

Improving Performance of a Photovoltaic System Based on a Forward Converter and a Single-Phase Inverter Connected to Grid with Current Unfolding Method and Adaptive Backstepping Control

Rasoul Zargar¹, Navid Reza Abjadi², Abbas Kargar³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Sharekord, Iran

ras.zargar@gmail.com

² Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Sharekord, Iran

abjadi.navidreza@sku.ac.ir

³ Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Sharekord, Iran

kargar@icee.org

Abstract:

In this paper, a new, robust and simple controller is suggested for a two stage, single-phase grid connected photovoltaic power system. The state space equations of the system are obtained. Adaptive backstepping nonlinear controller is employed to design this controller. Uncertainties do not affect controller performance. The proposed photovoltaic system has two stages. In the first stage, a two-switch forward converter is used. This converter works by PWM method. Carrier frequency can reached up to several tens of kHz. This converter receives the input voltage and produces a rectified sinusoidal current. In the second stage, a single-phase inverter is used. This inverter works on the line frequency with current unfolding method. The current of the inductor of the inverter filter in the output, indicates the injected power from photovoltaic cells to the grid. Using the designed controller, the injected current tracks its reference. Simulation results show the high performance of the robust suggested nonlinear controller.

Keywords: Photovoltaic, Forward converter, Grid connected single-phase inverter, Nonlinear control, Adaptive backstepping control, Current unfolding.

Article Type: Research

Received: 13. 12. 2024

Revised: 15. 05. 2025

Accepted: 18. 06. 2025

Corresponding author : N.R.Abjadi

Corresponding author's address: Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.



1. Motivation of the work

Solar energy systems are increasingly utilized due to their environmental benefits and independence from fossil fuels. However, photovoltaic (PV) panels produce low and variable DC voltages, typically between 10–40 V, which depend on irradiance and temperature. To ensure stable operation and high efficiency, DC–DC converters with voltage boosting capability and maximum power point tracking (MPPT) are required [1]. Existing high-gain converters often rely on coupled inductors or complex multi-mode operation, making their design and control difficult. Moreover, many of these converters exhibit nonlinear and non-minimum phase characteristics, which complicate controller implementation and may degrade dynamic performance. To overcome these limitations, this paper proposes a grid-connected solar power system based on a two-switch forward converter and a single-phase inverter. The converter provides galvanic isolation, prevents leakage current, and achieves voltage boosting through transformer design. Its two-switch configuration eliminates the need for an additional demagnetizing winding and enables partial energy recovery to the source. A current injection strategy based on current unfolding at the line frequency is used to generate sinusoidal grid currents while significantly reducing switching losses compared with PWM control [2]. Furthermore, an adaptive backstepping controller designed via Lyapunov theory ensures robust current tracking and stability under input and grid voltage variations.

2. Contributions

This study presents a novel grid-connected solar power system that integrates a two-switch forward converter with a single-phase inverter. The main contributions can be summarized as follows:

A modified two-switch forward converter is proposed for photovoltaic applications. Unlike conventional topologies, the proposed converter achieves galvanic isolation, voltage boosting, and transformer demagnetization without requiring an auxiliary winding. It also allows partial energy recovery to the source, improving efficiency.

The converter operates with a single mode and a minimum-phase dynamic response, reducing design complexity compared with high-gain converters employing coupled inductors or multiple modes.

A novel current unfolding method at line frequency is adopted to generate a sinusoidal grid current. This approach significantly decreases switching losses compared to traditional PWM-based techniques.

An adaptive backstepping controller is developed using Lyapunov stability theory to ensure robust current tracking under parameter uncertainties and variations in PV or grid voltage. The proposed control and design approach can be extended to other nonlinear converters,

such as flyback converters, making it a flexible solution for renewable energy systems.

3. Procedures

The study focuses on the modeling, design, and control of a grid-connected photovoltaic (PV) power system employing a two-switch forward converter and a single-phase inverter. The objective was to achieve efficient DC–AC power conversion, robust current control, and reduced switching losses. The system control was implemented digitally using a microcontroller. The current injection control based on current unfolding at line frequency was applied to produce a sinusoidal current synchronized with the grid voltage, while minimizing switching losses. An adaptive backstepping controller, derived from Lyapunov stability theory, was designed to regulate the inverter current and compensate for parameter uncertainties and input voltage fluctuations. Key parameters measured included converter efficiency, total harmonic distortion (THD) of the injected current, voltage and current waveforms, and dynamic response to load. The performance of the proposed system was compared with a conventional PI-controlled converter. The results demonstrated reduced switching losses, lower THD, and improved current tracking accuracy under uncertain conditions.

4. Findings

Simulation and experimental results confirm the effectiveness of the proposed two-stage solar power system in terms of stability, efficiency, and current quality. The two-switch forward converter demonstrated stable operation with reduced current ripples due to the implementation of the low-pass LC filter. The converter achieved high voltage gain through the transformer turns ratio while maintaining galvanic isolation and enabling partial energy recovery to the source. These features improved both the efficiency and the dynamic response of the system.

The proposed converter with current unfolding technique in the inverter stage significantly reduced switching losses compared to conventional methods. This not only decreased power dissipation but also reduced the overall circuit volume and heat generation, making the system more compact and cost-effective.

The adaptive backstepping control strategy based on Lyapunov theory successfully ensured robust current tracking even under variations in input voltage, solar irradiance, and grid conditions. The controller maintained sinusoidal current injection with low total harmonic distortion (THD) and fast transient response. The system remained stable despite parameter uncertainties and load changes, validating the robustness of the proposed control scheme.

5. Conclusion

The proposed two-stage solar power conversion system consists of a two-switch forward converter in the first stage and a single-phase inverter in the second stage.

In the first stage, the two-switch forward converter operates as a minimum-phase topology featuring an isolating step-up transformer. This converter provides energy recovery to the source and automatic core demagnetization. In the second stage, a single-phase inverter employing bipolar switching with a current unfolding technique is used. This switching logic simplifies the inverter's control scheme and considerably reduces switching losses, which in turn allows for smaller circuit size and improved overall efficiency. A robust adaptive backstepping controller based on Lyapunov stability theory is designed. This controller maintains stable operation and accurate current tracking despite parameter uncertainties or variations in solar irradiance, temperature, and grid voltage within their allowable ranges. Simulation results confirm that the proposed system achieves fast dynamic response, high tracking accuracy, and excellent injected power quality under grid-connected operation. Furthermore, experimental results of the two-switch forward converter demonstrate its effectiveness in generating rectified sinusoidal current. Even when a conventional PI controller is applied in the hardware setup, the converter maintains satisfactory performance, validating the practicality and robustness of the proposed design.

بهبود عملکرد یک سیستم برق خورشیدی مبتنی بر مبدل فوروارد و اینورتر تک فاز متصل به شبکه با روش بازسازی جریان و کنترل پسگام تطبیقی

رسول زرگر^۱، نویدرضا ابجدی^۲، عباس کارگر^۳

۱- دانشجوی دکتری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

ras.zargar@gmail.com

۲- دانشیار - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

abjadi.navidreza@sku.ac.ir

۳- دانشیار - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

kargar@ieee.org

چکیده: در این مقاله یک کنترل کننده ساده، جدید و مقاوم سیستم تولید کننده برق خورشیدی متصل به شبکه تک فاز مجهز به یک مبدل الکترونیک قدرت دو مرحله ای ارائه شده است. معادلات حالت حاکم بر سیستم بدست آورده شده است. کنترل مقاوم ارائه شده، کنترل غیرخطی پسگام تطبیقی است. در روش استفاده شده، نامعینی ها، کنترل کننده را تحت تاثیر قرار نمی دهند و یک کنترل کننده مقاوم و پرسرعت ارائه شده است. سیستم برق خورشیدی ارائه شده دو مرحله ای است. در مرحله نخست یک مبدل فوروارد دو کلیده قرار دارد. این مبدل با استفاده از روش پهنای پالس با فرکانس چند ده کیلوهرتز کار می کند. این مبدل ولتاژ ورودی را دریافت کرده و جریانی به صورت سینوسی یکسو شده، تولید می کند. در مرحله دوم، یک اینورتر تک فاز قرار دارد. این اینورتر با فرکانس خط کار می کند. وظیفه این اینورتر این است که جریان سینوسی یکسو شده را دریافت کرده و جریانی سینوسی به شبکه تزریق کند. به این روش، بازسازی جریان در فرکانس خط گویند. این اینورتر به صورت دوقطبی کلیدزنی می شود. جریان سلف موجود در خروجی این اینورتر نمایانگر توان خروجی صفحه خورشیدی است. این جریان به عنوان متغیر خروجی کنترلی انتخاب می گردد. توسط کنترل کننده، جریان خروجی، مرجع جریان انتخاب شده را دنبال می کند. نتایج به دست آمده، کارایی بالای روش کنترل غیرخطی مقاوم ارائه شده را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: برق خورشیدی، مبدل فوروارد، اینورتر تک فاز متصل به شبکه، کنترل غیرخطی، کنترل پسگام تطبیقی، روش بازسازی جریان

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۳

نام نویسنده مسئول: نویدرضا ابجدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

سادگی الگوریتم، اجرا و عملکرد خوب در زمان تابش ثابت از جمله روش‌های محبوب در خصوص محاسبه بیشینه توان الکتریکی از صفحه‌های خورشیدی می‌باشند. ولتاژ DC دریافت شده از صفحه خورشیدی در خروجی مبدل الکترونیک قدرت توسط اینورتر به ولتاژ AC سه‌فاز و یا تک‌فاز مناسب تبدیل می‌شود [۱۰]. اینورتری که وظیفه این کار را بر عهده دارد، باید قادر باشد که مقداری اندک سطح ولتاژ خروجی خود را نسبت به سطح ولتاژ شبکه افزایش دهد. اکثر مبدل‌های الکترونیک قدرت، رفتار غیرخطی و ناکمینه فاز از خود نشان می‌دهند. این موضوع کنترل آنها را دشوار می‌کند. بدون استفاده از روش‌های پیچیده و پرهزینه، این مبدل‌ها رفتار دینامیکی نامطلوبی را نتیجه می‌دهند [۱۱]. در این پژوهش یک سیستم برق خورشیدی شامل مبدل فرورارد دو کلیده و اینورتر تک‌فاز متصل به شبکه پیشنهاد شده است. مبدل فرورارد دو کلیده برگرفته از مبدل کاهنده است. برخلاف بسیاری از مبدل‌ها، این مبدل، کمینه فاز است ضمناً جداسازی ترانسفورماتوری بین شبکه و صفحه‌های خورشیدی را بر عهده دارد و از جریان نشستی جلوگیری می‌کند. افزون بر این، عمل افزایش ولتاژ با انتخاب نسبت دور مناسب ترانسفورماتور، امکان پذیرست. همچنین، با استفاده از ساختار دو کلیده، نیاز به سیم پیچ سوم مغناطیس زدا بر طرف می‌شود و انرژی ذخیره شده، در بازه‌هایی به منبع بر می‌گردد. در سیستم خورشیدی پیشنهادی، استراتژی کنترلی برای تزریق جریان سینوسی به شبکه بر اساس روش بازسازی جریان در فرکانس شبکه است که تلفات کلیدزنی را برخلاف روش PWM بسیار کاهش می‌دهد. استفاده از یک کنترلگر مقاوم برای غلبه بر نامعینی‌های سیستم و تغییرات ولتاژ ورودی یا ولتاژ شبکه از اهمیت زیادی برخوردارست کنترلگرهای مقاوم رایج عبارتند از کنترلگر H_∞، کنترلگر مود لغزشی، و کنترلگرهای تطبیقی. کنترلگر H_∞ با در نظر گرفتن نیاز به حل نامعادلات ماتریسی و معادله ریکاتی، نسبتاً طراحی پیچیده‌ای دارد همچنین دارای مرتبه نسبتاً بالایی است که پیاده سازی آن را دشوار می‌سازد. افزون بر این، این کنترلگر بیشتر برای سیستم‌های خطی مطرح است. کنترلگر مود لغزشی هم از پدیده وزوز^۵ رنج می‌برد و تنها برای نامعینی‌های جفت شده^۶ با ورودی مقاوم است. در این مقاله، کنترلگر جریان تزریقی، براساس روش پسگام تطبیقی، گام به گام با تئوری لیاپانوف طراحی می‌شود که یک کنترلگر مقاوم را نسبت به نامعینی‌ها، ارائه می‌دهد. این کنترلگر برای رسیدن به ردیابی دقیق و مقاوم مناسب است. این کنترلگر همچنین برای مبدل‌های دیگر مثل فلای بک که معادلات غیرخطی دارند قابل تعمیم است.

۲- عملکرد سیستم‌های تولید برق خورشیدی

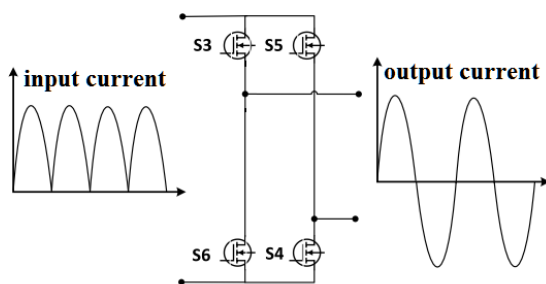
سیستم‌های تولید کننده برق خورشیدی جهت دریافت انرژی خورشید و انتقال آن به شبکه قدرت نیاز به انجام دو فرآیند دارند. در فرآیند اول اجرای MPPT و افزایش سطح ولتاژ DC در خروجی صفحه خورشیدی و در فرآیند دوم تبدیل ولتاژ از سطح ولتاژ DC به AC است

سیستم‌های خورشیدی آلودگی زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کنند. در مقابل، نیروگاه‌های فسیلی با احتراق سوخت آلاینده‌های فراوان تولید می‌کنند. از این‌رو، استفاده از انرژی خورشیدی رو به گسترش است [۱]. سیستم‌های تولید برق خورشیدی به دو صورت جزیره‌ای و یا متصل به شبکه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سیستم‌های تولیدکننده برق خورشیدی متصل به شبکه را می‌توان بدون باتری راه-اندازی کرد. استفاده از این نوع اتصال سیستم‌های برق خورشیدی به علت قیمت زیاد باتری بیشتر مورد توجه است [۲]. صفحه‌های خورشیدی به وسیله مبدل‌های الکترونیک قدرت به ریزشبه‌ها متصل می‌شوند. در این مقطع زمانی سطح ولتاژ خروجی تولید شده صفحه-های خورشیدی حدود ۱۰ تا ۴۰ ولت DC است. در بسیاری از کاربردها نیاز به افزایش ولتاژ صفحه‌های خورشیدی است [۳-۵]. در این مراجع مبدل‌های جدیدی با کاربرد در سیستم‌های برق خورشیدی پیشنهاد و بررسی شده‌اند. در [۳] با استفاده از سلف تزویج شده سه سیم پیچه، یک مبدل افزایشده با دو خروجی و زمین مشترک ارائه شده است. در این مبدل سعی شده است از تعداد عناصر کمی استفاده شود ولی با سلف تزویج شده سه سیم پیچه، بهره ولتاژ بالا تحقق یابد که طراحی و ساخت مبدل را پیچیده می‌کند. یک مبدل بسیار افزایشده بر پایه مبدل DC-DC شبه منبع امپدانس در [۴] پیشنهاد شده است. این مبدل هم از سلف تزویج شده سه سیم پیچه بهره می‌برد که استفاده از آن را دشوار می‌سازد. یک مبدل دوخروجی مناسب برای کاربردهای برق خورشیدی و خودروهای برقی در [۵] مطرح شده است. از مزایای این مبدل، ارائه دو سطح ولتاژ در دو خروجی، علی‌رغم تک سوئیچه بودن است ولی این دو سطح ولتاژ به هم وابسته‌اند و نمی‌توان آنها را جداگانه تنظیم کرد. مبدل‌های [3-5] هر سه مودهای عملکرد متعددی دارند که تحلیل و طراحی آن‌ها برای کاربر دشوار خواهد بود.

ولتاژ تولید شده این صفحه‌ها به میزان تابش خورشید و دما وابسته هستند. مدارهای الکترونیک قدرت متصل کننده صفحه‌های خورشیدی به شبکه برق باید نسبت به تغییر سطح ولتاژ و جریان DC ورودی از سمت صفحه‌های خورشیدی حساس نباشند. این مودهای اشاره شده در سیستم‌های تولیدکننده برق خورشیدی به نام نامعینی^۱ شناخته می‌شوند. در [۶] برای یک مبدل منبع امپدانس DC-DC با روش کنترل مبتنی بر انفعال، یک کنترلگر برای کاربردهای انرژی‌های نو، طراحی شده است.

با توجه به راندمان کم صفحه‌های خورشیدی، مبدل‌های الکترونیک قدرت باید توانایی تطبیق امپدانس در ورودی را داشته باشند و در تمامی زمان‌ها تحت شرایط بیشینه راندمان در حال کار باشند. این موضوع را (MPPT)^۲ می‌نامند [۷]. برای محاسبه نقطه بیشینه توان الکتریکی از صفحه خورشیدی روش‌های متفاوتی ابداع شده است. روش اغتشاش و مشاهده^۳ [۸] و روش هدایت افزایشی^۴ [۹] به دلیل

یک جریان سینوسی بدست می آورد. شکل (۱)، بازسای جریان با اینورتر را نشان می دهد. کلیدها به صورت ضربدری با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز روشن یا خاموش می شوند. از مزایای این روش، سادگی آن است. تلفات کلیدزنی اینورتر هم به مراتب کاهش می یابد چون با فرکانس خط کار می کند. شایان ذکر است که تلفات مبدل DC-DC افزایش نمی یابد چون چه در تولید یک ولتاژ ثابت یا در تولید جریان سینوسی، همچنان مدولاسیون پهنای پالس خود را دارد فقط مرجع کنترلی آن تغییر یافته است. از مزایای دیگر این روش این است که چون جریان خروجی اینورتر پیوسته و سینوسی است به طور طبیعی به صفر می رسد و کلیدهای مربوطه خاموش می شوند بنابراین حتی می توان برای کلیدهای اینورتر از ترستور استفاده کرد.

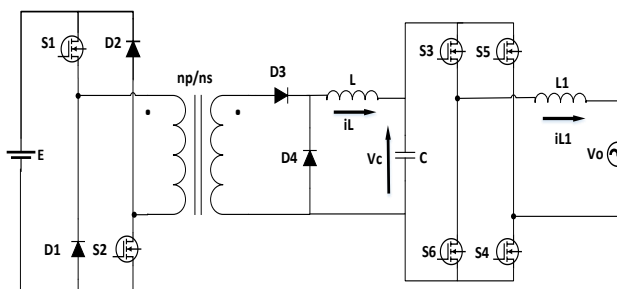


شکل (۱): روش بازسازی جریان

۴- طراحی و مدل سازی مدار

مدار سیستم تولیدکننده برق خورشیدی تک فاز متصل به شبکه به صورت شکل (۲) پیشنهاد می شود. در مرحله نخست از یک مبدل فوروارد دوکلیده استفاده شده است. این مبدل فوروارد دارای قابلیت بازگشت انرژی به منبع تغذیه است.

در مرحله دوم یک اینورتر تک فاز قرار گرفته است که به روش بازسازی جریان کار می کند. شبکه تحت اتصال با یک منبع سینوسی مدل سازی شده است و جریان تزریقی به شبکه به عنوان خروجی کنترلی در نظر گرفته می شود و مبدل فوروارد به طریقی کلیدزنی می گردد که جریان مورد نظر در خروجی ساخته شود.



شکل (۲): سیستم تولید برق خورشیدی پیشنهاد شده

[12]. مبدل های الکترونیک قدرت سیستم های تولیدکننده برق خورشیدی به دو دسته مبدل الکترونیک قدرت یک مرحله ای و مبدل الکترونیک قدرت دو مرحله ای دسته بندی می شوند. در مبدل الکترونیک قدرت سیستم های تولیدکننده برق خورشیدی از نوع یک مرحله ای، مبدل الکترونیک قدرت تنها دارای یک اینورتر است و صفحه های خورشیدی توسط یک اینورتر به صورت مستقیم به شبکه متصل می شوند. در [۱۳-۱۵] سیستم های تولیدکننده برق خورشیدی یک مرحله ای نشان داده شده اند. برای دستیابی به سطح ولتاژ مناسب در سیستم یک مرحله ای باید تعدادی صفحه خورشیدی را به صورت سری قرار داد که این موضوع از معایب این نوع مبدل محسوب می گردد. نوع متداول مبدل های الکترونیک قدرت مورد استفاده در سیستم های تولیدکننده برق خورشیدی، مبدل نوع دو مرحله ای است. این روش در [۱۶-۱۷] نشان داده شده است. اگر در این ساختار سطح توان بالاتر نیاز باشد، می توان مشابه با [۱۷] از ساختار مبدل های درهم تنیده^۷ استفاده نمود. مبدل DC-DC مرحله نخست می تواند بدون ترانسفورماتور یا دارای ترانسفورماتور باشد [۱۸-۱۹]. مبدل فلای بک^۸ و مبدل فوروارد^۹ دو نوع از مبدل های مجهز به ترانسفورماتور محسوب می گردند. در سال های اخیر استفاده از اینورتر یکپارچه شده مبتنی بر مبدل فلای بک در سیستم های تولید کننده برق خورشیدی مورد توجه بوده است [۲۰]. استفاده از مبدل فلای بک باعث کاهش عنصرهای مداری، قیمت و حجم مدار مبدل الکترونیک قدرت می شود. با استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا در این ساختار، جداسازی الکتریکی بین صفحه های خورشیدی و مبدل الکترونیک قدرت انجام می شود. استفاده از این اینورتر یکپارچه شده می تواند باعث افزایش راندمان صفحه ای خورشیدی تا ۹۵ درصد می شود [۲۱-۲۲]. برای کنترل مبدل الکترونیک قدرت در [۲۳-۲۴] جریان مغناطیس کننده سلف مبدل فلای بک به عنوان خروجی کنترلی در نظر گرفته شده است. مبدل فلای بک کمینه فاز نیست و همچنین امکان اندازه گیری فیزیکی جریان سلف در مبدل فلای بک وجود ندارد بنابراین جهت سهولت در کنترل مدار مناسب تر است که این مبدل با مبدل فوروارد جایگزین شود- [25]

[27]

۳- روش بازسازی جریان در اینورتر

روش مرسوم برای تزریق جریان به شبکه با کمترین هارمونیکها، استفاده از مدولاسیون پهنای پالس سینوسی در اینورتر است. در این روش به دلیل فرکانس کلیدزنی بالای اینورتر، تلفات افزایش می یابد. پیاده سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی هم، نسبتا دشوار است. در برابر این روش، روش دیگر بازسازی جریان در فرکانس خط^{۱۰} است [۲۸]. در این روش ابتدا توسط یک مبدل DC-DC یک جریان با شکل موج سینوسی یکسو شده ساخته می شود سپس این جریان وارد اینورتر می شود. اینورتر خیلی ساده، بدون استفاده از مدولاسیون پهنای پالس، صرفا با کلیدزنی دو قطبی این جریان را بازسازی کرده و از آن

تطبیقی ابتدا از Z_1 نسبت به زمان مشتق گرفته می شود و در سمت راست تساوی به جای $\dot{i}_{L_1}$ رابطه (۹) جایگزین می شود. معادله حاصل دارای پارامتر v_C است، بنابراین از (۷) مقدار v_C محاسبه می شود و در آن تساوی جایگزین می گردد و (۱۰) به صورت زیر بدست می آید.

$$\dot{Z}_1 = \frac{n_s}{n_p} \frac{E}{L_1} u - \frac{L}{L_1} \dot{i}_L - \frac{v_o}{L_1} - \dot{i}_{L_{1Ref}} \quad (10)$$

در (۱۰) پارامترهای $\theta_1 = \frac{n_s}{n_p} \frac{E}{L_1}$ ، $\theta_2 = \frac{L}{L_1}$ و $\theta_3 = -\frac{v_o}{L_1}$ را در نظر بگیرید. این پارامترها نامعین هستند، با تعریف بردار $L1^T \triangleq [u \quad \dot{i}_L \quad 1]$ و بردار پارامترهای نامعین به صورت $\hat{\theta} \triangleq [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]$ به صورت (۱۱) بازنویسی می شود.

$$\dot{Z}_1 = \hat{\theta}^T L1 + (\theta - \hat{\theta})^T L1 - \dot{i}_{L_{1Ref}} \quad (11)$$

حال تابع مربعی لیاپانوف (۱۲) معرفی می شود.

$$V = \frac{1}{2} Z_1^2 + (\theta - \hat{\theta})^T \Gamma^{-1} (\theta - \hat{\theta}) \quad (12)$$

از تابع لیاپانوف نسبت به زمان مشتق گیری نموده و با جایگزینی (۱۱) و مرتب سازی (۱۳) حاصل می شود.

$$\dot{V} = Z_1 (\hat{\theta}^T L1 - \dot{i}_{L_{1Ref}}) + (\theta - \hat{\theta})^T \Gamma^{-1} (-\dot{\hat{\theta}} + \Gamma Z_1 L1) \quad (13)$$

در صورتی که حاصل عبارت $-\dot{\hat{\theta}} + \Gamma Z_1 L1$ برابر صفر شود جمله دوم حذف می شود و $\dot{\hat{\theta}}$ به دست آمده از این تساوی به عنوان قانون تخمین شناخته می شود به علاوه اگر $\hat{\theta}^T L1 - \dot{i}_{L_{1Ref}}$ برابر با $-C_1 Z_1$ گردد، مشتق تابع لیاپانوف محاسبه شده معین منفی می شود و سیستم به صورت مجانبی پایدار می گردد. با توضیح های ارایه شده متغیر Z_2 را به صورت (۱۴) در نظر بگیرید.

$$Z_2 \triangleq \hat{\theta}^T L1 - \dot{i}_{L_{1Ref}} - (-C_1 Z_1) \quad (14)$$

از (۱۴) عبارت $\hat{\theta}^T L1$ محاسبه می گردد و این عبارت در (۱۱) جایگزین می شود و (۱۵) بدست می آید.

$$\dot{Z}_1 = Z_2 - C_1 Z_1 + (\theta - \hat{\theta})^T L1 \quad (15)$$

از طرفین (۱۴) نسبت به زمان مشتق گیری کرده و پس از ساده سازی و تعریف $L2^T \triangleq [C_1 u \quad C_1 \dot{i}_L \quad C_1]$ نتیجه به صورت (۱۶) نوشته می شود.

$$\dot{Z}_2 = A + \hat{\theta} L2^T \quad (16)$$

در (۱۶) عبارت A به صورت (۱۷) تعریف می شود.

$$A = \hat{\theta}_1 u + \hat{\theta}_2 \dot{u} + \hat{\theta}_3 \dot{i}_L + \hat{\theta}_4 \ddot{i}_L + \hat{\theta}_5 - C_1 \dot{i}_{L_{1Ref}} \quad (17)$$

تابع لیاپانوف توسعه یافته به صورت (۱۸) تعریف می شود.

۵- معادلات حالت میانگین سیستم

در بدست آوردن معادلات حالت، از اثرات پارازیتی عناصر مدار و کلیدها صرف نظر می شود. فرض بر این است که افت ولتاژ کلیدها و دیودها به اندازه کافی ناچیز است که قابل صرف نظر باشند. به تعداد عناصر ذخیره کننده انرژی، متغیر حالت وجود دارد. متغیرهای حالت انتخابی عبارتند از: ولتاژ خازن و جریانهای دو سلف موجود در مدار. مدار از شرایط اولیه صفر یا هر شرط اولیه ای می تواند در محدوده مجاز شروع به کار کند. مدار دارای دو حالت عملکرد می باشد در حالت اول S_1 ، S_2 و D_3 روشن و D_1 ، D_2 و D_4 خاموش می باشند. با اعمال KVL و KCL در ورودی و خروجی معادلات حالت مدار به صورت (۱) تا (۳) بدست می آیند.

$$\dot{i}_L = -\frac{v_c}{L} + \frac{n_s}{n_p} \frac{E}{L} \quad (1)$$

$$\dot{v}_C = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{L1}}{C} \quad (2)$$

$$\dot{i}_{L1} = \frac{v_c}{L1} - \frac{v_o}{L1} \quad (3)$$

در حالت دوم S_1 ، S_2 و D_3 خاموش و D_1 ، D_2 و D_4 روشن می باشند. با اعمال KVL و KCL در ورودی و خروجی معادلات حالت مدار به صورت (۴) تا (۶) بدست می آیند.

$$\dot{i}_L = -\frac{v_c}{L} \quad (4)$$

$$\dot{v}_C = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{L1}}{C} \quad (5)$$

$$\dot{i}_{L1} = \frac{v_c}{L1} - \frac{v_o}{L1} \quad (6)$$

معادلات میانگین به صورت (۷) تا (۹) بدست می آیند.

$$\dot{i}_L = -\frac{v_c}{L} + \frac{n_s E}{n_p L} u \quad (7)$$

$$\dot{v}_C = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{L1}}{C} \quad (8)$$

$$\dot{i}_{L1} = \frac{v_c}{L1} - \frac{v_o}{L1} \quad (9)$$

۶- سیستم کنترل تولید کننده برق خورشیدی

جریان $\dot{i}_{L_1}$ را به عنوان اساس کنترل در نظر بگیرید. مرجع جریان $i_{L_{1Ref}} = A \sin(\omega t)$ می باشد. متغیر حالت جدید را به صورت $Z_1 = i_{L_1} - i_{L_{1Ref}}$ در نظر گرفته می شود. برای اعمال کنترل پسگام

لم شبه لیاپانوف: چنانچه تابع اسکالر V دارای ویژگیهای زیر باشد:

الف) V از پایین کراندار باشد. ب) $\dot{V}$ نیمه معین منفی باشد. ج) $\dot{V}$ به طور یکنواخت نسبت به زمان پیوسته باشد.

آنگاه $\dot{V}$ به سمت صفر میل می کند.

با توجه به اینکه V در (۱۸)، معین مثبت است پس ویژگی الف را برآورده می کند. پس از جایگذاری (۲۰) و (۲۴) در (۱۹)،

$$\dot{V} = -C_1 Z_1^2 \quad (28)$$

بنابراین $\dot{V}$ نیمه معین منفی است و ویژگی ب هم برقرارست. برای نشان دادن ویژگی ج، از (۲۸) نسبت به زمان مشتق گرفته می شود و از (۱۵) استفاده می شود:

$$\dot{V} = -2C_1 Z_1 \dot{Z}_1 = -2C_1 Z_1 (Z_2 - C_1 Z_1 + (\theta - \hat{\theta})^T L1) \quad (29)$$

با توجه به اینکه V معین مثبت است و $\dot{V}$ نیمه معین منفی است طبق تئوری لیاپانوف تمام متغیرهای (۱۸) کراندار خواهند بود. یعنی Z_1 و Z_2 و $\theta - \hat{\theta}$ کراندارند. پس در (۲۹) کراندار است. در نتیجه $\dot{V}$ به طور یکنواخت پیوسته است و شرط ج هم برقرارست. از این لم نتیجه می شود در (۲۸) $\dot{V}$ به سمت صفر میل می کند. پس Z_1 به سمت صفر همگرا می شود. یعنی خطای جریان صفر می شود.

۷- شبیه سازی سیستم تولیدی برق خورشیدی

مقادیر عناصر مدار پیشنهاد شده شکل (۲) به صورت جدول (۱) انتخاب می شوند.

جدول (۱): پارامترهای مبدل برای یک نمونه آزمایشگاهی

E	LI	$\frac{n_p}{n_s}$	C	L	v_o
15 volts	4.8mH	$\frac{1}{3}$	0.1μF	1.2mH	9 volts RMS

مدار شکل (۲) در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. روش کلیدزنی PWM با فرکانس حامل ۲۰ کیلوهرتز برای مبدل فرورارد انتخاب گردیده است. عملیات کنترل تطبیقی جهت دنبال نمودن جریان خروجی L_1 به مقدار مرجع $i_{L1Ref} = 1\sin(\omega t)$ به مدت زمان ۵۰ میلی ثانیه صورت گرفته است. پس از آن زمان مرجع جریان به ناگهان به مقدار $i_{L1Ref} = 2\sin(\omega t)$ تغییر می کند. این مرجع می تواند در شرایط کاری مختلف و بنا به شرایط در هر لحظه تغییر کند. در شبیه سازی صورت گرفته، ضریب های کنترل کننده طراحی

$$V = \frac{1}{2} Z_1^2 + \frac{1}{2} Z_2^2 + (\theta - \hat{\theta})^T \Gamma^{-1} (\theta - \hat{\theta}) \quad (18)$$

از این تابع نسبت به زمان مشتق گیری می شود و از (۱۱) و (۱۶) مقادیر $\dot{Z}_1$ و $\dot{Z}_2$ را جایگزین می شود.

$$\dot{V} = Z_1 Z_2 - C_1 Z_1^2 + Z_2 (A + \hat{\theta} L2^T) + (\theta - \hat{\theta})^T \Gamma^{-1} (-\dot{\hat{\theta}} + \Gamma Z_1 L1 + \Gamma Z_2 L2) \quad (19)$$

در (۱۹) با تعریف مناسب و صفر نمودن عبارت آخر قانون تخمین به صورت (۲۰) محاسبه می شود.

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma Z_1 L1 + \Gamma Z_2 L2 \quad (20)$$

ماتریس Γ باید معین مثبت باشد تا تابع لیاپانوف، معین مثبت شود. ساده ترین انتخاب، یک ماتریس قطری است با عناصر روی قطر مثبت. با باز نمودن عبارت بالا، نامعینی های سیستم به صورت (۲۱) تا (۲۳) زیر تخمین زده می شوند.

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \gamma_{11} (Z_1 u + Z_2 C_1 u) \quad (21)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = \gamma_{22} (Z_1 i_L + Z_2 C_1 i_L) \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_3 = \gamma_{33} (Z_1 i_L + Z_2 C_1) \quad (23)$$

در تساوی های بالا γ_{11} ، γ_{22} و γ_{33} عناصر قطری ماتریس Γ می باشند که قابل انتخاب هستند و در تنظیم کنترل کننده مورد استفاده قرار می گیرند. در تنظیم این پارامترها می توان از روش سعی و خطا و یا روشهای هوشمند فرایستاری استفاده کرد به نحوی که دینامیک خطا با سرعت مطلوب به صفر میل کند.

در (۱۹) با تعریف مناسب و صفر نمودن عبارتهای اول و سوم، قانون کنترل به صورت (۲۴) بدست می آید.

$$Z_1 + A + \hat{\theta} L2^T = 0 \quad (24)$$

با جایگزین نمودن مقدار A از (۱۷) و مقادیر نامعینی های تخمین زده شده از (۲۱) تا (۲۳) ورودی u به صورت (۲۵) محاسبه می گردد و به کلیدهای S_1 و S_2 اعمال می گردد.

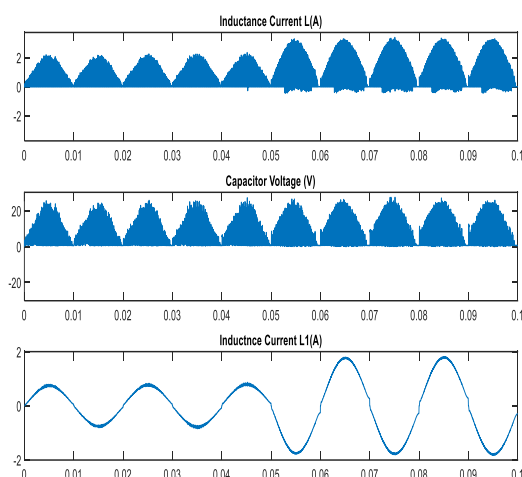
$$u = -\frac{N}{M} \quad (25)$$

مقادیر N و M به صورت (۲۶) و (۲۷) قابل محاسبه هستند.

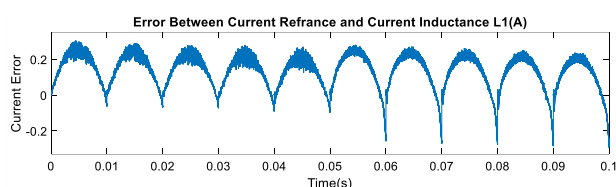
$$M = \dot{\hat{\theta}}_1 + \hat{\theta}_1 C_1 \quad (26)$$

$$N = \hat{\theta}_1 \dot{u} + \hat{\theta}_2 \ddot{i}_L + \hat{\theta}_3 \ddot{i}_L + \ddot{i}_{L1Ref} - \ddot{i}_{L1Ref} - C_1 \dot{i}_{L1Ref} + \hat{\theta}_2 C_1 \dot{i}_L + \hat{\theta}_3 C_1 + Z_1 + C_2 Z_2 \quad (27)$$

برای اثبات همگرایی خطا به سمت صفر از لم شبه لیاپانوف استفاده می شود.



شکل (۵): نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کنترلر PI



شکل (۶): خطای بین جریان‌های مرجع و واقعی با کنترلر PI

جدول (۳): معیارهای کمی برای مقایسه کنترلرها

کنترلر PI	کنترلر پسگام تطبیقی	
5.7 %	2.5 %	THD جریان
0.165 A	0.112 A	مقدار موثر خطا

۸- نتایج آزمایشگاهی بخشی از مدار

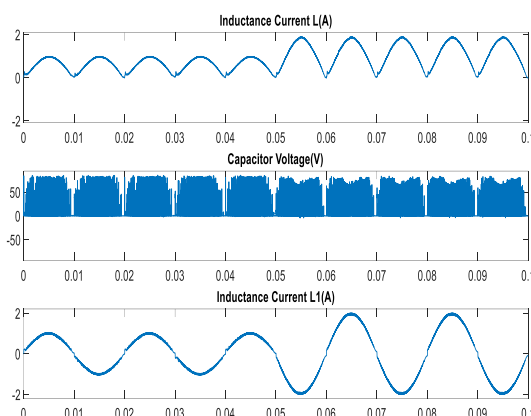
در این بخش، نتایج آزمایشگاهی تست مدار فروراد دو کلیده با کنترل PI و مرجع جریان سینوسی یکسو شده ارائه می‌شود. مبدل به فیلتر L1 و بار مقاومتی ۳/۵ اهم به صورت سری وصل است. پارامترهای مدار، مشابه بخش شبیه‌سازی است. مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده در شکل (۷) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان، از یک حسگر اثر هال ۵ آمپر استفاده شده است. برای پیاده‌سازی کنترلر PI از یک میکروکنترلر ۳۲ بیتی 32F407VG با بردی موسوم به برد دیسکوری^{۱۲} استفاده شده است. فرکانس کلک این میکرو کنترلر ۱۶۸ مگاهرتز است. دارای ورودیهای ADC و خروجیهای DAC است. از این ورودیها برای نمونه برداری جریانها و ولتاژها می‌توان استفاده کرد. به کمک DAC می‌توان برخی سیگنالها

شده شامل γ_{11} ، γ_{22} ، γ_{33} ، C_1 و C_2 با سعی و خطا تنظیم شده اند. مقادیر این ضرایب در جدول (۲) آورده شده است. پس از اجرای شبیه‌سازی نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است.

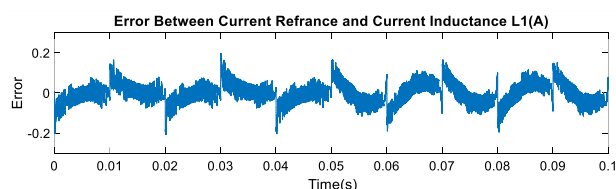
جدول (۲): پارامترهای کنترلرها

کنترلر پسگام تطبیقی $\gamma_{33} = \gamma_{22} = 4 \times 10^{-11}$ $C_2 = C_1 = 1 \times 10^{-5}$

کنترلر PI	$K_f = 10.4$	$K_p = 1.3$
-----------	--------------	-------------



شکل (۳): نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کنترلر پسگام تطبیقی



شکل (۴): خطای بین جریان‌های مرجع و واقعی با کنترلر پسگام تطبیقی

شکل (۴) مقدار خطای دنبال نمودن مرجع جریان در شبیه‌سازی را برای کنترل تطبیقی نشان می‌دهد.

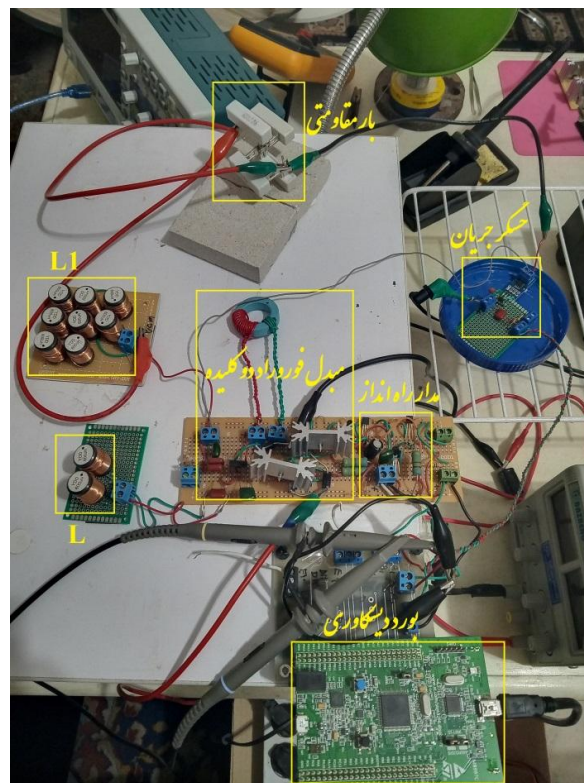
برای بررسی بیشتر مدار پیشنهاد شده، در شبیه‌سازی انجام شده علاوه اعمال کنترل پسگام تطبیقی، روش کنترل PI نیز به مدار پیشنهادی، اعمال شده است. نتایج آن در شکل (۵) آورده شده است. ضرایب این کنترلر نیز به روش سعی و خطا تنظیم شده است و در جدول (۲) آورده شده است. شکل (۶) مقدار خطای دنبال نمودن مرجع جریان در شبیه‌سازی را برای کنترل PI نشان می‌دهد.

برای مقایسه بهتر دو کنترلر، THD جریان تولیدی و مقدار موثر خطا در سیکل آخر با استفاده از دو کنترلر در جدول (۳) آورده شده است که به وضوح برتری کنترلر پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۸- نتیجه گیری

در ساختار برق خورشیدی دو مرحله ای پیشنهاد شده، در مرحله اول از یک مبدل فروراد دو کلیده استفاده شده است. این مبدل کمینه‌فاز است و دارای ترانسفورماتور افزایشنده با ضریب تبدیل دلخواه می‌باشد. مبدل استفاده شده دارای قابلیت بازگشت انرژی به منبع و مغناطیس-زدایی از هسته می‌باشد. با استفاده از این مبدل پایدار ذاتی سیستم قابل افزایش است. با بهره‌گیری از ظرفیت سلفی ترانسفورماتور مبدل فروراد و اضافه نمودن یک خازن مناسب، فیلتر پایین‌گذر مناسبی طراحی و در مدار قرار داده شده است. با انجام این کار نوسان‌ها از روی شکل موج‌های جریان به شدت کاهش یافته است. در مرحله دوم از اینورتر تک‌فاز و روش کلیدزنی دوقطبی با بازسازی جریان استفاده شده است. این موضوع باعث سهولت در منطق کلیدزنی مدار شده است. تکنیک بازیابی جریان، باعث کاهش چشمگیر تلفات کلیدزنی اینورتر می‌گردد. این موضوع باعث کاهش حجم مدار نیز می‌گردد. جهت کنترل از روش مقاوم مبتنی بر تابع لیپانوف پسگام تطبیقی استفاده شده است. طراحی کنترل کننده به نحوی است که نامعینی یا تغییرات در هیچ کدام از عناصر مدار یا تغییرات در شدت تابش خورشید، درجه حرارت و یا سطح ولتاژ شبکه در محدوده‌های مجاز، عملکرد سیستم را مختل نخواهد کرد. نتایج شبیه‌سازی، سرعت بالا، دقت مناسب، دنبال نمودن مرجع جریان و کیفیت خوب توان تزریقی به شبکه تحت اتصال را نشان می‌دهد. در پایان نتایج آزمایشگاهی مبدل فروراد دو کلیده در تولید جریان سینوسی یکسو شده نیز ارائه شد. این نتایج، نشان دهنده کارایی آن حتی با استفاده از کنترل کننده PI در مدار واقعی است.

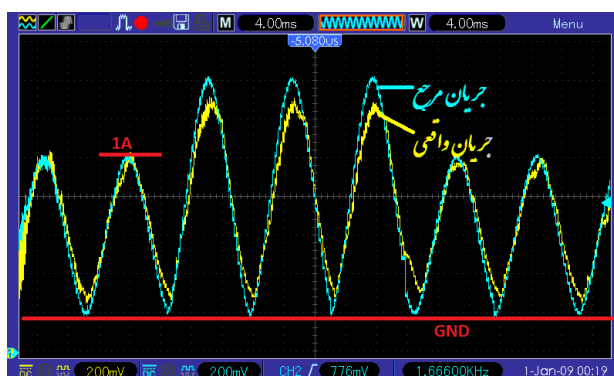
و کمیتها را روی اسیلوسکوپ مشاهده کرد. در اینجا به کمک دو خروجی DAC جریان اندازه گیری شده و مقدار مرجع آن که داخل میکروکنترلر ساخته شده روی اسیلوسکوپ در شکل (۸) قابل مشاهده است. همان گونه که از این شکل دیده می شود جریان مرجع، بصورت سینوسی یکسوشده در نظر گرفته شده که دامنه آن در حین کار تغییر داده می شود.



شکل (۷): مجموعه آزمایشگاهی

مراجع

- [1] W. Alhosaini, M. Aly, E. M. Ahmed, A. Shawky, "Optimized grid-connected three-phase photovoltaic inverter system using cascaded FOPIT-FOPI fractional controller", Energy Reports, Vol. 13, 2025.
- [2] L. A. Kumar, S. A. Alexander, M. Rajendran, "Power Electronic Converters for Solar Photovoltaic Systems", Elsevier Inc., 2021.
- [3] S. Hasanpour "Design and Implementation of a New Step-Up DC-DC Converter with Two Extended Outputs for Renewable Energy Applications", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 21, No. 2, 2024.
- [4] B. Gheisari, M. H. Ershadi, "Analysis and implementation of a soft-switching high step-up quasi Z-source dc-dc converter with low voltage stress", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 21, No. 2, 2024.
- [5] F. Ghasemi, M. R. Yazdani, "A Single-Switch Step-Up Dual-Output DC-DC Converter for Renewable Energy Applications", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 21, No. 2, 2024.
- [6] G. Shahabadi, M. Naseh, S. Es'haghi, "Design of an Interconnection and damping assignment- passivity based control for Z-source DC-DC converter", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 21, No. 3, 2024.



شکل (۸): جریان واقعی خردی مبدل فروراد و مقدار مرجع آن

مقدار واقعی، مقدار مرجع را به خوبی دنبال کرده است. البته در بعضی جاها اختلاف جزئی دیده می شود که امید است با استفاده از کنترل پیشنهادی خطا کمتر گردد.

Conference on Mechanical, System and Control Engineering, 2017.

[24] M. Salimi, V. Hajbani, "Sliding-Mode Control of the DC-DC Flyback Converter in Discontinuous Conduction Mode", IEEE, The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015), 2015.

[25] D. Meneses, O. Garc'ia, P. Alou, J. A. Oliver, J. A. Cobos, "Grid-Connected Forward Microinverter with Primary-Parallel Secondary-Series Transformer", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 9, 2015.

[26] C.-Y. Liao, W.-H. Lin, K.-S. Chen, Y.-M. Chen, C.-Y. Chou, "Forward-type Micro-Inverter with Current Decoupling", 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013.

[27] C.-H. Chang, C.-A. Cheng, H.-L. Cheng, Y.-T. Wu, "An Active-Clamp Forward Inverter Featuring Soft Switching and Electrical Isolation", Applied Science, Vol. 10, No. 12, 2020.

[28] D. L. Caiza, S. Kouro, F. Flores-Bahamonde, R. Hernandez, "Unfolding PV Microinverter Current Control: Rectified Sinusoidal vs Sinusoidal Reference Waveform", 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018.

زیر نویس ها

1. Uncertainty
2. Maximum Power Point Tracking
3. Perturb and Disturb
4. Incremental conductance
5. Chattering
6. Matched
7. Interleaved
8. Flyback Converter
9. Forward Converter
10. Current Unfolding Method
11. Hall effect sensor
12. Discovery board

[7] M. Masoom, N. Kumar, A. R. Kulkarni, "MPPT Based Grid Connected Photovoltaic System Using Flyback Converter", IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON) Bengaluru, India. Nov 6-8, 2020.

[8] S. Ahmadzadeh, G. Arab, "Incremental Conductance Based MPPT Using A High Step-Up V-Source DC-DC Converter", IEE Conference, Mashhad, Iran, 2017.

[9] B. Guo., M. Su, Y. Sun, H. Wang, B. Liu, X. Zhang, J. Pou, Y. Yang, P. Davari, "Optimization Design and Control of Single-Stage Single-Phase PV Inverters for MPPT Improvement", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 12, 2020.

[10] E. Kabalcı, "Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods Solar Energy", International Solar Energy Society, Vol. 198, No. 1, 2020.

[11] S. M. Ahmadi, N. Abjadi, S. V. Mirmoghtadaci, E. Adib, "Dynamic Analysis of the Forward-Flyback Converter Considering the ESR of the Output Capacitor and Comparing it with the Flyback Converter", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 21, No. 2, 2024.

[12] A. Boyar, E. Kabalcı, "Two-Stage Flyback Micro Inverter for Solar Power Conversion", Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2020), October 20-23, 2020.

[13] M. El Malah, A. Barazzouk, M. Guisser, E. Abdelmounim, M. Madark, "Backstepping Control for Three Phase Single Stage Grid Connected PV System with Improved Power Quality", 2018 International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), 2018.

[14] N. K. Sakthivel, S. Sutha, "Single Stage Grid-Connected Flyback Inverter with Optimal PID Controller for Harmonic Distortion Analysis", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 18, 2023.

[15] L. Zhang, L. Feng, Y. Xing, X. Ma, "A Single-stage Forward Inverter with High Frequency Isolation for Grid-connected Application", 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009.

[16] H. Hasabelrasul, Z. Cai, L. Sun, X. Suo, I. Matraji, "Two-Stage Converter Standalone PV-Battery System Based on VSG Control", IEEE Access, Vol. 10, 2022.

[17] G. R. Kavathekar, M. D. Patil, "Interleaved high power improved two-stage flyback inverter for photovoltaic application", Journal of Physics: Conference Series, 2020.

[18] R. A. Khan, H.-D. Liu, C.-H. Lin, S.-D. Lu, S.-J. Yang, A. Sarwar, "A Novel High-Voltage Gain Step-Up DC-DC Converter with Maximum Power Point Tracker for Solar Photovoltaic Systems", Processes, Vol. 11, No. 4, 2023.

[19] O. Abdel-Rahim, H. Wang, "A New High Gain DC-DC Converter With Model-Predictive Control Based MPPT Technique for Photovoltaic Systems", CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, Vol. 5, No.2, 2020.

[20] R. Za'im, J. Jamaludin, N. A. Rahim, "Mathematical Model of Grid Connected Flyback Inverter in the Time Discrete Domain", 5th IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT2018), 2018.

[21] R. Za'im, J. Jamaludin, Y. Yusof, N. A. Rahim, "High Step-Up Flyback with Low-Overshoot Voltage Stress on Secondary GaN Rectifier", Energies, Vol. 15, No. 14, 2022.

[22] M. Ahmed, X. Yap, L. Huawu, L. Hang, G. Li, H. Haibing, "Two-Stage Single-Phase Photovoltaic Grid-Tied Micro-Inverter Using Soft-Switching Techniques", 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016.

[23] M. Salimi, M. Hamed, "Adaptive Nonlinear Control of the Flyback Switch Mode Power Supplies", IEEE International