t_e) + v_{ij}(t_e+1) \\ i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \tag{33}$$

که در آن R_p و R_{β} مقادیر متغیرهایی است که به صورت یکنواخت در بازه $[0-1]$ پراکنده شده‌اند و ω ، χ_p و χ_{β} ضرایب وزنی هستند. بعد از هر تکرار مقادیر ضرایب، بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت کلی به روزرسانی می‌شود و به β مقدار جدیدی اختصاص می‌دهد. بنابراین بهترین موقعیت ذره x_i در تکرار t_e+1 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_i(t_e+1) = \begin{cases} x_i(t_e+1) & \text{if } f(x_i(t_e+1)) \leq p_i(t_e) \\ p_i(t_e) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{34}$$

در این مطالعه برای انتخاب بهترین مقدار پارامترهای طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی (کمیت‌های λ و α) از PSO استفاده می‌شود. انتخاب این کمیت‌ها طوری توسط PSO انجام می‌شود که کنترل‌کننده مد لغزشی بتواند خطای تفاوت ولتاژ خروجی و ولتاژ مبنا را به حداقل برساند. شماتیک کنترل پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی

هدف نهایی سیستم کنترلی کاهش خطای مرکب تفاوت ولتاژ خروجی و ولتاژ مبنا است. این خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

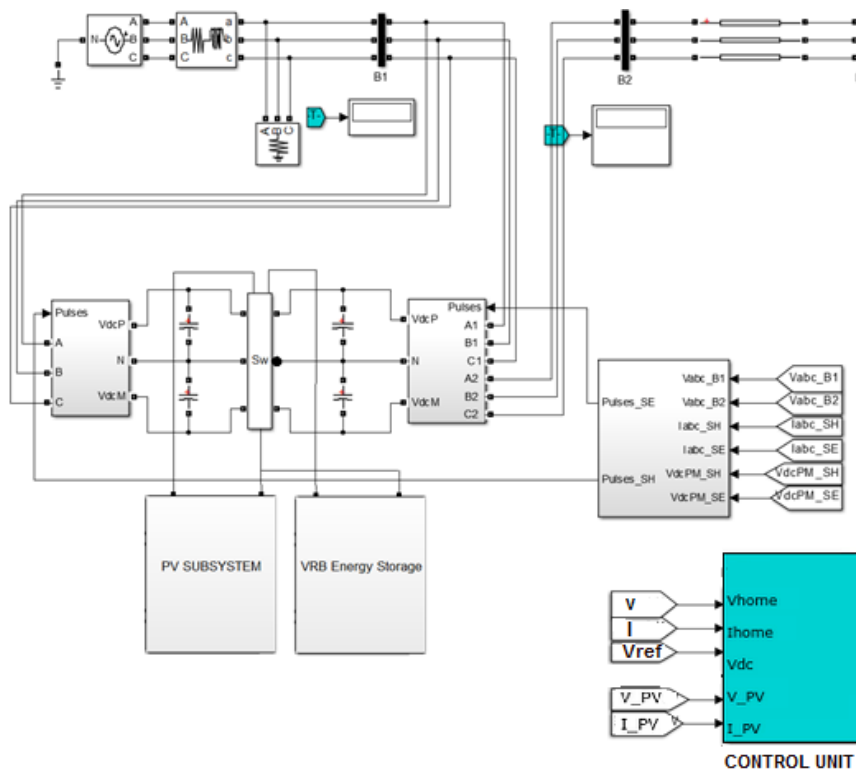
$$\begin{cases} e_{RQ}(t_i) = (V_{ref} - v_c(t_i))^2 \\ e_{RQ}(t_i+1) = (V_{ref} - v_c(t_{i+1}))^2 = (V_{ref} - v_c(t_i + T))^2 \end{cases} \tag{35}$$

$$f = \text{norm}(E_{RQ}) \tag{36}$$

E_{RQ} برداری است که تمام خطاهای $E_{RQ}(t_i)$ را شامل می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش توانایی استراتژی پیشنهادی در بهبود کیفیت توان در ریزشبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. توانایی مبدل‌های UPQC در جبران تغییرات نامطلوب ولتاژ و هارمونیک‌های جریان تحت کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط بارگذاری مختلف شبیه‌سازی و بررسی خواهد شد. شبیه‌سازی در محیط MATLAB/Simulink که ابزاری قوی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده مهندسی است انجام می‌گیرد. دیاگرام مداری سیستم شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین اطلاعات فنی سیستم مورد مطالعه در جداول ۱ تا ۴ آمده است.



شکل ۸: شبیه‌سازی سیستم در MATLAB/Simulink

جدول ۱: پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار
فرکانس سیستم	۵۰ هرتز
ولتاژ منبع	۱۱ کیلوولت
امپدانس خط	$0.078j + 0.0015$
قدرت اتصال کوتاه فیدر	۱۵۰۰ مگا ولت آمپر
بار متصل به ریزشبکه	۷۱۰ مگا ولت آمپر
	مجموع اعوجاجات هارمونیکی = ۲۵/۱٪
	$23/56 J + 150$

جدول ۲: مشخصات مبدل سری

پارامتر	مقدار
اندوکتانس فیلتر	۱.۲۵ میلی هانری
خازن فیلتر	۸۰ میکرو فاراد
مقاومت فیلتر	۰/۰۴ اهم
قدرت نامی	۷۹۰ کیلوولت آمپر

جدول ۳: مشخصات مبدل موازی

پارامتر	مقدار
اندوکتانس صاف کننده	۰/۴ میلی هانری
خازن لینک DC	۴۰ میلی فاراد
ولتاژ مرجع لینک DC	۱۷۰۰ ولت
قدرت نامی	۱۶۴۰ کیلوولت آمپر

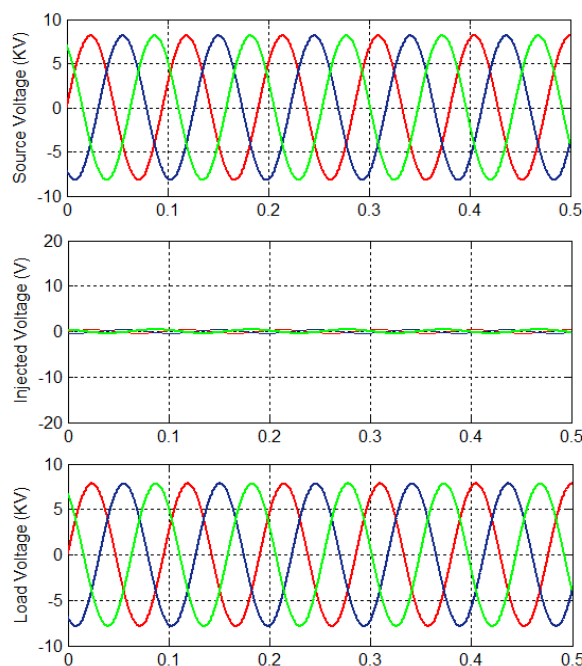
جدول ۴: مشخصات ترانسفورماتور تزریق

پارامتر	مقدار
توان نامی	۲ مگاوات آمپر
نسبت تبدیل	۲/۲ / ۱/۲ کیلوولت
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
شار نشستی	۰/۰۱ پریونیت

برای بررسی تأثیر استراتژی پیشنهادی سیستم در سه حالت مختلف مورد آزمایش و آنالیز قرار می‌گیرد.

۴-۱- مطالعه اول

در سناریو اول، ریزش شبکه تحت بارگذاری به شدت غیرخطی قرار می‌گیرد. در این سناریو باری به ریزش شبکه متصل می‌شود که هارمونیک شدیدی تزریق می‌کند. با توجه به اینکه خطایی در شبکه رخ نداده است، مبدل سری UPQC هیچ ولتاژی تزریق نمی‌کند و ولتاژ بار و منبع هم‌فاز هستند. ولتاژ باس بار، ولتاژ تزریقی مبدل سری و ولتاژ بار در شکل ۹ نشان داده شده است.



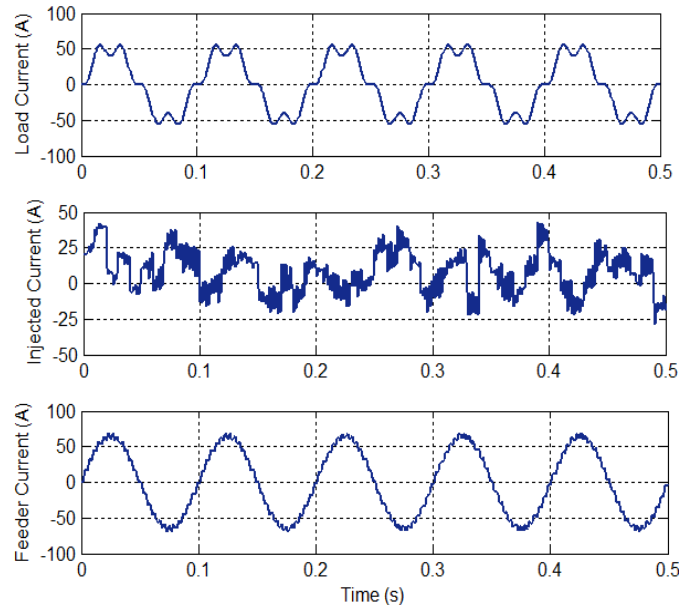
شکل ۹: ولتاژ منبع، تزریق شده توسط مبدل موازی و ولتاژ بار در مطالعه اول

در همین حال مبدل موازی مشغول به کار می‌شود و با تزریق جریان هارمونیک بار را حذف می‌کند. مجموع اعوجاجات هارمونیکی (THD)^۷ بار غیرخطی قبل از جبران‌سازی ۲۵/۰۸ درصد است. در این شرایط هارمونیک ولتاژ بار توسط جریان تزریق شده از سوی مبدل موازی به ۱/۷۶ درصد کاهش یافته است. آنالیز هارمونیکی جریان‌های بار و منبع در شکل ۱۲ نشان

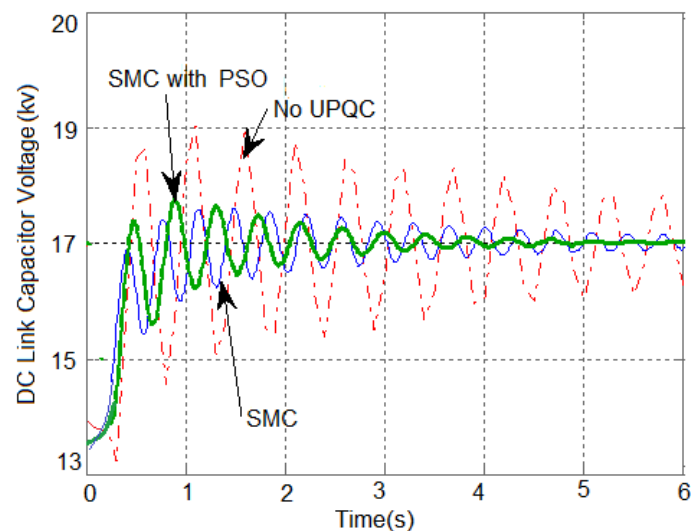
^۷ – Total Harmonic Distortion

داده شده است. در جدول ۵ عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با سایر روش‌ها مقایسه شده است. در این جدول تأثیرگذاری بیشتر کنترل کننده پیشنهادی در کاهش میزان مجموع اعوجاجات هارمونیکی نسبت به کنترل کننده PI و کنترل فازی [۲۰] نشان داده شده است.

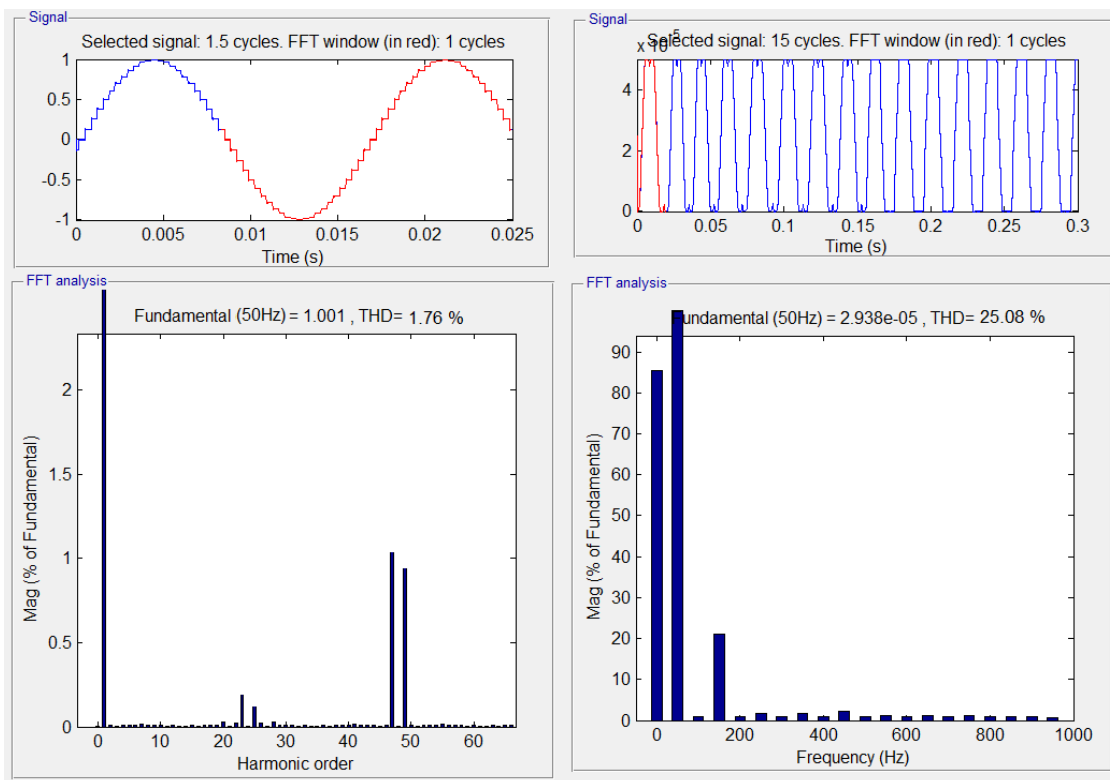
شکل ۱۰ جریان بار، جریان تزریق شده توسط مبدل و جریان منبع را نشان می‌دهد. ولتاژ خازن لینک DC نیز در این سناریو تقریباً ثابت مانده است. جبران کننده موازی ولتاژ لینک DC را در مقدار مرجع خود (۱.۷ کیلوولت) ثابت نگه داشته است. شکل ۱۱ تأثیرگذاری مؤثر UPQC تحت کنترل کننده پیشنهادی در ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن لینک DC نسبت به وقتی که از UPQC با کنترل کننده PI معمولی استفاده می‌شود و در حالت بدون حضور UPQC دیده می‌شود.



شکل ۱۰: شکل موج جریان بار، جریان تزریق شده توسط مبدل و جریان منبع در مطالعه اول



شکل ۱۱: ولتاژ خازن لینک DC در مطالعه اول



شکل ۱۲: آنالیز هارمونیک جریان بار ریزشکبه و جریان منبع با حضور UPQC در مطالعه اول

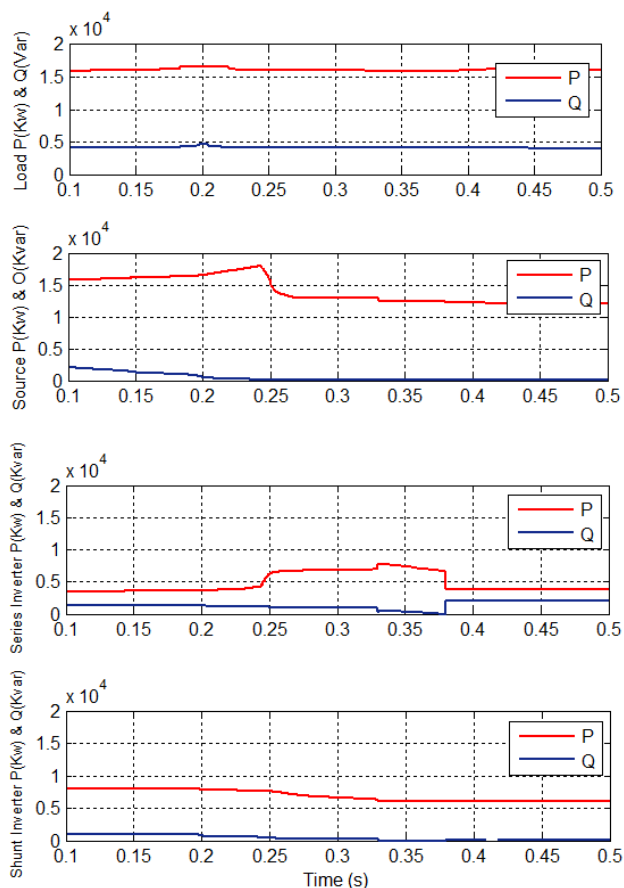
جدول ۵: مقایسه تأثیر حضور کنترل‌کننده پیشنهادی و سایر روش‌ها

مقدار THD جریان سمت شبکه		روش
مؤلفه‌های هارمونیک کمتر از ۵	مؤلفه‌های هارمونیک کمتر از ۹	
٪۹۱.۲۴	٪۲۵/۰۸	عدم حضور UPQC
٪۸/۹۳	٪۸/۷۲	با حضور UPQC و کنترل‌کننده PI
٪۳/۳۴	٪۳/۲۱	با حضور UPQC و کنترل‌کننده فازی [۲۳]
٪ ۱/۸۱	٪ ۱/۷۶	با حضور UPQC و کنترل‌کننده پیشنهادی

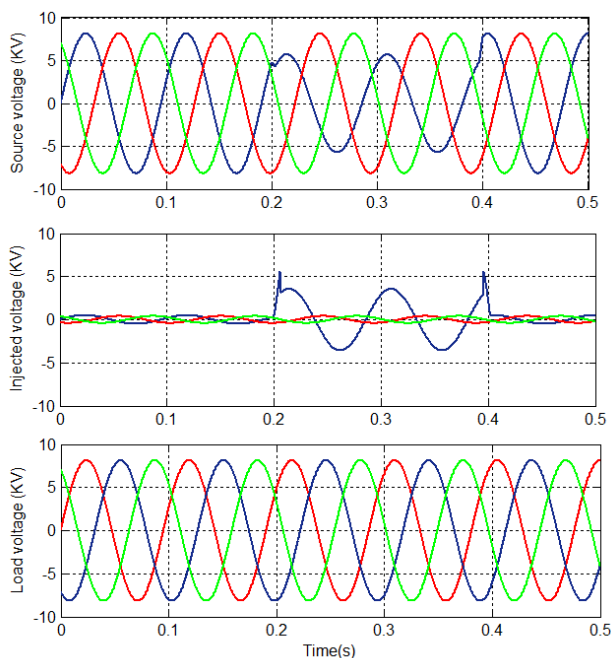
در کنار مزایای به‌کارگیری UPQC در ریزشکبه، توانایی این تجهیز در تزریق توان در ساختار پیشنهادی در شکل ۱۳ به‌وضوح دیده می‌شود. در این شکل توانهای اکتیو و راکتیو بار و منبع و نیز توانهای تزریق شده توسط فیلترهای سری و موازی دیده می‌شود.

۲-۴- مطالعه دوم

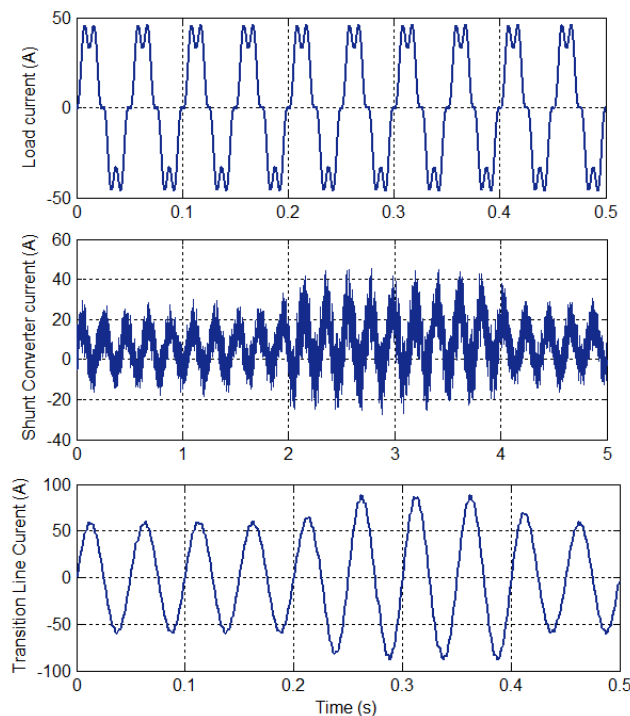
در این حالت افت ولتاژی معادل ۰/۳ پریونیت از لحظه ۰/۲ ثانیه تا ۰/۴ ثانیه ایجاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نشان داده شده است. ولتاژ تزریقی توسط مبدل موازی در زمان افت ولتاژ تک‌فاز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ولتاژ پایین‌تر از مقدار نرمال است فیلتر موازی با تزریق ولتاژ مناسب جبران‌سازی مؤثری انجام داده و ولتاژ را به سطح مطلوب بازگردانده است. جریان بار در شرایط افت ولتاژ و جریان تزریقی توسط اینورتر موازی که منجر به جبران‌سازی بار و نیز حذف هارمونیک‌ها شده است در شکل ۱۵ دیده می‌شود. ولتاژ دو خازن لینک DC همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود تقریباً ثابت نگه داشته شده است.



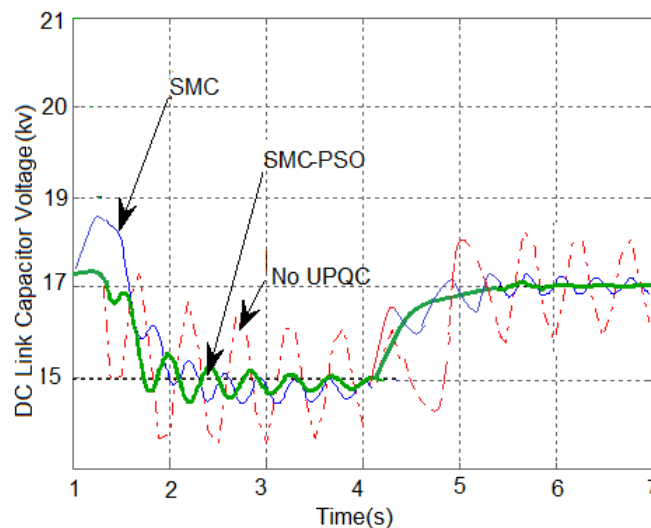
شکل ۱۳: توانهای اکتیو و راکتیو بار، منبع و تزریقی فیلترهای سری و موازی در مطالعه اول



شکل ۱۴: ولتاژ منبع، تزریق شده توسط مبدل موازی و ولتاژ بار در مطالعه دوم



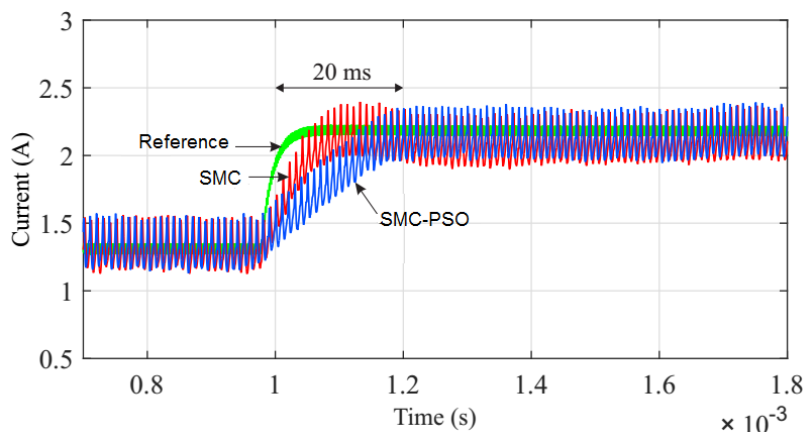
شکل ۱۵: جریان بار، باس بار و تزریقی توسط مبدل موازی در مطالعه دوم (افت ولتاژ تک‌فاز)



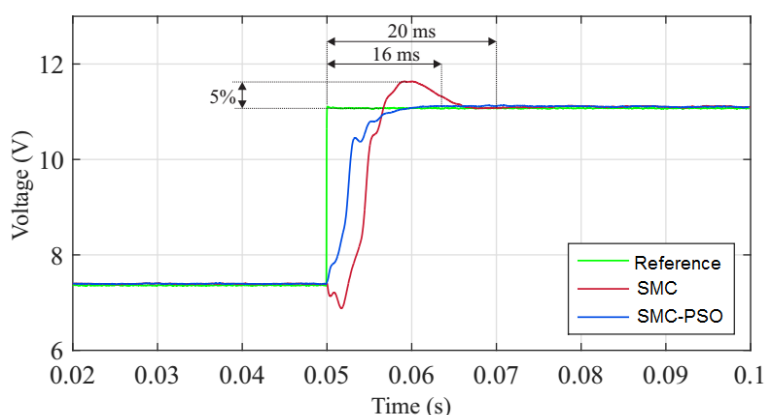
شکل ۱۶: ولتاژ خازن لینک DC در مطالعه دوم (افت ولتاژ تک‌فاز)

۴-۳- مطالعه سوم

در مطالعه سوم توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در دنبال کردن تغییرات ولتاژ و جریان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور در لحظه ۱ میلی‌ثانیه دامنه جریان مرجع از مقدار $1/3$ آمپر به $2/2$ آمپر افزایش می‌یابد. شکل ۱۶ عملکرد کنترل‌کننده را در دنبال کردن تغییرات جریان مینا نشان می‌دهد که در آن زمان نشست تقریباً 20 میلی‌ثانیه و تقریباً بدون جهش است. همچنین چگونگی کنترل ولتاژ کنترل‌کننده پیشنهادی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این شکل عملکرد فوق‌العاده کنترل‌کننده در کاهش فرا جهش قابل مشاهده است. در حالی که با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی استاندارد 5 درصد است، این مقدار با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی به مقدار $0/36$ کاهش یافته است. علاوه بر این زمان نشست نمودار ولتاژ از 2 میلی‌ثانیه (در کنترل‌کننده مد لغزشی استاندارد) به 16 میلی‌ثانیه کاهش یافته است که قدرت و سرعت عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر توده ذرات را دنبال کردن تغییرات نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: دنبال کردن تغییر در جریان مرجع



شکل ۱۸: دنبال کردن تغییر در ولتاژ مرجع

۵- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر PSO برای کنترل مبدل های UPQC برای بهبود کیفیت توان در ریزشبکه ها ارائه گردید. در روش کنترلی پیشنهادی الگوریتم توده ذرات برای انتخاب بهینه پارامترهای کنترل کننده مد لغزشی مورد استفاده قرار گرفت که ضمن افزایش استحکام کنترل کننده و افزایش مقاومت در برابر اختلال خارجی، به افزایش دقت دنبال کردن تغییرات منجر گردید. ساختار پیشنهادی برای اتصال واحدهای تولید پراکنده در این پژوهش ضمن کاهش هزینه ها و کمک به کیفیت توان جبران ساز را قادر به تزریق توان اکتیو نیز می کند که تأثیر به سزایی در قدرت جبران سازی UPQC دارد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی کامپیوتری در محیط MATLAB/Simulink کنترل مؤثر فیلترهای سری و موازی UPQC به کمک استراتژی پیشنهادی در بهبود شاخص های مهم کیفیت توان از جمله کاهش هارمونیک های ولتاژ و جریان و کاهش انحرافات نامطلوب ولتاژ در شرایط بارگذاری مختلف و تحت خطاهای رایج احتمالی در ریزشبکه ها نشان می دهد.

منابع

- [1] J. C. Glenn, T. J. Gordon, and E. Florescu, "2009 State of the Future. Washington DC," Millennium Project, 2009.
- [2] F. Daviet, "Beyond Carbon Financing: the role of sustainable development policies and measures in REDD. Climate and Forests," World Resources Institute, Policy series report, 2009.

- [3] E. Kuznetsova *et al.*, "ability of Smartgrid systems, in *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*," *European Safety and Reliability Conference(ESREL 2011)*, Troyes, France, 2011.
- [4] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Summary Report: *2012 DOE Microgrid Workshop*. [Online]. Available:
- [5] M. A. Heidari, M. Nafar, T. Niknam, "A Novel Sliding Mode Based UPQC Controller for Power Quality Improvement in Micro-Grids," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 167–177, 2022, doi:10.1007/s42835-021-00886-3.
- [6] P. Cheng and H. Nian, "Direct power control of voltage source inverter in a virtual synchronous reference frame during frequency variation and network unbalance," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 502-511, 2016, doi:10.1049/iet-pel.2015.0219.
- [7] H. Nian, Y. Shen, H. Yang, and Y. Quan, "Flexible grid connection technique of voltage-source inverter under unbalanced grid conditions based on direct power control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4041-4050, 2015, doi:10.1109/TIA.2015.2428219.
- [8] Y. Song and H. Nian, "Stationary frame control strategy for voltage source inverter under unbalanced and distorted grid voltage," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, United States, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953532.
- [9] S. R. K. Hoseini, H. Givi, E. Farjah, and T. Ghanbari, "Phase locked loop-free sliding-mode-based power control for grid-connected voltage-sourced inverters under unbalanced network conditions," *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Mashhad, Iran, 2017, doi: 10.1109/PEDSTC.2017.7910369.
- [10] R. S. R. Chilipi, N. Al Sayari, K. H. Al Hosani, and A. R. Beig, "Adaptive notch filter-based multipurpose control scheme for gridinterfaced three-phase four-wire DG inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 4, pp. 4015-4027, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2676098.
- [11] S. Huang *et al.*, "Distributed Predefined-Time Fractional-Order Sliding Mode Control for Power System With Prescribed Tracking Performance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 2233-2246, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3117126.
- [12] N. Vahidfar, M. H. Ershad, "Sliding Mode Controller Design for DC-DC Quasi-Z-Source," *IAU j. Signal Processing and Renewable Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 21-26, 2018, doi: 20.1001.1.25887327.2018.2.3.3.5.
- [13] R. Ziaratban, A. R. Haghghi, P. Reihani Ardebili, "Design of A No-chatter Fractional Sliding Mode Control Approach for Stabilization of Non-Integer Chaotic Systems," *IAU J. Industrial Mathematics*, vol. 12, no. 3, 2020, dor: 20.1001.1.20085621.2020.12.3.2.2.
- [14] Z. Weixiang, W. Yueying, L. Yinzheng, "Sliding mode control for networked control systems: A brief survey," *ISA Transactions*, vol. 124, no. 1, pp. 249-259, 2022, doi:10.1016/j.isatra.2020.12.049.
- [15] L. Ouada, S. Benagoune, S. Belkacem, "Neuro-fuzzy Sliding Mode Controller Based on a Brushless Doubly Fed Induction Generator," *IJE TRANSACTIONS B: Applications*, Vol. 33, No. 2, pp. 248-256, February 2020, doi:10.5829/ije.2020.33.02b.09.
- [16] L. Liu, J. Fei, "Extended State Observer Based Interval Type-2 Fuzzy Neural Network Sliding Mode Control with Its Application in Active Power Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 5138-5154, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3127896.
- [17] M. Hosseinpour, A. Yazdian, M. Mohamadian, and J. Kazempour. "Desing and simulation of UPQC to improve power quality and transfer wind energy to grid." *Jour of Applied Sciences*, vol.8, no. 21, pp: 3770-3782, 2008.

- [18] M. Hosseinpour,, Y. Mohamadrezapour, and S. Torabzade. "Combined operation of unified power quality conditioner and photovoltaic array." *Journal of Applied Sciences*, vol.9, no.4, pp 980-988,2009, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852843.
- [19] X. Qiu , T. A. Nguyen, J. D. Guggenberger , "A Field Validated Model of a Vanadium Redox Flow Battery for Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1592-1601, 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2310212.
- [20] P. Ray, P. K. Ray, S. K. Dash, "Power Quality Enhancement and Power Flow Analysis of a PV Integrated UPQC System in a Distribution Network," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 201-211, 2022, doi: 10.1109/TIA.2021.3131404.
- [21] N. Afiqah, Z. Ajisman and A. R. Yusoff, "Modelling of Photovoltaic Module Using Matlab Simulink," *2nd International Manufacturing Engineering Conference and 3rd Asia-Pacific Conference on Manufacturing Systems(iMEC-APCOMS)* , 2015,pp.12-14, doi: 10.1088/1757-899X/114/1/012137.
- [22] Gonzalez, J. A. Moreno, and L. Fridman, "Variable gain super twisting sliding mode control," *IEEE Transaction on Autom. Control*, vol. 57, no. 8, pp. 2100–2105, 2014, doi: 10.1109/TAC.2011.2179878.
- [23] A. Rasheed and G. K. Rao, "Improvement of Power Quality for Microgrid using Fuzzy based UPQC Controller." *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 8, no.23, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i23/70751, 2015.