

## Providing Improved Structure and Adaptive Control Strategy for Solar System with the Ability to Improve Power Quality in Islanded Microgrid

Reza Ghobadi Nejad<sup>1,2</sup>, M.Sc, Ghazanfar Shahgholian<sup>1,2</sup>, Professor

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

### Abstract:

Due to the ever-increasing price of fossil fuels and growing concerns about environmental pollution, the utilization of renewable resources, such as photovoltaic (PV) systems, has witnessed significant growth. However, the lack of an optimal structure and control strategy for PV systems poses a crucial challenge in fully exploiting their potential capabilities. This article proposes a suitable structure and adaptive control strategy for PV systems, enabling the maximum utilization of PV system capabilities in island microgrids. The proposed control structure and strategy are based on a two-stage converter, facilitating maximum power point tracking in PV, injecting the generated PV power into the microgrid with minimal harmonic levels, and improving the power quality of the microgrid by compensating for harmonic components. In this method, the tasks of the DC/AC converter, including the injection of PV active power into the microgrid, provision of reactive power, and harmonic compensation, are prioritized and managed by considering the current peak limitation to prevent inverter overcurrent. Additionally, an adaptive controller is designed to enhance the accuracy and speed of power control. The proposed structure and strategy have been evaluated by simulating a sample microgrid in MATLAB/Simulink. The simulation results demonstrate that the proposed method enables the PV system to operate at maximum power with minimum harmonic levels, leading to a significant improvement in the speed and accuracy of the control system and enhancing the power quality of the islanded microgrid.

**Keywords:** Islanded microgrid, Adaptive controller, Power quality, Current limiting.

**Received:** 17 May 2023

**Revised:** 26 July 2023

**Accepted:** 08 August 2023

**Corresponding Author:** Dr. Ghazanfar Shahgholian, shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.30486/teeges.2023.1986388.1073>



## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

### ارائه ساختار بهبود یافته و استراتژی کنترلی تطبیقی برای سیستم خورشیدی با قابلیت بهبود کیفیت توان در ریزشبه جزیره ای

رضا قبادی نژاد<sup>۱،۲</sup>، کارشناسی/ارشد، غضنفر شاهقلیان<sup>۱،۲</sup>، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

**چکیده:** امروزه با توجه به افزایش روز افزون قیمت سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش نگرانی در زمینه آلودگی محیط زیست، استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند سیستم‌های فتوولتائیک (PV) افزایش یافته است. با این وجود نبود یک ساختار و استراتژی کنترلی بهینه برای سیستم‌های PV، یک چالش مهم در زمینه استفاده حداکثری از قابلیت‌های بلقوه این منابع محسوب می‌شود. در این مقاله یک ساختار مناسب و همچنین یک استراتژی کنترلی تطبیقی برای سیستم‌های PV پیشنهاد شده که امکان استفاده حداکثری از قابلیت‌های سیستم PV در ریزشبه‌های جزیره‌ای را فراهم می‌سازد. ساختار و استراتژی کنترلی پیشنهادی مبتنی بر مبدل دو مرحله‌ای است که امکان ردیابی نقطه حداکثر توان PV، تزریق توان تولیدی PV به ریزشبه با حداقل سطح هارمونیک و همچنین بهبود کیفیت توان ریزشبه از طریق جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک را فراهم می‌سازد. در این روش، وظایف مبدل DC/AC شامل تزریق توان اکتیو PV به ریزشبه، تامین توان راکتیو و جبران‌سازی هارمونیک با در نظر گرفتن محدودت‌سازی پیک جریان اولویت‌بندی و مدیریت می‌شود تا از اضافه جریان شدن اینورتر جلوگیری گردد. همچنین یک کنترل‌کننده تطبیقی طراحی شده که باعث بهبود دقت و سرعت کنترل توان می‌گردد. ساختار و استراتژی پیشنهادی با شبیه‌سازی یک ریزشبه نمونه در سیمولینک متلب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی امکان بهره‌برداری از سیستم خورشیدی در حداکثر توان و با حداقل سطح هارمونیک را فراهم ساخته و باعث بهبود قابل توجه در سرعت و دقت سیستم کنترلی و همچنین بهبود کیفیت توان ریزشبه جزیره‌ای می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ریزشبه جزیره‌ای، کنترل‌کننده تطبیقی، کیفیت توان، محدودسازی جریان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

نویسنده‌ی مسئول: دکتر غضنفر شاهقلیان، shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.30486/teeges.2023.1986388.1073>





## ۱- مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> با توجه به مزایای آنها و همچنین با توجه به ضررهای فراوان سوخت‌های فسیلی رو به افزایش است [۱،۲]. در تمام کشورها تلاش‌های زیادی برای استفاده هر چه بیشتر از این انرژی‌های پاک صورت گرفته است. استفاده گسترده از سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۲</sup> (PV) به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های تولید پراکنده (DG) باعث شده که اهمیت بهینه‌سازی و توسعه ساختار و همچنین بهبود روش‌های کنترل این سیستم‌ها افزایش یابد [۳،۴]. بنابراین در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی بهبود ساختار و استراتژی کنترلی سیستم‌های PV انجام شده است. در سیستم‌های PV، برای اتصال به شبکه یا بار از مبدل قدرت استفاده می‌شود. همچنین در این سیستم‌ها به‌طور معمول برای تنظیم ولتاژ و ایجاد ایزولاسیون، از ترانسفورماتور قدرت استفاده می‌گردد. از این نظر سیستم‌های PV به نوع بدون ترانسفورماتور و نوع دارای ترانسفورماتور دسته‌بندی می‌شوند. در یک دسته‌بندی دیگر بر اساس تعداد مبدل‌های استفاده شده، سیستم‌های PV شامل پیکربندی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای هستند. در سیستم‌های تک مرحله‌ای، ماژول PV مستقیماً از طریق اینورتر به شبکه متصل می‌گردد. ولی در پیکربندی دو مرحله‌ای سیستم PV از طریق یک مبدل DC/DC و یک اینورتر به شبکه متصل می‌گردد [۵،۶]. در پیکربندی دو مرحله‌ای با استفاده از مبدل DC/DC می‌توان سطح ولتاژ DC پنل PV را افزایش داد که باعث کاهش جریان اینورتر شده و کاهش جریان نامی مبدل و کاهش تلفات را به همراه دارد. همچنین در این پیکربندی امکان ردیابی نقطه حداکثر توان<sup>۳</sup> (MPPT) از طریق کنترل مبدل DC/DC فراهم بوده و بنابراین ساختار کنترلی ساده‌تری در مقایسه با پیکربندی تک مرحله‌ای دارد. به همین دلیل در بیشتر مطالعات از این پیکربندی در سیستم‌های PV استفاده می‌شود [۷،۸].

با توجه به اینکه ساختار سیستم PV تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد آن دارد، تمرکز برخی از مطالعات قبلی بر روی بهبود عملکرد سیستم‌های PV از طریق ارائه یک پیکربندی مناسب بوده است [۹،۱۰]. در مطالعات قبلی از ساختارهای مختلف مانند مبدل پل کامل با قابلیت کیلدزنی نرم [۱۱]، ساختار چندلایه‌ای [۱۲]، اینورتر شبه منبع-امپدانس [۱۳]، مبدل DC/AC چهار کلیده [۱۴] و اینورتر چندسطحی [۱۵،۱۶] برای اتصال PV به شبکه یا بار ایزوله استفاده شده است. استفاده از اینورترهای چندسطحی باعث کاهش هارمونیک مخرب کلی (THD) و بهبود راندمان سیستم PV می‌شود [۱۷،۱۸]. بر این اساس در برخی کاربردها بخصوص کاربردهای ولتاژ یا توان متوسط و بالا، از مبدل‌های چندسطحی برای اتصال سیستم PV به شبکه استفاده می‌شود. به‌طور کلی هدف اصلی این مطالعات، بهبود راندمان، کاهش رپل جریان و ولتاژ، کاهش THD ولتاژ و جریان و همچنین کاهش هزینه مبدل بوده است. جمع‌بندی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در بین ساختارهای مختلف، پیکربندی دو سطحی بدون ترانسفورماتور از نظر سادگی سیستم کنترلی، هزینه موثر و راندمان عملکرد بهتری نسبت به ساختارهای دیگر ارائه می‌دهد. بر این اساس در این مقاله یک پیکربندی دو مرحله برای سیستم‌های PV پیشنهاد شده است.

بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های PV علاوه بر پیکربندی مناسب، نیازمند یک سیستم کنترلی کارآمد است که در مقالات زیادی به این موضوع پرداخته شده است [۱۹،۲۰]. به‌طور معمول در این سیستم‌ها از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) استفاده می‌شود. کنترل‌کننده PI ساختار ساده‌ای داشته و به همین دلیل در کاربردهای صنعتی زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود این کنترل‌کننده دارای برخی ضعف‌های مهم مانند وابسته بودن عملکرد به نقطه کاری و عدم عملکرد بهینه در تمام شرایط کاری سیستم است [۲۱،۲۲]. به همین دلیل در مطالعات قبلی از روش‌های کنترلی پیچیده مانند کنترل پیش‌بین مدل<sup>۴</sup> (MPC) [۲۳] کنترل مود لغزشی غیرخطی<sup>۵</sup> (NSMC) و انتگرالی [۲۴،۲۵]، کنترل‌کننده ترکیبی مبتنی بر کنترل مود لغزشی فازی<sup>۶</sup> (FSMC) [۲۶] و کنترل پسگام تطبیقی [۲۷] به عنوان جایگزین کنترل‌کننده PI معمولی و با هدف بهبود عملکرد سیستم PV استفاده شده است. در برخی مطالعه‌ها نیز بر روی اصلاح کنترل‌کننده PI و ارائه یک کنترل‌کننده تطبیقی تمرکز شده است. در این راستا از روش‌های مختلف مانند کنترل‌کننده PI خود تنظیم مبتنی بر تخمین [۲۸]، کنترل‌کننده PI خود تنظیم مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری، سیستم تطبیقی مرجع مدل (MRAS) [۲۹] و کنترل‌کننده بازگشتی سینوسی خود تنظیم (STRC) برای کنترل سیستم‌های PV استفاده شده است. در [۳۰] از الگوریتم هدایت افزایشی مبتنی STSRC برای ردیابی نقطه حداکثر توان و از کنترل‌کننده جریان مبتنی بر STSRC برای کنترل مبدل استفاده شده است. تمرکز این مطالعه‌ها بر روی مقاوم‌سازی کنترل‌کننده از طریق تخمین زمان حقیقی پارامترها و به روز رسانی ضرایب کنترل‌کننده است. این روش‌ها عملکرد مناسبی ارائه می‌دهند ولی معمولاً ساختار پیچیده‌ای داشته و فرآیند طراحی آنها



نیز طولانی و دشوار است. به منظور رفع این چالش‌ها، در این مقاله یک کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم‌های PV طراحی شده که ضمن داشتن حجم محاسبات معقول، سبب بهبود قابل توجه در عملکرد آن می‌شود.

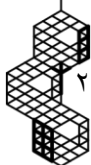
به دلیل افزایش حضور بارهای غیرخطی در شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های کوچک، این شبکه‌ها با چالش‌های مربوط به کیفیت توان روبه‌رو هستند. بر این اساس در برخی کارها سعی شده است تا با استفاده از فیلتر قدرت فعال (APF) در کنار منابع PV، شاخص‌های کیفیت توان شبکه بهبود داده شود. با این وجود استفاده از APF سبب افزایش هزینه و اندازه سیستم PV می‌شود [۳۱]. در [۳۲] نشان داده شده که می‌توان از ظرفیت آزاد مبدل DC/DC برای تامین خدمات جانبی مانند بهبود کیفیت توان یا تامین توان راکتیو شبکه AC استفاده کرد به نحوی که خللی در عملکرد اصلی آن ایجاد نشود. به همین دلیل در برخی مقالات بر روی استفاده از سیستم‌های PV برای تامین خدمات جانبی نظیر مشارکت در تنظیم فرکانس [۳۳،۳۴]، جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیکی و بهبود کیفیت توان شبکه توزیع [۳۵،۳۶] تمرکز شده است. بر این اساس، در این مقاله از مبدل سیستم PV علاوه بر تزریق توان تولیدی به شبکه برای جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیکی بارهای غیرخطی در یک ریزشبکه جزیره‌ای استفاده می‌شود.

بر اساس جدول (۱)، با وجود مطالعه‌های فراوانی که بر روی بهبود ساختار یا کنترل‌کننده سیستم‌های PV انجام شده، تاکنون در هیچ یک از مطالعات به صورت همزمان بر روی بهبود پیکربندی، طراحی کنترل‌کننده تطبیقی و همچنین مشارکت PV در جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیکی در یک ریزشبکه جزیره‌ای و با در نظر گرفتن محدودیت جریان مبدل تمرکز نشده است. بر این اساس، در این مقاله این موضوع مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور یک ساختار دو مرحله‌ای پیشنهاد شده که مبتنی بر یک مبدل DC/DC افزاینده درهم‌تنیده و یک مبدل AC/DC سه-سطحی برش نقطه خنثی (NPC) است. مبدل DC/DC درهم‌تنیده در کنار مدولاسیون عرض پالس شیفت فاز (PS-PWM) دارای یک جریان پیوسته بوده و سبب کاهش ریبیل جریان و ولتاژ در سمت DC می‌شود. این ویژگی سبب کاهش ظرفیت خازن مورد نیاز در سمت DC می‌شود که از نظر اقتصادی به صرفه است. همچنین استفاده از مبدل NPC سبب کاهش مولفه‌های هارمونیکی تزریقی سیستم PV به ریزشبکه شده و اندازه المان‌های فیلتر خروجی مبدل را نیز کاهش می‌دهد. بر اساس استراتژی کنترلی پیشنهادی، مبدل DC/DC درهم‌تنیده قادر است ضمن افزایش ولتاژ خروجی پنل PV، نقطه حداکثر توان را نیز ردیابی کند. وظیفه اصلی مبدل AC/DC تزریق توان PV به ریزشبکه است. با این وجود استراتژی کنترلی سیستم PV را قادر می‌سازد در تامین توان راکتیو و همچنین جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان ریزشبکه که ناشی از بارهای غیرخطی هستند مشارکت کند، ضمن اینکه این ویژگی با در نظر گرفتن محدودیت جریان نامی اینورتر اولویت‌بندی و محقق می‌شود. این ویژگی سبب کاهش مولفه‌های هارمونیکی و بهبود کیفیت توان ریزشبکه می‌شود و از اضافه جریان شدن اینورتر نیز جلوگیری می‌کند. به منظور بهینه کردن عملکرد استراتژی کنترلی مبدل AC/DC، از یک کنترل‌کننده تطبیقی برای تنظیم ولتاژ و کنترل توان اکتیو استفاده شده است که مبتنی بر کنترل‌کننده PI و منطق فازی است. کنترل‌کننده PI-Fuzzy پیشنهادی ضمن برطرف کردن ضعف‌های کنترل‌کننده PI معمولی، امکان کنترل بهینه سیستم PV در تمام شرایط کاری را فراهم ساخته و پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود می‌بخشد. ساختار و استراتژی پیشنهادی برای سیستم PV در یک ریزشبکه جزیره‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این ریزشبکه به همراه روش پیشنهادی در نرم‌افزار سیمولینک متلب پیاده‌سازی می‌شود.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. ساختار پیشنهادی در بخش دوم توضیح داده شده است. در بخش سوم استراتژی کنترلی و در بخش چهارم روش کنترل تطبیقی ارائه می‌شود. اطلاعات سیستم مورد مطالعه به همراه نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم آمده و تجزیه و تحلیل شده است. بخش ششم نیز شامل نتیجه‌گیری و اهداف مطالعه‌های آینده است.

بر اساس توضیحات ارائه شده، مهمترین نوآوری‌های مقاله عبارتند از:

- بهبود ساختار و کنترل‌کننده مبدل سیستم‌های PV با هدف بهبود فرآیند ردیابی نقطه حداکثر توان
- ارائه یک روش کنترلی تطبیقی مبتنی بر کنترل‌کننده PI و کنترل منطق فازی با هدف افزایش دقت و سرعت سیستم کنترلی
- ارائه یک استراتژی کنترلی برای سیستم PV که ضمن محقق ساختن ردیابی نقطه حداکثر توان، امکان جبران‌سازی توان راکتیو و مولفه‌های هارمونیکی یک ریزشبکه جزیره‌ای را با در نظر گرفتن محدودیت جریان مبدل AC/DC فراهم می‌سازد.





جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های مدل پیشنهادی با جدیدترین مقالات موجود

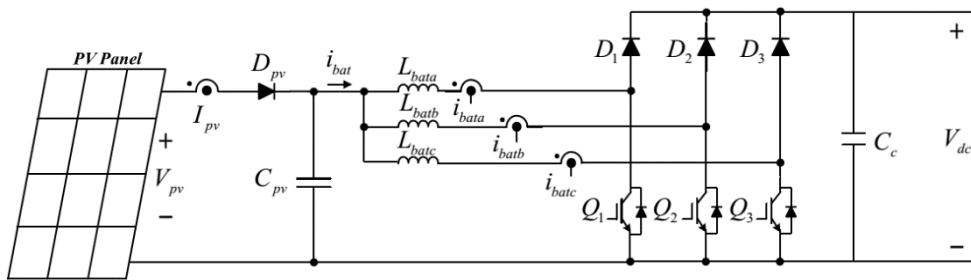
مرجع	روش MPPT	کاهش هارمونیک تزریقی	کاهش ریپل جریان و ولتاژ لینک DC	بهبود کیفیت توان	محدودسازی دامنه جریان مبدل AC/DC	کنترل کننده تطبیقی	هدف اصلی
[۱۳]	P&O	*	*	*	*	NSMC	استخراج حداکثر توان در ضریب توان واحد، بهبود کنترل کننده
[۱۴]	FSMC	✓	*	*	*	*	افزایش دقت استخراج حداکثر توان، بهبود الگوریتم MPPT
[۱۸]	STSRC-INC	✓	✓	*	*	STSRC	پوشش عدم قطعیت تغییرات شدت تابش و پارامترهای سیستم
[۲۳]	P&O	*	*	✓	✓	*	بهبود کیفیت توان و قابلیت گذر از خطا
[۲۴]	P&O	*	*	✓	*	کنترل مقاوم	بهبود کیفیت توان شبکه توزیع از طریق مبدل سیستم‌های PV
پیشنهادی	P&O	✓	✓	✓	✓	PI-Fuzzy	بهبود ساختار، بهبود دقت ردیابی حداکثر توان و بهبود کیفیت توان با در نظر گرفتن محدودیت جریان

## ۲- ساختار پیشنهادی سیستم فتوولتائیک

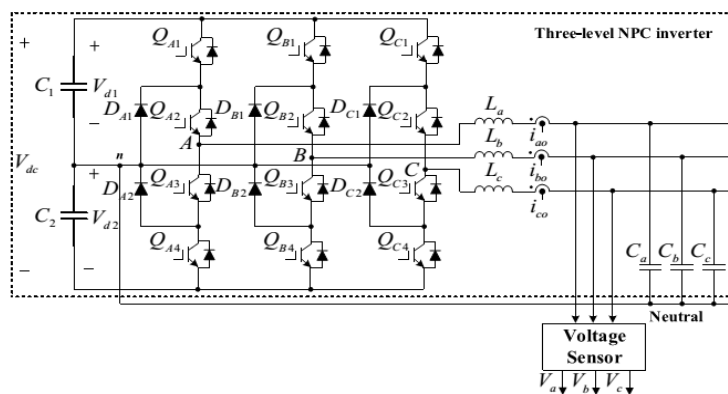
در این مقاله سیستم PV به صورت یک ساختار دو مرحله‌ای در نظر گرفته شده است. مرحله اول یک مبدل DC/DC افزایشی است که وظیفه افزایش ولتاژ خروجی PV و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم MPPT را برای ماژول PV بر عهده دارد. یکی از انواع شناخته شده مبدل‌های DC/DC افزایشی، مبدل افزایشی درهم‌تنیده است. استفاده از مبدل افزایشی درهم‌تنیده در مقایسه با مبدل‌های افزایشی کلاسیک، مزایای فراوانی به همراه دارد که مهمترین این مزایا کاهش ریپل جریان ورودی و خروجی، راندمان بالاتر، پاسخ گذرای سریع‌تر، آلودگی الکترومغناطیسی کمتر و قابلیت اطمینان بالاتر است [۳۷]. با توجه به مزایای مذکور، در این مطالعه برای کنترل ولتاژ DC پنل PV از مبدل افزایشی درهم‌تنیده استفاده شده است. ساختار مبدل DC/DC درهم‌تنیده به همراه پنل PV در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مطالعه برای کلیدزنی مبدل درهم‌تنیده از PS-PWM استفاده شده است. استفاده از این روش مدولاسیون سبب می‌شود که جریان ورودی و خروجی مبدل DC/DC پیوسته شده و ریپل جریان آن به شدت کاهش یابد. از طرفی پیوسته شدن جریان خروجی مبدل DC/DC سبب می‌شود که ریپل ولتاژ DC در خروجی آن کاهش یافته و ظرفیت خازن DC مورد نیاز (CC) نیز کمتر می‌شود که از نظر اقتصادی به صرفه است.

مرحله دوم تبدیل توان در سیستم PV، یک مبدل AC/DC است که وظیفه تزریق توان تولیدی PV به ریزشبه را بر عهده دارد. به طور معمول از یک اینورتر سه فاز شش کلیده دو سطحی برای این هدف استفاده می‌شود. با این وجود در سال‌های اخیر استفاده از اینورترهای چندسطحی برای اتصال سیستم‌های PV به شبکه افزایش یافته است. اینورترهای چندسطحی به دلیل مزایای فراوان نظیر فرکانس کلیدزنی پایین و هارمونیک‌های مخرب کمتر در ولتاژ و جریان خروجی به طور وسیع در کاربردهایی با رنج ولتاژ و توان متوسط و بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۸]. با توجه به مزایای مذکور، در ساختار پیشنهادی از اینورتر سه-سطحی برش نقطه خنثی (NPC) برای اتصال سیستم PV به ریزشبه استفاده شده است. ساختار این مبدل در شکل (۱) نشان داده شده است.





شکل (۱): مبدل DC/DC در هم تنیده (سطح اول سیستم PV)



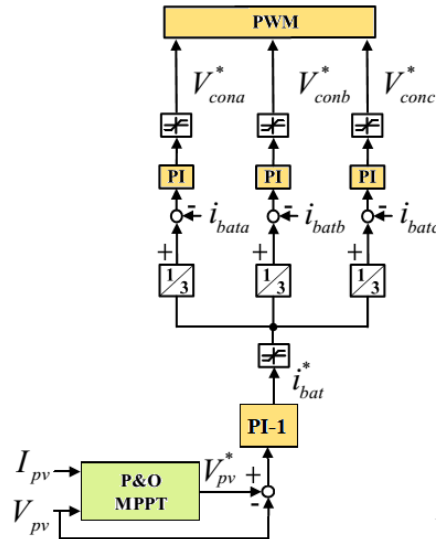
شکل (۲): ساختار مبدل سه سطحی NPC در سیستم PV

### ۳- استراتژی کنترلی پیشنهادی

همانطور که اشاره شد، هدف مبدل DC/DC تنظیم ولتاژ خروجی پنل PV یعنی  $V_{pv}$  با هدف ردیابی MPP است. بر این اساس، ساختار کنترلی این مبدل مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است.

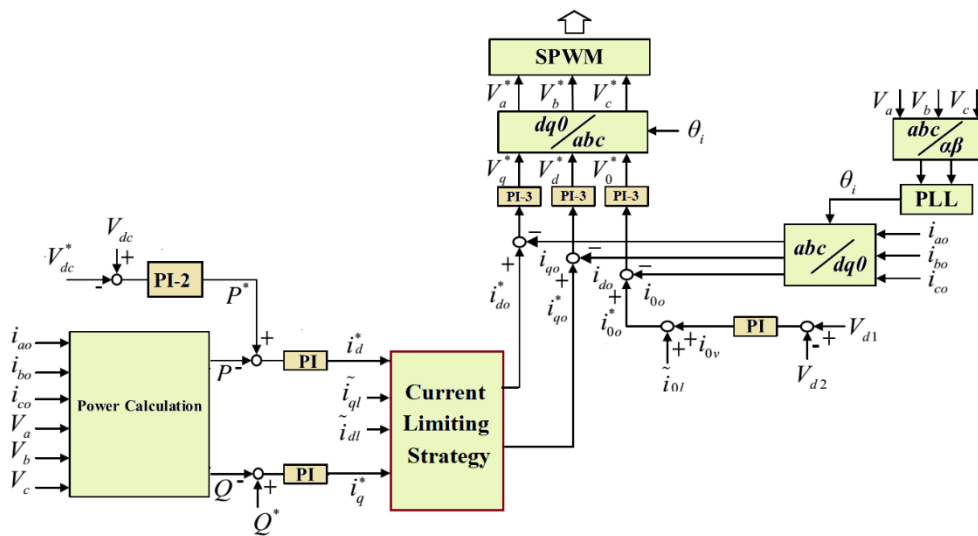
همانطور که مشاهده می‌شود، اولین مرحله از کنترل مبدل DC/DC، محاسبه ولتاژ مرجع در خروجی پنل PV است که با استفاده از الگوریتم MPPT انجام می‌شود. خروجی الگوریتم MPPT با ولتاژ اندازه‌گیری شده PV مقایسه شده و خطای آن به یک کنترل‌کننده PI داده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده PI، جریان مرجع PV یعنی  $i_{bat}^*$  است. جریان مرجع هر یک از اندوکتانس‌های مبدل DC/DC، یک سوم جریان  $i_{bat}^*$  است که با جریان هر اندوکتانس مقایسه شده و خطا به یک کنترل‌کننده PI داده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده PI نهایی، ولتاژ مرجع کلیدزنی هر ساق از مبدل DC/DC است که به واحد مدولاسیون داده می‌شود تا سیگنال کلیدزنی را مشخص کند. برای تولید سیگنال کلیدزنی، از روش مدولاسیون عرض پالس شیف-فاز (PS-PWM) استفاده شده تا جریان ورودی و خروجی مبدل DC/DC پیوسته باشد. در این روش، موج حامل ساق‌ها به میزان ۱۲۰ درجه با هم اختلاف فاز دارند. این روش میزان ریپل جریان تزریقی به لینک DC اینورتر را کاهش داده و در نتیجه مقدار خازن مورد نیاز برای متعادل سازی ولتاژ نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این مطالعه برای دریابی نقطه حداکثر توان PV، از الگوریتم اغتشاش و مشاهده (P&O<sup>7</sup>) استفاده شده که با وجود داشتن ساختار ساده، عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد [۳۹].

دومین بخش سیستم PV، یک مبدل AC/DC است که از نوع مبدل سه سطحی NPC در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد، وظیفه اصلی این مبدل تزریق توان DC به ریزشبه AC است. با این وجود این مبدل می‌تواند خدمات جانبی دیگری نیز برای ریزشبه فراهم سازد که مهمترین آن، تامین توان راکتیو و جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک بارهای غیرخطی ریزشبه است. استفاده از مبدل AC/DC سیستم PV برای هدف مذکور باعث کاهش مولفه‌های هارمونیک و همچنین کاهش مقدار THD جریان و ولتاژ ریزشبه می‌شود که در نهایت بهبود کیفیت توان ریزشبه را به دنبال دارد. بنابراین در این مطالعه ضمن در نظر گرفتن وظیفه اصلی مبدل AC/DC، جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک با هدف بهبود کیفیت توان ریزشبه در استراتژی کنترلی در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده مبدل DC/DC در سیستم PV

ساختار کلی کنترل کننده مبدل AC/DC سیستم PV در شکل (۳) نشان داده شده که مطابق آن اولین مرحله شامل محاسبه توان اکتیو و راکتیو تزریقی اینورتر به ریزشبهه بر اساس جریان و ولتاژ خروجی آن است. پس از محاسبه توان تزریقی اینورتر به ریزشبهه، این توان با مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو مقایسه می‌شود. توان اکتیو مرجع اینورتر با هدف تنظیم ولتاژ DC ورودی مبدل AC/DC و با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی محاسبه می‌شود. به طور معمول توان راکتیو مرجع سیستم PV برابر صفر قرار داده می‌شود ولی همانطور که اشاره شد، سیستم PV با هدف مشارکت در خدمات جانبی، می‌تواند توان راکتیو به ریزشبهه تزریق کرده یا جذب کند. خطای مقایسه توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده با مقادیر مرجع آنها به کنترل کننده PI داده می‌شود تا بر اساس آن جریان مرجع در محور d و q ( $i_d^*$ ,  $i_q^*$ ) محاسبه شود. جریان‌های مرجع به همراه مولفه‌های هارمونیکی تخمین زده شده ( $\tilde{i}_{dl}$ ,  $\tilde{i}_{ql}$ ) به بلوک استراتژی محدودسازی جریان داده می‌شود تا مقدار نهایی جریان مرجع در محور d و q با در نظر گرفتن محدودیت جریان اینورتر مشخص شود. جریان مرجع نهایی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده و با استفاده از کنترل کننده PI، ولتاژ مرجع کلیدزنی مبدل NPC به دست می‌آید.



شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل کننده مبدل NPC

هدف بلوک محدودسازی جریان، جلوگیری از اضافه جریان شدن اینورتر است که به منظور جلوگیری از افزایش استهلاک و آسیب دیدن آن ضروری است. در این بلوک، ظرفیت در دسترس اینورتر به ترتیب برای تزریق توان اکتیو به ریزشبهه، تامین توان راکتیو و جبران سازی مولفه‌های هارمونیک استفاده می‌شود. به این منظور، ابتدا ظرفیت آزاد اینورتر با در نظر گرفتن ظرفیت مورد نیاز برای تزریق توان اکتیو تولیدی PV به ریزشبهه، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{m,res1} = \sqrt{I_{max}^2 - (i_q^*)^2} \quad (1)$$

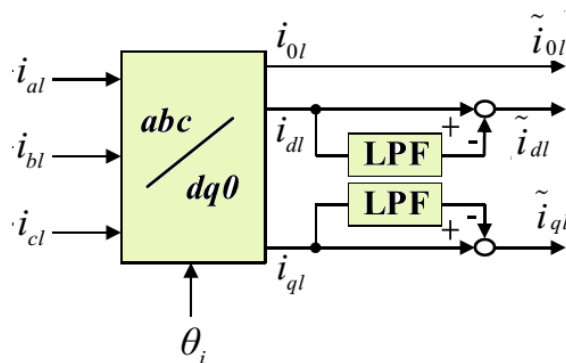
که در آن  $I_{max}$  حداکثر جریان نامی اینورتر بوده و  $I_{m,res1}$  ظرفیت جریانی باقی مانده اینورتر پس از انجام وظیفه اصلی آن، یعنی تزریق توان تولیدی PV به ریزشبهه است. در مرحله بعدی، ظرفیت جریانی لازم برای تامین توان راکتیو مرجع، از  $I_{m,res1}$  کم شده، و ظرفیت باقی مانده جدید مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} \text{if } i_q^* \geq I_{m,res1} \Rightarrow I_{res2} = 0, i_q^* = \text{sign}(i_q^*) \cdot I_{m,res1} \\ \text{if } i_q^* < I_{m,res1} \Rightarrow I_{m,res2} = \sqrt{I_{m,res1}^2 - (i_q^*)^2} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $I_{m,res2}$  ظرفیت جریانی آزاد اینورتر پس از تزریق توان اکتیو و راکتیو مرجع است. مطابق رابطه (۲)، اگر  $i_q^* \geq I_{m,res1}$  باشد، به معنی این است که اینورتر ظرفیت کافی برای تامین کل توان راکتیو مورد نیاز را نداشته و بنابراین مقدار  $i_q^*$  بر اساس ظرفیت جریانی در دسترس اینورتر اصلاح می‌شود. ولی در شرایطی که  $i_q^* < I_{m,res1}$  باشد، اینورتر پس از تامین کل توان راکتیو مورد نیاز، به میزان  $I_{m,res2}$  ظرفیت جریانی آزاد دارد که می‌تواند برای جبران سازی مولفه‌های هارمونیک استفاده شود. مولفه‌های هارمونیک جریانی ریزشبهه  $(\tilde{I}_{dl}, \tilde{I}_{ql})$  مطابق شکل (۴) با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر<sup>۱</sup> و بر اساس جریان بارهای غیرخطی تخمین زده می‌شوند. با توجه به اینکه ممکن است اینورتر ظرفیت لازم برای تامین کل مولفه‌های هارمونیک را نداشته باشد، مقدار نهایی مولفه‌های هارمونیک  $(\tilde{I}_{dl}, \tilde{I}_{ql})$  مطابق رابطه‌های (۳) و (۴)، اصلاح می‌شود تا از اضافه جریان شدن اینورتر جلوگیری شود.

$$\tilde{I}_{dl} = \tilde{i}_{dl} \cdot \min \left( 1, \frac{I_{m,res2}}{\sqrt{(\tilde{i}_{dl})^2 + (\tilde{i}_{ql})^2}} \right) \quad (3)$$

$$\tilde{I}_{ql} = \tilde{i}_{ql} \cdot \min \left( 1, \frac{I_{m,res2}}{\sqrt{(\tilde{i}_{dl})^2 + (\tilde{i}_{ql})^2}} \right) \quad (4)$$



شکل (۵): روش تخمین مولفه‌های هارمونیک جریانی بار

مطابق رابطه‌های (۳) و (۴)، مولفه‌های هارمونیک تخمین زده شده، بر اساس نسبت ظرفیت باقی مانده اینورتر، کاهش داده می‌شوند. در نهایت جریان‌های مرجع نهایی اینورتر مطابق رابطه‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$i_{do}^* = i_d^* + \tilde{I}_{dl} \quad (5)$$

$$i_{qo}^* = i_q^* + \tilde{I}_{ql} \quad (6)$$



استراتژی محدودسازی جریان مبتنی بر رابطه (۱) الی (۶) تضمین می‌کند که اینورتر همواره در رنج مجاز جریان و بدون اضافه جریان شدن بهره‌برداری می‌شود. مطابق شکل (۴)، در استراتژی کنترلی جریان مرجع محور صفر با هدف متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌های ورودی مبدل NPC یعنی  $V_{d1}$  و  $V_{d2}$ ، با استفاده از یک کنترل کننده PI محاسبه می‌شود.

#### ۴- کنترل کننده تطبیقی

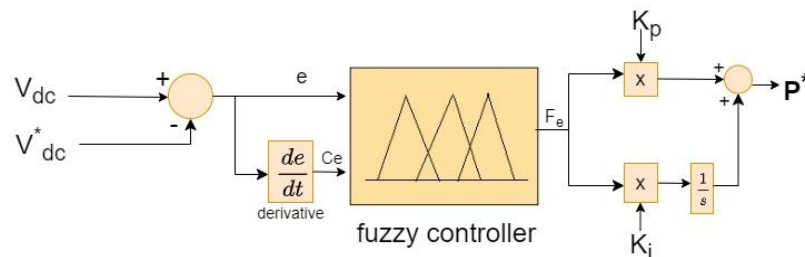
مطابق شکل (۴)، حلقه‌های کنترل توان و جریان اینورتر مبتنی بر کنترل کننده PI است. تمام این کنترل کننده‌ها تاثیر مهمی بر روی عملکرد سیستم PV دارند. با این وجود برخی از آنها نقش مهمتری ایفا می‌کنند. توان تزریقی اینورتر به ریزشبه توسط کنترل کننده PI-2 کنترل می‌شود. بنابراین برای تنظیم سریع ولتاژ لینک DC ورودی اینورتر و همچنین تزریق یک توان بدون ریپل، عملکرد کنترل کننده PI-2 باید دقیق و سریع باشد.

کنترل کننده PI کنترل کننده‌ای است که براساس شرایط مشخصی از سیستم ضرایب آن تعیین می‌گردد از این رو در تمام شرایط کاری سیستم عملکرد بهینه ندارد [۴۰].

یک روش بهینه‌سازی کنترل کننده PI، استفاده از یک کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی (PI-Fuzzy) است که با تطبیق پذیر کردن ضرایب کنترل کننده PI باعث بهبود دقت و سرعت کنترل کننده PI در شرایط کاری مختلف سیستم می‌شود. این کنترل کننده به عنوان جایگزین کنترل کننده PI-2 طراحی شده ولی برای سایر کنترل کننده‌های PI نیز قابل تعمیم و استفاده است. برای محاسبه توان اکتیو تزریقی اینورتر به شبکه، کنترل کننده PI-Fuzzy بر اساس اختلاف مقدار مرجع ولتاژ DC و مقدار اندازه‌گیری شده آن، مقدار توان اکتیو مرجع اینورتر را محاسبه می‌کند. سیستم فازی این امکان را فراهم می‌سازد که ناعادلی انرژی لینک DC اینورتر با سرعت بالاتر و با کمترین نوسان توان محاسبه شود.

ورودی سیستم فازی شامل اختلاف ولتاژ مرجع ( $V_{dc}^*$ ) و مقدار اندازه‌گیری شده ولتاژ لینک DC اینورتر و مقدار تغییرات آن  $\frac{dV_{dc}^*}{dt}$  است. خروجی کنترل کننده PI-Fuzzy نیز توان اکتیو مرجع است که برای بازه زمانی  $t$  به صورت  $P^*(t)$  مشخص می‌شود. بر این اساس، کنترل کننده PI-Fuzzy مطابق شکل (۵) طراحی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وظیفه کنترل کننده PI-Fuzzy اصلاح خطای تنظیم ولتاژ است، به نحوی که مقدار  $V_{dc}$  با نوسان کمتر و سرعت بالاتری به مقدار  $V_{dc}^*$  برسد.

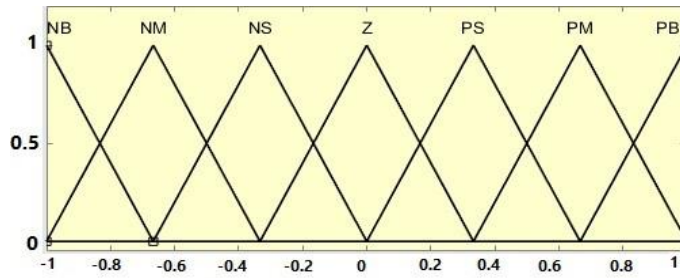
تابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده و قوانین سیستم فازی نیز در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که اشاره شد، کنترل کننده فازی طراحی شده برای سایر کنترل کننده‌های PI نیز قابل تعمیم و استفاده است.



شکل (۶): نمودار بلوکی کنترل کننده PI-Fuzzy

جدول (۲): قوانین سیستم استنتاج فازی

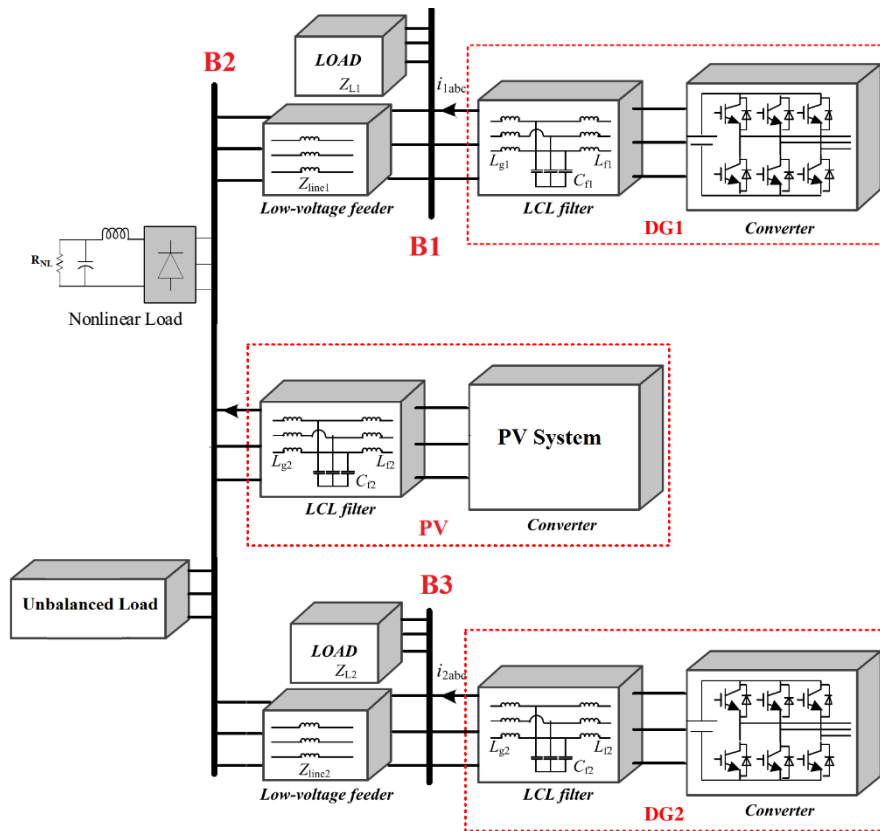
$F_e$	$C_e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB



شکل (۷): تابع عضویت های سیستم فازی

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این مطالعه یک ریزشبه جزیره‌ای در نظر گرفته شده که شامل منابع تولید پراکنده توزیع‌پذیر (قابل کنترل) و یک منبع PV به همراه بارهای خطی و غیرخطی است. منابع توزیع‌پذیر به منابعی گفته می‌شود که توان خروجی آنها قابل کنترل است. از جمله این منابع می‌توان به پیل سوختی (FC<sup>9</sup>) اشاره کرد. کنترل این منابع در ریزشبه‌های جزیره‌ای معمولاً مبتنی بر کنترل افقی<sup>۱۰</sup> است. در این مطالعه برای کنترل منابع توزیع‌پذیر از روش کنترل افقی استفاده شده است [۴۱]. ساختار ریزشبه مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. منابع DG1 و DG2 منابع تولید پراکنده مبتنی بر مبدل قدرت از نوع منابع قابل کنترل بوده و مبتنی بر کنترل افقی هستند. ریزشبه دارای یک منبع PV، بارهای متعادل خطی (بارهای ZL2 و ZL1)، یک بار غیرخطی و یک بار نامتعادل است. ظرفیت منابع DG1 و DG2 یکسان و برابر ۱۲ کیلوولت-آمپر در نظر گرفته شده است. ضرایب افقی برای این منابع نیز یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل (۸): ساختار ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه



پارامترهای مهم ریزشبهه در جدول (۲) ارائه شده است. ظرفیت اینورتر NPC سیستم PV به میزان تقریباً ۲۰ درصد بیشتر از توان نامی PV و برابر ۵ کیلوولت-آمپر در نظر گرفته شده تا در زمان تولید حداکثر توان PV نیز قادر به تامین خدمات جانبی نظیر تامین توان راکتیو و جبران سازی مولفه‌های هارمونیکی باشد. برای ارزیابی عملکرد ساختار و استراتژی کنترلی پیشنهادی، حالت‌های زیر شبیه‌سازی شده است.

**حالت اول-** در این حالت ریزشبهه در شرایط نرمال تنها با در نظر گرفتن بارهای خطی و متعادل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و تنها برای جبران سازی توان راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**حالت دوم-** ریزشبهه با در نظر گرفتن یک بار غیرخطی با مقاومت ۱۰ اهم شبیه‌سازی می‌شود و اینورتر سیستم PV برای جبران سازی مولفه‌های هارمونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هدف حالت اول ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی و هدف حالت دوم نیز ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط جبران سازی هارمونیکی است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای هر یک از سناریوهای مذکور به صورت جداگانه ارائه و همچنین تجزیه و تحلیل شده است.

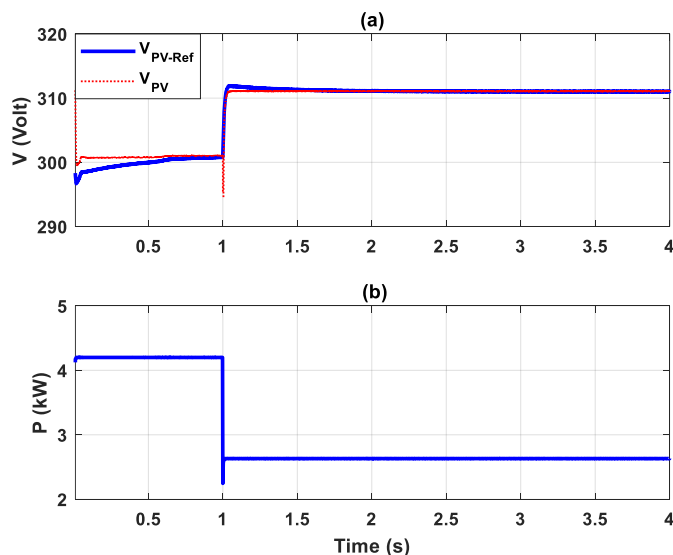
جدول (۳): پارامترهای مهم ریزشبهه مورد مطالعه

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۷۰۰ V	ولتاژ مرجع لینک DC ( $V_{dc}^*$ )	۲۸۰ V	ولتاژ نامی شبکه قدرت ( $V_{L-L}$ )
۱۵ A	جریان نامی اینورتر سیستم PV	۵۰ Hz	فرکانس شبکه (f)
۱۲ kVA	توان نامی منابع DG1 و DG2	۲۰ kHz	فرکانس کلیدزنی مبدل AC/DC
۴/۲ kW	توان نامی PV	۵ kVA	ظرفیت اینورتر سیستم PV

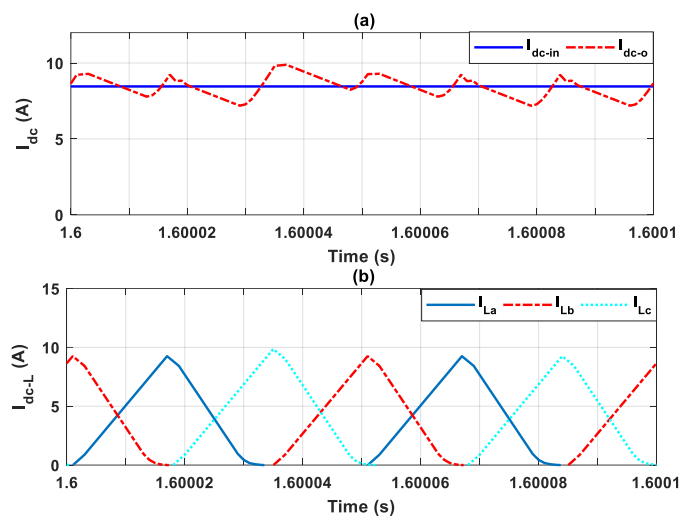
### ۱-۵- حالت اول مطالعه

در این حالت ریزشبهه در دو شرایط مختلف بهره‌برداری می‌شود. در ابتدا (الف) برای کنترل توان PV از کنترل‌کننده PI و (ب) سپس از کنترل‌کننده PI-Fuzzy استفاده می‌شود تا عملکرد این دو روش مقایسه شود. در حالت اول مطالعه فرض می‌شود که توان مصرفی بار  $ZL1$  در زمان ۲ ثانیه به میزان  $3/8$  کیلووات افزایش می‌یابد. شدت تابش خورشید در ابتدا ۱۰۰۰ وات بر مترمربع بوده و در لحظه یک ثانیه به ۶۰۰ وات بر مترمربع کاهش می‌یابد. برای مقادیر شدت تابش، حداکثر توان PV به ترتیب ۴۲۰۰ و ۲۶۳۰ وات است. توان راکتیو مرجع اینورتر NPC از ابتدا تا لحظه ۳ ثانیه برابر صفر و بعد از آن برابر  $1/5$  کیلووات تنظیم شده است. بر اساس نتایج حالت اول، در شکل (۸) ولتاژ مرجع و ولتاژ اندازه‌گیری شده پنل PV در بخش (a) و توان تولیدی PV در بخش (b) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ولتاژ PV به صورت آرام به مقدار مرجع ولتاژ پنل که توسط MPPT تعیین شده، همگرا می‌شود. با وجود اینکه در زمان ۲ ثانیه یک بار بزرگ به ریزشبهه اضافه شده و در لحظه ۳ ثانیه توان راکتیو اینورتر تغییر شدیدی داشته، این موضوع تاثیری بر عملکرد سیستم PV نداشته است. بر اساس این نتایج مشخص است که ساختار و سیستم کنترلی پیشنهادی به صورت مطلوب قادر به ردیابی نقطه حداکثر توان PV است. در شکل (۹) جریان کلی ورودی و خروجی مبدل DC/DC در هم‌تنیده و همچنین جریان هر ساق آن نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که جریان به صورت متعادل توسط هر سه ساق و با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه تامین می‌شود. در نتیجه این کار، جریان ورودی مبدل صاف و بدون ریبیل شده است. جریان خروجی اینورتر با کمی ریبیل همراه است ولی مقدار این ریبیل محدود است. در شکل (۱۰) مقدار توان اکتیو تولیدی هر یک از منابع ریزشبهه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توان تولیدی DG1 و DG2 در شرایط ماندگار همواره برابر است. با توجه به این که ظرفیت و ضرایب افتی این دو منبع برابر در نظر گرفته شده، انتظار می‌رفت که توان تولیدی آنها نیز در شرایط ماندگار برابر باشد. بنابراین مشخص است که کنترل منابع DG1 و DG2 مطابق قانون کنترل افتی محقق شده و بعد از افت شدت تابش یا اضافه شدن بار، کمبود توان ریزشبهه توسط دو DG مذکور و بر اساس قانون کنترلی افتی جبران می‌شود. در شکل (۱۱) توان راکتیو تولیدی منابع نشان داده شده که همان‌طور که اشاره شد، توان راکتیو PV در ابتدا برابر صفر قرار داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که توان راکتیو تولیدی سیستم PV از ابتدا تا لحظه ۳ ثانیه برابر صفر است. در لحظه ۳ ثانیه مقدار توان راکتیو تزریقی اینورتر PV افزایش یافته و به مقدار  $1/5$  کیلووات می‌رسد و بنابراین توان راکتیو تولیدی منابع DG1 و DG2 کاهش می‌یابد.

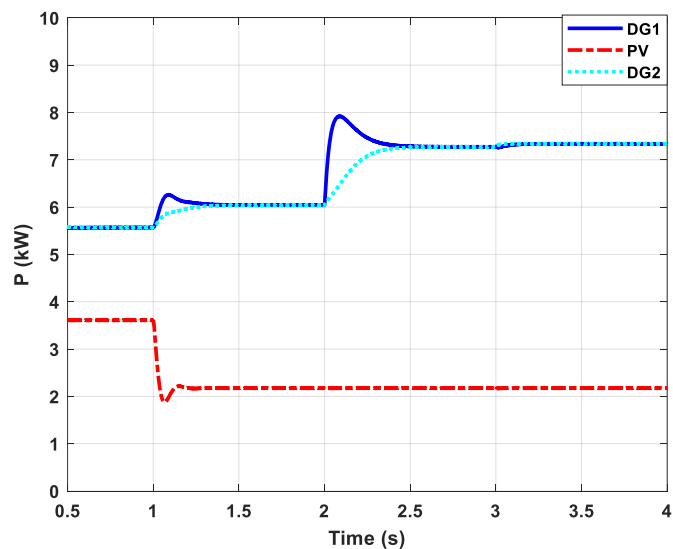




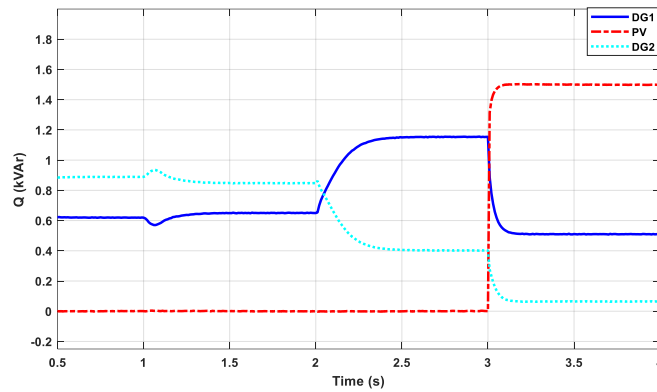
شکل (۹): ولتاژ و توان تولیدی PV در حالت اول



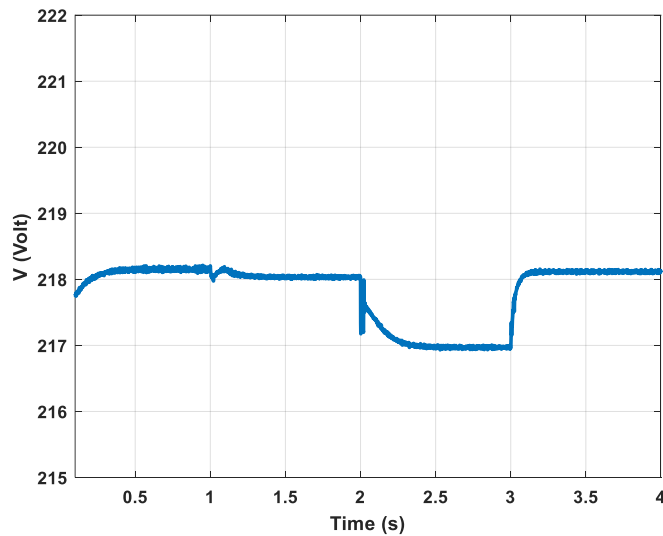
شکل (۱۰): جریان ورودی و خروجی مبدل DC/DC در هم تنبیده



شکل (۱۱): توان اکتیو خروجی منابع ریزشبهه در حالت اول



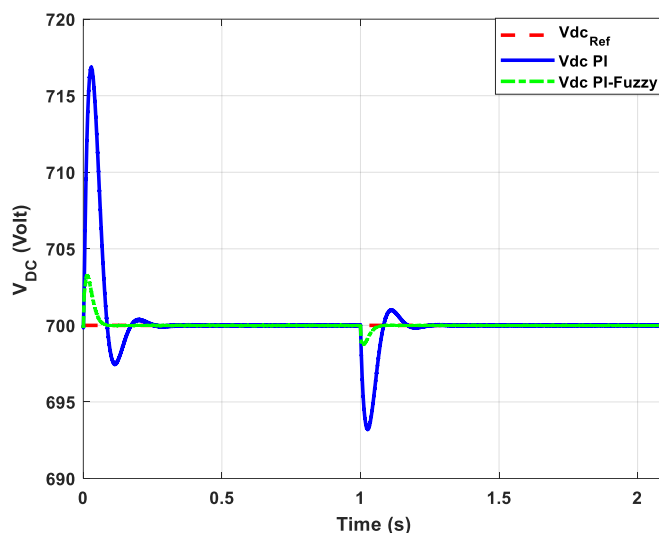
شکل (۱۲): توان راکتیو تزریقی منابع در حالت اول



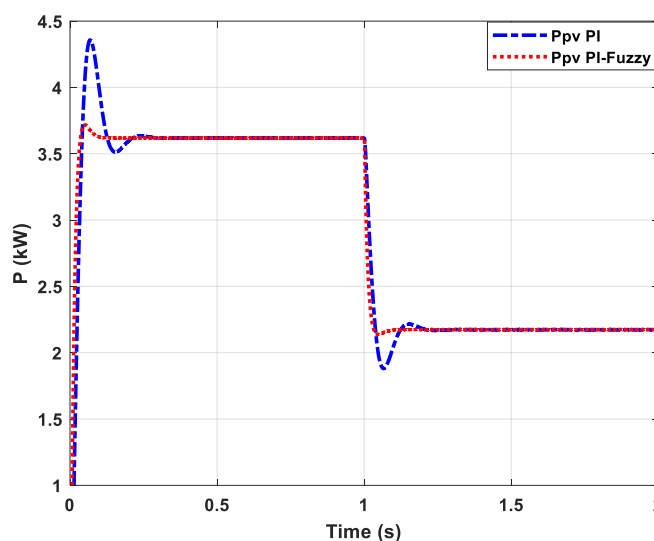
شکل (۱۳): دامنه ولتاژ ریزشبهه در شین ۳ برای حالت اول

شکل (۱۲) دامنه ولتاژ ریزشبهه در شین ۳ را نشان می‌دهد. افزایش بار در لحظه ۲ ثانیه باعث افت نسبی ولتاژ می‌شود. با این وجود در زمان ۳ ثانیه، تزریق توان راکتیو توسط اینورتر PV سبب افزایش نسبی ولتاژ ریزشبهه شده و تاثیر افزایش بار بر روی دامنه ولتاژ را جبران‌سازی کرده است. بنابراین مشخص است که سیستم PV از طریق مشارکت در تامین توان راکتیو مورد نیاز، امکان بهبود تنظیم ولتاژ ریزشبهه را فراهم می‌سازد. در شرایط (ب) به جای کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی PI-2 که یک کنترل‌کننده معمولی است، از کنترل‌کننده پیشنهادی یعنی کنترل‌کننده تطبیقی PI-Fuzzy استفاده شده است. در شکل (۱۳) ولتاژ لینک DC اینورتر سه سطحی NPC بر اساس نتایج شبیه‌سازی بدست آمده برای شرایط (الف) و (ب) مقایسه شده است. بر اساس این مقایسه به وضوح مشاهده می‌شود که استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی PI-Fuzzy موجب بهبود قابل توجه در دقت تنظیم ولتاژ لینک DC شده است، به صورتی که پس از هر نوع تغییر در سیستم، انحراف ولتاژ DC از مقدار مرجع نسبت به شرایط (الف) کاهش یافته و ولتاژ با سرعت بیشتری به مقدار مرجع برگشت داده شده است. در شکل (۱۴) توان تزریقی سیستم PV به ریزشبهه برای شرایط (الف) و (ب) مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی باعث بهبود سرعت کنترل توان می‌شود به صورتی که پس از هر بار تغییر در شدت تابش خورشید، توان خروجی PV با سرعت بالاتری به مقدار ماندگار رسیده و پس از رسیدن به مقدار ماندگار، نوسان نداشته است. بنابراین به طور کلی مشاهده می‌شود که استفاده از PI-Fuzzy باعث کاهش قابل توجه فراجشش<sup>۱۱</sup> و زمان نشست<sup>۱۲</sup> کنترل توان اکتیو مبدل NPC می‌شود. در شکل (۱۵) فرکانس ریزشبهه برای شرایط (الف) و (ب) مقایسه شده است. مطابق نتیجه فوق مشخص است که استفاده از PI-Fuzzy باعث بهبود نسبی در تنظیم فرکانس ریزشبهه شده و فرکانس با سرعت بیشتری (یا در زمان کمتری) به مقدار ماندگار رسیده است که ناشی از حذف نوسان توان اکتیو سیستم PV است.

بر اساس نتایج به دست آمده برای حالت اول مشخص است که ساختار و استراتژی کنترلی پیشنهادی برای سیستم PV قادر به ردیابی نقطه حداکثر توان PV بوده و به صورت هماهنگ با منابع دیگر، توان تولیدی PV را به ریزشبه تزیق می کند. بهره برداری از ریزشبه نیز با فرکانس و دامنه ولتاژ مطلوب انجام می گیرد. همچنین نتایج نشان می دهد که عملکرد کنترل کننده تطبیقی PI-Fuzzy پیشنهادی به مراتب بهتر از عملکرد کنترل کننده PI معمولی بوده و از نظر کاهش فراجش و زمان نشست، عملکرد سیستم PV را بهبود می بخشد.



شکل (۱۴): تاثیر کنترل کننده تطبیقی بر روی ولتاژ DC مبدل NPC



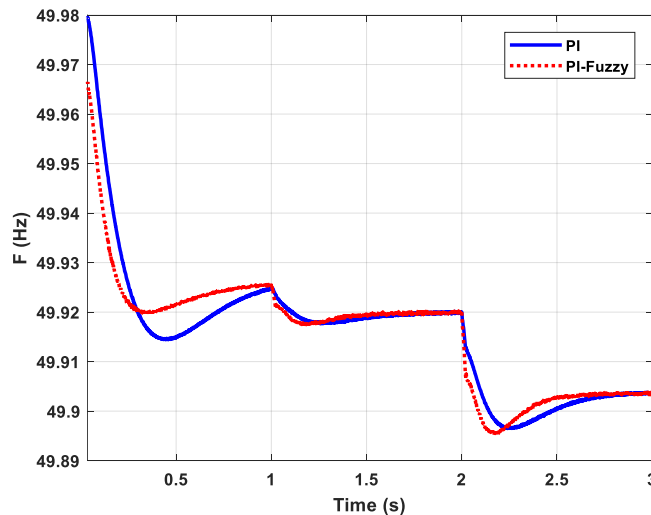
شکل (۱۵): تاثیر کنترل کننده تطبیقی بر روی توان تزریقی سیستم PV به ریزشبه

## ۲-۵- حالت دوم مطالعه

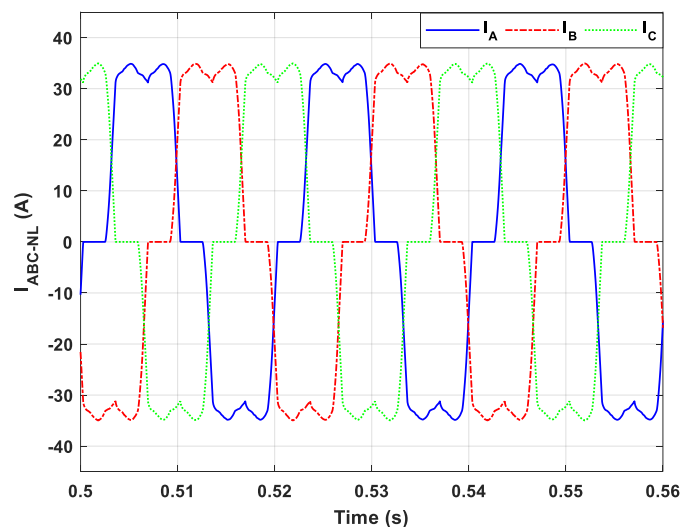
در حالت دوم تغییرات بار و شدت تابش مانند حالت اول است ولی یک بار غیرخطی به شین ۲ اضافه شده است. بار غیرخطی یک بار مقاومتی با یکسوساز سه فاز دیودی است که مقدار مقاومت آن ۱۰ اهم در نظر گرفته شده و برای این بار، جریان فازها در شکل (۱۶) نشان داده شده است. بنابراین جریان بار غیر خطی به شدت هارمونیک بوده و می تواند باعث افت کیفیت توان ریزشبه شود. در این حالت نیز دو شرایط مختلف شبیه سازی شده که عبارتند از: (الف) عدم مشارکت سیستم PV در جبران سازی مولفه های هارمونیک و (ب) مشارکت سیستم PV در جبران سازی مولفه های هارمونیک. برای شرایط الف، طیف هارمونیک و مقدار THD برای ولتاژ فاز شین ۳ در شکل (۱۷) و برای جریان عبوری از فیذر یک در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بدون مشارکت



سیستم PV در جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک، مقدار THD ولتاژ ریزشبه برابر ۹/۴۵ درصد و مقدار THD جریان ریزشبه برابر با ۶/۴۵ درصد شده است. بر اساس استاندارد IEEE 519 برای شبکه‌های ولتاژ پایین، حداکثر مقدار مجاز برای THD ولتاژ برابر با ۸ درصد و همچنین حداکثر مقدار مجاز برای THD جریان برابر ۵ درصد است [۴۲]. بنابراین مقدار THD ولتاژ و جریان ریزشبه بیش از حد مجاز تعریف شده در استاندارد بوده و نیاز به جبران‌سازی دارد. برای شرایط (ب)، طیف هارمونیک و THD ولتاژ و جریان ریزشبه به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، پس از مشارکت PV در بهبود کیفیت توان ریزشبه، مقدار THD ولتاژ ۲/۸۲ درصد و مقدار THD جریان نیز ۴/۲ درصد شده است. نتایج به‌دست آمده برای THD ولتاژ و جریان ریزشبه در جدول (۳) برای شرایط مختلف بهره‌برداری ریزشبه در سه بازه زمانی مختلف ارائه شده است. بدون مشارکت سیستم PV در جبران‌سازی هارمونیک، مقدار THD ولتاژ در تمام شرایط کاری بیش از ۸ درصد و مقدار THD جریان ریزشبه بین ۵/۷ الی ۶/۴۵ درصد شده است. این مقادیر بیشتر از مقادیر تعریف شده در استاندارد IEEE 519 هستند. مشارکت سیستم PV در بهبود کیفیت توان، مقدار THD ولتاژ را در حدود ۶۶ الی ۷۱ درصد بهبود می‌بخشد که بسیار جالب توجه است. همچنین مشاهده می‌شود که جبران‌سازی هارمونیک توسط سیستم PV، مقدار THD جریان ریزشبه را نیز در حدود ۳۴ الی ۳۶ درصد بهبود داده است. نتایج به‌دست آمده برای حالت دوم نشان می‌دهند که با وجود اضافه شدن یک بار غیرخطی بزرگ به ریزشبه، سیستم PV قادر است معیارهای کیفیت توان از نظر مقدار THD را برای ریزشبه محقق سازد. این موضوع نیاز ریزشبه به تجهیزات جبران‌سازی اضافی نظیر فیلتر قدرت فعال را برطرف ساخته و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه‌تر است.

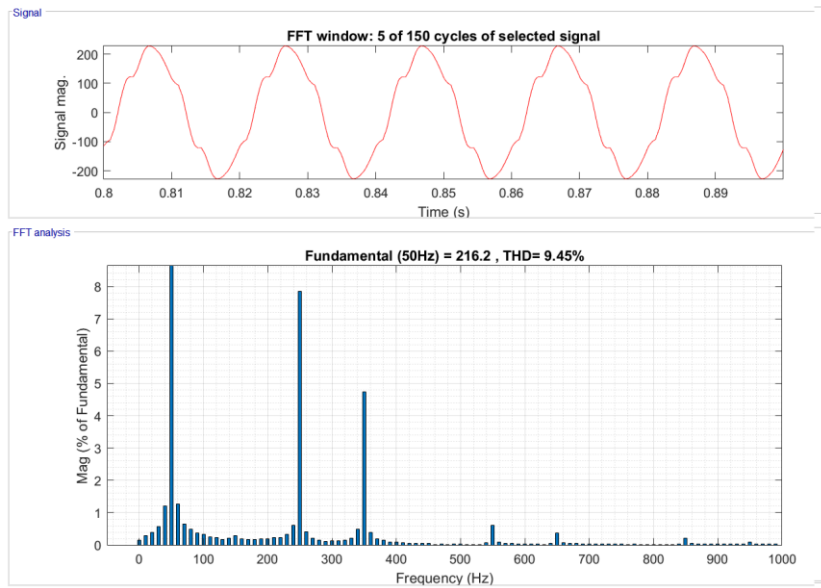


شکل (۱۶): تاثیر کنترل‌کننده تطبیقی بر روی فرکانس ریزشبه در حالت اول

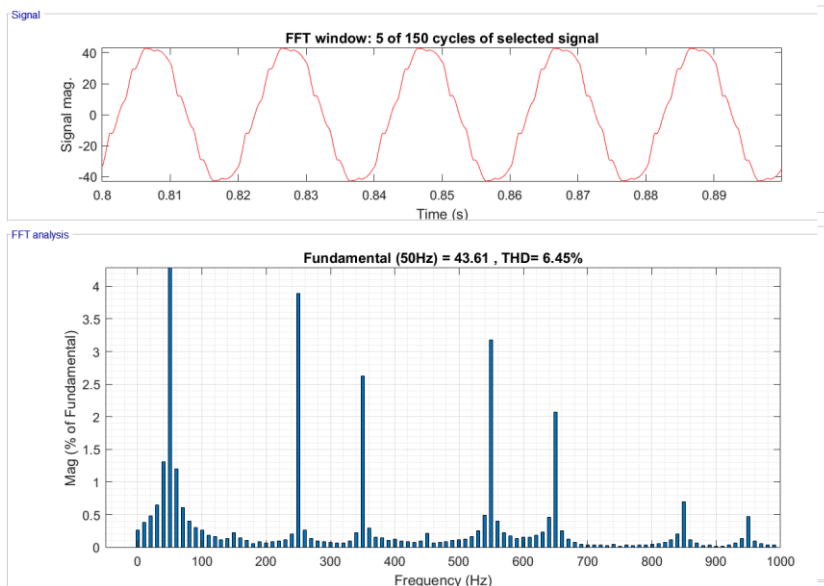


شکل (۱۷): جریان بار غیرخطی در حالت دوم





شکل (۱۸): مقدار THD ولتاژ فاز به زمین ریزشبهه در شین ۳ بدون مشارکت سیستم PV در جبران سازی هارمونیکی

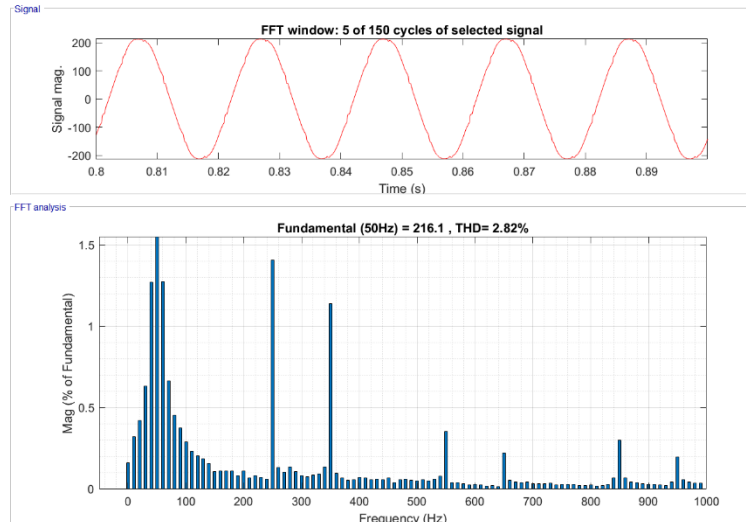


شکل (۱۹): مقدار THD جریان فیدر ۱ ریزشبهه بدون مشارکت سیستم PV در جبران سازی هارمونیکی

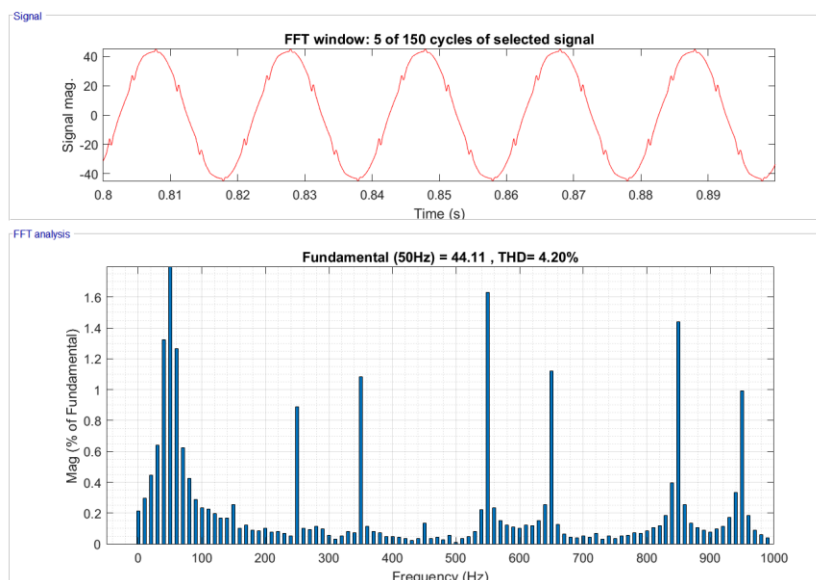
جدول (۴): نتایج THD ولتاژ و جریان ریزشبهه در شرایط مختلف بهره برداری

حالت		t=[0,1]	t=[1,2]	t=[2,3]
THD ولتاژ	مود ۱	۹/۴۵	۹/۴۶	۸/۴
	مود ۲	۲/۸۲	۲/۷	۲/۸۳
	درصد بهبود	۷۰/۱	۷۱/۴۶	۶۶/۳
THD جریان	مود ۱	۶/۴۵	۶/۲۲	۵/۷
	مود ۲	۴/۲	۳/۹۳	۳/۶۸
	درصد بهبود	۳۴/۸۸	۳۶/۸۸	۳۵/۴۴





شکل (۲۰): مقدار THD ولتاژ ریزشبه در شین ۳ با مشارکت سیستم PV در جبران سازی هارمونیک



شکل (۲۱): مقدار THD جریان فیدر یک ریزشبه با مشارکت سیستم PV در جبران سازی هارمونیک

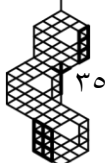
## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک ساختار دو مرحله ای برای سیستم های PV در ریزشبه های جزیره ای معرفی شد که مرحله اول مبتنی بر مبدل DC/DC افزایش دهنده در هم تنیده، و مرحله دوم شامل یک اینورتر سه سطحی NPC بود. همچنین یک استراتژی کنترلی معرفی شد که با استفاده از آن، سیستم PV ضمن ردیابی نقطه حداکثر توان PV، قادر به جبران سازی مولفه های هارمونیک ولتاژ و جریان ریزشبه با در نظر گرفتن محدودیت جریان نامی اینورتر است. در ادامه یک روش کنترلی تطبیقی پیشنهاد شد که مبتنی بر کنترل کننده PI و منطق فازی است و امکان کنترل بهینه سیستم PV در تمام شرایط کاری را فراهم می سازد. ساختار و استراتژی کنترلی پیشنهادی با شبیه سازی یک ریزشبه جزیره ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که استفاده از کنترل کننده تطبیقی PI-Fuzzy موجب بهبود قابل توجه در کنترل ولتاژ لینک DC شده و همچنین دقت و سرعت کنترل توان تزریقی PV به ریزشبه را از نظر فراجش و زمان نشست بهبود می دهد. بر اساس نتایج شبیه سازی مشخص شد که در حضور یک بار غیرخطی بزرگ، سطح THD جریان و ولتاژ ریزشبه خارج از حد مجاز تعریف شده در استانداردهای تدوین شده است. مشارکت PV در جبران سازی مولفه های هارمونیک باعث شد که سطح THD ولتاژ در حدود ۷۰ درصد و سطح THD جریان در حدود ۳۵ درصد بهبود یافته و استانداردهای

کیفیت توان محقق شود. بنابراین استفاده از سیستم PV برای بهبود کیفیت توان ریزشبهکه جزیره‌ای نیاز به جبران‌سازهای اضافی را برطرف ساخته و صرفه اقتصادی به همراه دارد. لازم به ذکر است که استفاده از سیستم PV برای جبران‌سازی هارمونیک باعث افزایش استهلاک مبدل سیستم PV می‌شود و لازم است یک تحلیل اقتصادی جامع در این زمینه انجام شود. این موضوع می‌تواند در مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

## مراجع

- [1] P. Roy, J. He, T. Zhao and Y.V. Singh, "Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 81-104, Jan. 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [2] A.A. Zamani, S.M. Kargar and A. Reisi, "Load frequency control in a hybrid power system considering renewable energy sources and electric vehicles using fractional order PID controller based on wavelet neural network", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 58, pp. 45-66, Sept. 2024, dor: 20.1001.1.23223871.1403.15.58.4.5.
- [3] A.K. Behura, A. Kumar, D.K. Rajak, C.I. Pruncu and L. Lamberti, "Towards better performances for a novel rooftop solar PV system", *Solar Energy*, vol. 216, pp. 518-529, March 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.01.045
- [4] S. Semeskandeh, M. Hojjat, M. Hosseini-Abardeh, "Improving the efficiency of floating photovoltaic system in the northern part of Iran using a two-stage multi-string inverter", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 57, pp. 85-98, June 2024, dor: 20.1001.1.23223871.1403.15.57.6.5.
- [5] D. Kolantla, S. Mikkili, S.R. Pendem and A.A. Desai, "Critical review on various inverter topologies for PV system architectures", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 17, pp. 3418-3438, Dec. 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0317.
- [6] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M. Mirtalaei, M. Jabbari, "Non-isolated boost converter with new active snubber structure and energy recovery capability", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 32, no. 5, Article Number: 2350084, March 2023, doi: 10.1142/S0218126623500846.
- [7] T. Mistry, J. Gupta and B. Singh, "A transformerless power conversion unit for grid connected solar PV system", *Proceeding of the IEEE/PIICON*, New Delhi, India, pp. 1-6, Nov. 2022, doi: 10.1109/PIICON56320.2022.10045105.
- [8] M. Abbasi, M. Nafar and M. Simab, "Management and control of microgrids connected to three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using fuzzy intelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 49, pp. 55-66, June 2022, dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.49.4.3.
- [9] D. Taheri, G. Shahgholian and M.M. Mirtalaei, "Analysis, design and implementation of a high step-up multi-port non-isolated converter with coupled inductor and soft switching for photovoltaic applications", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 16, no. 17, pp. 3473-3497, Sept. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12537.
- [10] M. Rahimi, B. Fani, M. Moazzami, M. Dehghani and G. Shahgholian, "An online free penetration multi-stage fuse saving protection scheme in distribution systems with photovoltaic sources", *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, vol. 9, no. 2, pp. 24-35, 2020, doi: 10.29252/iejqp.9.2.24.
- [11] K. Guo, L. Cui, M. Mao, L. Zhou and Q. Zhang, "An improved gray wolf optimizer MPPT algorithm for PV system with BFBIC converter under partial shading", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 103476-103490, June 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999311.
- [12] M. Zand, M.A. Nasab, H.R. Hanif, M.R. Ghahri, S. Padmanaban and Baseem Khan, "A hybrid scheme for optimal performance of photovoltaic system converters with multilayer structure", *The Journal of Engineering*, vol. 2023, no. 1, Article Number: e12218, Jan. 2023, doi: 10.1049/tje2.12218.
- [13] P. García-Triviño, R. Sarrias-Mena, C.A. García-Vázquez, S. Leva and L.M. Fern "Optimal online battery power control of grid-connected energy-stored quasi-impedance source inverter with PV system", *Applied Energy*, vol. 329, pp. 120286-120296, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120286.





- [14] G. Yu, J. Dong, T. B. Soeiro, G. Zhu, Y. Yao and P. Bauer, "Three-mode variable-frequency zvs modulation for four-switch buck+boost converters with ultra-high efficiency", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 4, pp. 4805-4819, April 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3231969.
- [15] K. Bandara, T. Sweet and J. Ekanayake, "Photovoltaic applications for off-grid electrification using novel multi-level inverter technology with energy storage", *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 82-88, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.05.033.
- [16] A. Taghvaie, M. Zand, S. Padmanaban, M.A. Nasab and B. Khan, "A new step-up switched-capacitor voltage balancing converter for NPC multilevel inverter-based solar PV system", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 83940-83952, May. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992161.
- [17] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Ehsan, "Modeling and simulation of the single phase voltage source UPS inverter with fourth order output filter", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 63-58, Feb. 2011, dor: 20.1001.1.23223871.1389.1.4.8.3.
- [18] M. Mohammadzamani, M. Moazzami, I. Sadeghkhani, "Voltage THD minimization in multilevel cascade inverters using repetitive quadratic programming", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 48, pp. 31-42, March 2022, dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.48.1.1.
- [19] H. Moradmand-Jazi, E. Adib and B. Fani, "Investigation and improvement of high step-up converters for pv module applications", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 28, pp. 35-44, March 2017, dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.28.4.9.
- [20] S. Souri, H. Mohammadnezhad-Shourkaei, S. Soleymani and B. Mozafari, "Reactive power management in low voltage distribution networks using capability and oversizing of PV smart inverters", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 56, pp. 21-42, March 2024, dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.56.2.2.
- [21] R. Shahedi, K. Sabahi, M. Tayana, A. Hajizadeh, "Self-tuning fuzzy PID controller for load frequency control in ac micro-grid with considering of input delay", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 35, pp. 19-26, Dec. 2019, dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.35.3.6.
- [22] N. Taheri, H. Orojlo and F. Ebrahimi, "Damping controller design in offshore wind power plants to improve power system stability using fractional order PID controllers based on optimized exchange market algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 51, pp. 89-108, Dec. 2022, dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.51.6.9.
- [23] J. Hu, J. Zhu and D.G. Dorrell, "Model predictive control of grid-connected inverters for pv systems with flexible power regulation and switching frequency reduction", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 587-594, Jan./Feb. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2349493.
- [24] O.P. Pahari and B. Subudhi, "Integral sliding mode-improved adaptive mppt control scheme for suppressing grid current harmonics for pv system", *IET Renewable Power Gener.*, vol. 12, no. 16, pp. 1904-1914, Dec. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5215.
- [25] M. Dhanalakshmi and V. Sankaranarayanan, "A novel nonlinear sliding mode controller for a single stage grid-connected photovoltaic system", *ISA Transactions*, vol. 107, pp. 329-339, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.08.016.
- [26] M. said Adouairi, B. Bossoufi, S. Motahhir and I. Saady, "Application of fuzzy sliding mode control on a single-stage grid-connected PV system based on the voltage-oriented control strategy", *Results in Engineering*, vol. 17, Article Number: 100822, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2020.100822.
- [27] N. Mahdian-Dehkordi, M. Namvar, H. Karimi, P. Piya and M Karimi-Ghartemani, "Nonlinear adaptive control of grid-connected three-phase inverters for renewable energy applications", *International Journal of Control*, vol. 90, no. 1, pp. 53-67, Jan. 2017, doi: 10.1080/00207179.2016.1151954.
- [28] A. Ghanem, M. Rashed, M. Sumner, M. A. Elsayes and I.I. Mansy, "Grid impedance estimation for islanding detection and adaptive control of converters", *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 11, pp. 1279-1288, Sept. 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0794.
- [29] V.R. Chowdhury and J.W. Kimball, "Control of a three-phase grid-connected inverter under non-ideal grid conditions with online parameter update", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1613-1622, Sept. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2899471.
- [30] M. Bhunia and B. Subudhi, "A Self-Tuning Adaptive Control Scheme for a Grid-Connected Three-Phase PV System", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 5709-5716, Mar. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3069550.



- [31] F.J. Lin, K.H. Tan, Y.K. Lai and W.C. Luo, "Intelligent PV power system with unbalanced current compensation using CFNN-AMF", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8588–8598, Sept. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2889664.
- [32] S. Heidari, A. Hatami and M. Eskandari, "An intelligent capacity management system for interface converter in AC-DC hybrid microgrids", *Applied Energy*, vol. 316, p. 119112, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119112.
- [33] A.Q. Al-Shetwi, W.K. Issa, R.F. Aqeil, T.S. Ustun, H.M. Al-Masri, K. Alzaareer, M.G. Abdolrasol and M.A. Abdullah, "Active power control to mitigate frequency deviations in large-scale grid-connected PV system using grid-forming single-stage inverters", *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2035, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062035.
- [34] C. Zhong, Y. Zhou and G. Yan, "Power reserve control with real-time iterative estimation for PV system participation in frequency regulation", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, p. 106367, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106367.
- [35] M.K. Mishra, A. Mishra and V.N. Lal, "An advanced PLL-less control scheme for LVRT capability with harmonics current mitigations in grid-tied PV system under weak and distorted grid", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1298–1304, Mar. 2022, doi: 10.1109/APEC43599.2022.9773716.
- [36] S.S. Puhan and R. Sharma, "A modified FOGI-FLL feature-based control algorithm for single-stage grid-interfaced solar PV system", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, pp. 1–7, Mar. 2022, doi: 10.1007/s40095-022-00433-6.
- [37] J.S.A. Rahavi, T. Kanagapriya and R. Seyezhai, "Design and analysis of interleaved boost converter for renewable energy source", *International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*, Kumaracoil, India, pp. 447–451, May. 2012, doi: 10.1109/ICCEET.2012.6203850.
- [38] J. Yuan, F. Blaabjerg, Y. Yongheng, A. Sangwongwanich and Y. Shen, "An overview of photovoltaic microinverters: Topology, efficiency, and reliability", *IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 1-6, Oct. 2019, doi: 10.1109/CPE.2019.8862334.
- [39] L. Piegari and R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 4, no. 4, pp. 317–328, July 2010, doi: 10.1049/iet-rpg.2009.0035.
- [40] R.K. Mudi and N.R. Pal, "A self-tuning fuzzy PI controller", *Fuzzy Sets Systems*, vol. 115, no. 2, pp. 327–338, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0165-0114(98)00147-X.
- [41] N. Pogaku, M. Prodanovic and T.C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, Mar. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2006.890003.
- [42] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Power and Energy Society*, Piscataway, NJ, USA, Standard 519-2014, 2014.

## زیر نویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Renewable Energy Sources
  - <sup>2</sup> Photovoltaic
  - <sup>3</sup> Maximum Power Point Tracking
  - <sup>4</sup> Model Predictive Control
  - <sup>5</sup> Non-Linear Sliding Mode Control
  - <sup>6</sup> Fuzzy Sliding Mode Control
  - <sup>7</sup> Perturb and Observe Algorithm
  - <sup>8</sup> Low Pass Filter
  - <sup>9</sup> Fuel Cell
  - <sup>10</sup> Droop Control
  - <sup>11</sup> Overshoot
  - <sup>12</sup> Settling Time