



Control of Three-Phase Grid-Tied PV Inverters using Sliding Mode Technique

Mohammad Reza Ghodsi¹ | Farhad Barati^{2*} | Majid Jamil³

1. Division of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran. Email: fabaratisoe@gmail.com

2. Corresponding Author, Division of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran. Email: f.barati@merc.ac.ir

3. Division of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran. Email: m_limaj@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 27 July 2025

Accepted: 25 November 2025

Published Online: 28 May 2026

Keywords:

Three-Phase Grid-Tied Inverters,
PV,
Sliding Mode Control,
Maximum Power Point Tracking
Algorithm.

ABSTRACT

Three-phase grid-tied inverters are the key technology for integrating renewable sources into the utility grid. They interact with the renewable source which has a variable nature from one side and with the utility grid which is non-ideal in most cases from the other side. So, they must be equipped with a robust control system. In this paper, a sliding mode controller is proposed as a robust nonlinear control technique for three-phase grid-tied inverters. It is employed for the purpose of regulations of the three-phase injected currents to grid. The main function of the control system of a three-phase grid-tied PV inverter is, however, to extract the maximum possible power from the PV and inject it to the utility grid. For this purpose, the control system is equipped with a maximum power point tracking algorithm for obtaining the voltage of the maximum power point at any weather conditions. The obtained voltage is employed as the reference value for the DC link voltage. We employ an appropriate maximum power point tracking algorithm in this paper. For the unity power factor at the point of common couplings, a variable power extracted from the PV results in varying the amplitudes of injected currents to grid accordingly. The proposed sliding mode controller, by regulating the injected currents to grid at their appropriate reference values, makes the injection of maximum extractable power from the PV to the utility grid possible. The performance of the proposed approach is validated using a detailed switching model developed for the three-phase grid-tied PV inverter in MATLAB/Simulink environment.

Cite this article: Ghodsi, M. R.; Barati, F. & Jamil, M. (2026). Control of Three-Phase Grid-Tied PV Inverters using Sliding Mode Technique. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 201-217. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396999.1162>



© Mohammad Reza Ghodsi, Farhad Barati, Majid Jamil **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396999.1162>

Introduction

In this paper, a Sliding Mode Controller (SMC) is designed for a three-phase grid-tied PhotoVoltaic (PV) inverter using a hysteresis modulator. The controller is implemented and validated through simulations using a detailed switching PV inverter model developed in MATLAB/Simulink. The proposed method leverages the key advantages of hysteresis modulation, such as implementation simplicity and low computational complexity. To address the issue of oscillations around the sliding surface, the hysteresis width is carefully selected. It is important to note that an excessively narrow hysteresis width results in undesirably high switching frequencies, while a wider width increases the magnitude of oscillations around the sliding surface. This paper presents a systematic approach to determining the optimal hysteresis width for a three-phase grid-connected PV inverter which provides a balance between the switching frequency and magnitude of oscillations.

Methodology

In this study, a control system for a three-phase grid-connected PV inverter is proposed which is based on the sliding mode technique. The overall control structure is illustrated in Figure 4. As shown, the system consists of an outer loop for regulating the DC-link voltage and three inner loops dedicated to controlling the currents injected to the grid. In the outer voltage control loop, to ensure the maximum power extraction under varying weather conditions, the DC-link reference voltage is set to the maximum power point's voltage (V_{mpp}) of the PV array. The sliding mode controller is employed in the inner current control loops to regulate the injected currents into the grid. The control structure is identical across all three phases. In Figure 4, the inverse Park transformation (also known as the 2-to-3 transformation) is used to convert the dq-axes currents (I_d , I_q) into the corresponding three-phase reference currents. The transformation angle, θ_g , derived from a Phase-Locked Loop (PLL), represents the grid's voltage vector angle [21]. Figure 5 illustrates the stationary ($\alpha\beta$) and synchronous (dq) reference frames along with the grid's voltage and current vectors. As shown, by setting $I_q = 0$, the injected current vector is aligned with the grid's voltage vector. This condition corresponds to the unity power factor operation at the the Point of Common Couplings (PCC), meaning that no reactive power is exchanged with the grid.

Discussions and Conclusion

In Figure (6-a), the solar irradiance is deliberately varied over short time intervals, ranging from 1200 W/m² to zero. It should be noted that the Standard Test Conditions (STC) for the PV panels are defined as the 1000 W/m² irradiance and the cell temperature of 25°C. In this study, the cell temperature is maintained constant at 25°C. As depicted in Figure (6-b), the maximum power point's voltage (V_{mpp}) of the PV panels changes according to the irradiance levels. The DC link voltage successfully tracks V_{mpp} with high accuracy which is demonstrating the controller's effectiveness. Interestingly, despite significant fluctuations in the irradiance, the V_{mpp} exhibits only minor variations, a characteristic inherent to the PV panels behavior. The results confirm that the SMC ensures robust closed-loop stability, offers a relatively straightforward design, and imposes low computational burden. Compared to an LQG controller, as a robust linear controller, which involves a complex design process and intensive computations, the SMC stands out for its practical implementation advantages. However, it must be acknowledged that the variable switching frequency, inherent in SMC with hysteresis modulation, represents a challenge and requires careful design considerations. In this study, the controller's performance is validated under ideal three-phase grid conditions. However, the real-world grids often exhibit non-idealities, such as voltage un-balance, frequency deviations, and phase-jumpings. Evaluating the controller's performance under non-ideal grid conditions remains an important future direction for this research.



کنترل اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه با استفاده از تکنیک مد لغزشی

محمد رضا قدسی^۱ | فرهاد براتی^{۲*} | مجید جمیل^۳۱. پژوهشکده انرژی - پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج - ایران. رایانامه: fabaratisoe@gmail.com۲. نویسنده مسئول، پژوهشکده انرژی - پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج - ایران. رایانامه: f.barati@merc.ac.ir۳. پژوهشکده انرژی - پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج - ایران. رایانامه: m_limaj@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

اینورتر سه فاز متصل به شبکه،

منبع فتوولتائیک،

کنترل کننده مد لغزشی،

الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان.

اینورتر سه فاز متصل به شبکه، واسط میان مولدهای برق تجدیدپذیر و شبکه سراسری است. این مبدل از یک سو با مولد برق تجدیدپذیر در ارتباط است و تغییرات در آن سمت را تجربه می‌کند و از سمت دیگر، با شبکه سراسری برق در ارتباط است و شرایط غیر ایده‌آل در سمت شبکه را تجربه می‌کند. بر این اساس، اینورتر سه فاز متصل به شبکه باید به یک سیستم کنترل مقاوم مجهز باشد. در این مقاله، یک کنترل کننده مد لغزشی برای اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه به عنوان یک کنترل کننده مقاوم غیر خطی ارائه می‌شود. کنترل کننده مد لغزشی در اینجا با هدف تنظیم جریان‌های سه فاز تزریقی به شبکه به کار گرفته می‌شود. هدف کلی‌تر در سیستم کنترل اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه پیشنهادی، استحصال حداکثر توان قابل تأمین از منبع فتوولتائیک و تزریق آن به شبکه برق سراسری است. به این منظور، در آن از الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان مناسب برای یافتن ولتاژ نقطه حداکثر توان بهره گرفته شده است که این ولتاژ به عنوان ولتاژ مرجع لینک DC اینورتر در نظر گرفته می‌شود. به ازای ضریب توان «واحد» در سمت شبکه، تغییرات توان تولیدی منبع فتوولتائیک، به معنای تغییرات در دامنه جریان تزریقی به شبکه است. بنابراین، کنترل کننده مد لغزشی با تنظیم جریان‌های تزریقی به شبکه در مقادیر مرجع آن‌ها، تزریق حداکثر توان قابل استحصال از منبع فتوولتائیک به شبکه سراسری برق را ممکن می‌سازد. در این مقاله، پس از طراحی کنترل کننده مد لغزشی، عملکرد آن توسط مدل سوئیچینگ دقیقی که در نرم‌افزار MATLAB/Simulink برای اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه ایجاد شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

استناد: قدسی، محمد رضا؛ براتی، فرهاد و جمیل، مجید (۱۴۰۵). کنترل اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه با استفاده از تکنیک مد لغزشی. فصلنامه سیستم‌های

انرژی پایدار، ۵ (۲) ۲۰۱-۲۱۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396999.1162>

۱. مقدمه

در جهان امروز، استفاده از مولدهای برق تجدیدپذیر به دلیل مزایای فراوان آن‌ها بسیار رایج شده است. به عنوان نمونه، یکی از چالش‌های بخش کشاورزی، تأمین آب برای مکان‌های دور از شبکه برق سراسری است. به منظور یافتن راه حل اساسی برای این مشکل می‌توان از ریزشبه‌های تجدیدپذیر شامل فتوولتائیک، برق بادی و ذخیره‌سازها استفاده کرد. در ریزشبه‌های تجدیدپذیر، از ترکیب توان تولیدی مولدهای برق تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها توان مورد نیاز بار تأمین می‌شود. به این ترتیب، برای یک منطقه مشخص، می‌توان از پتانسیل‌های برق خورشیدی و برق بادی منطقه به شکل توأمان بهره گرفت [۱ و ۲].

در کشور ایران، بین همه انواع مولدهای برق تجدیدپذیر، بالاترین پتانسیل به برق خورشیدی اختصاص دارد. این موضوع به این دلیل است که بخش وسیعی از کشور ایران طی سال، روزها و ساعت‌های آفتابی فراوانی دارد. بنابراین، استفاده مؤثر از این پتانسیل می‌تواند به تأمین برق پایدار توسط شبکه برق سراسری منجر شود. به علاوه، با کاهش نیاز به استفاده از منابع فسیلی، به حفظ منابع و نگهداشت مناسب محیط زیست کمک شایانی می‌شود [۳ و ۴].

به منظور استحصال بیشترین توان از پنل‌های خورشیدی، باید پنل‌ها در نقطه حداکثر توان قرار گیرند. مختصات نقطه حداکثر توان در صفحه V-I شامل ولتاژ و جریان نقطه حداکثر توان است. بنابراین، چنانچه ولتاژ یا جریان خروجی پنل در مقادیر متناظر با نقطه حداکثر توان قرار گیرد، بیشترین توان از پنل استحصال می‌شود. این کار با به‌کارگیری مبدل‌های الکترونیک قدرت امکان‌پذیر است. شایان یادآوری است که نقطه حداکثر توان، با تغییر میزان تابش خورشید و همچنین، دمای سلول تغییر می‌کند. بنابراین، با کمک الگوریتم‌هایی نقطه حداکثر توان، پیوسته ردیابی می‌شود. به این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان^۱ گویند [۵ و ۶].

برق تولیدی پنل‌های خورشیدی به شکل DC یا جریان مستقیم است و در صورت لزوم به برق AC یا جریان متناوب تبدیل می‌شود. به این منظور نیاز به به‌کارگیری مبدل الکترونیک قدرت از نوع DC به AC وجود دارد که اینورتر نامیده می‌شود. اینورترها برای دو وضعیت منفصل از شبکه برق سراسری و متصل به شبکه برق سراسری طراحی و ساخته می‌شوند. در حالت دوم، هدف تزریق توان تولیدی پنل‌های خورشیدی به شبکه برق AC تک‌فاز یا سه‌فاز است. اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه به منظور داشتن عملکرد صحیح باید به یک سیستم کنترل حلقه بسته با کارایی بالا مجهز باشد. سیستم کنترل حلقه بسته باید علاوه بر پایداری مقاوم، دارای شاخص‌های عملکردی مطلوب در دنبال کردن ورودی (های) مرجع و تضعیف اثرات اغتشاشات واردشده ناشی از تغییرات شرایط آب‌وهوایی یا تغییرات در شبکه برق سراسری باشد [۷ و ۸].

به منظور اتصال اینورتر سه‌فاز به شبکه برق سراسری لازم است از فیلترهای مناسب استفاده شود، چرا که ولتاژهای تولیدی توسط اینورتر از نوع سوئیچینگ بوده در حالی که ولتاژهای شبکه، در حالت ایده‌آل، سینوسی خالص هستند. از جمله انواع فیلترهای قابل استفاده در اینورترهای متصل به شبکه عبارت‌اند از: فیلترهای L، LC و LCL. فیلتر L با مرتبه اول هر چند پایین‌ترین مرتبه را دارد، ولی ابعاد سلف مورد نیاز برای فیلتر در آن بزرگ خواهد بود. این در حالی است که فیلتر LCL با مرتبه سوم به عناصر ذخیره‌ساز (شامل سلف‌ها و خازن) کوچکی نیاز دارد. از این‌روست که فیلتر LCL متداول‌ترین نوع فیلتر مورد استفاده در اینورترهای متصل به شبکه است [۹ و ۱۰].

به منظور کنترل اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه از تکنیک‌های کنترل خطی مختلفی بهره جسته می‌شود. از آنجا که اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه، از دیدگاه کنترلی، یک سیستم دو ورودی - دو خروجی است، بهتر است در طراحی کنترل‌کننده‌های آن از روش‌های تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های چندمتغیره بهره جسته شود [۱۱]. در پژوهش مظاهری و همکاران (۲۰۲۳) یک کنترل‌کننده چندمتغیره LQG برای اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه طراحی و پیاده‌سازی شده است. کنترل‌کننده چندمتغیره LQG با وجودی که از نظر فراهم آوردن پایداری مقاوم برای سیستم کنترل حلقه بسته و شاخص‌های عملکردی همچون دنبال کردن

1. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

ورودی‌های مرجع و تضعیف اثرات اغتشاشات از جمله بهترین کنترل‌کننده‌های خطی به شمار می‌رود، ولی علاوه بر پیچیدگی‌های طراحی، نیاز به حجم محاسبات بالا در پیاده‌سازی دارد.

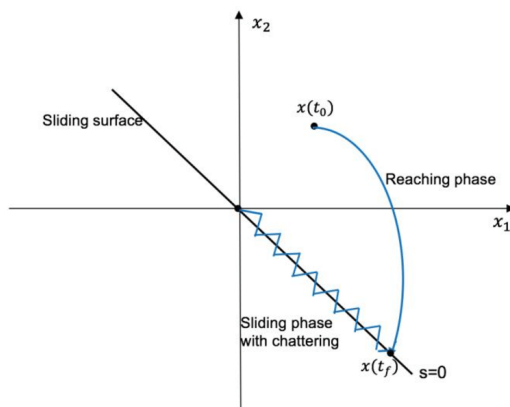
در طرف مقابل کنترل‌کننده‌های خطی، کنترل‌کننده‌های غیر خطی قرار دارند. تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های غیر خطی نیازمند روش‌های مخصوص به خود است. به بیان دیگر، روش‌های تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های خطی در اینجا قابل استفاده نیستند. از جمله مهم‌ترین ابزارها در تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های غیر خطی، نظریه پایداری لیاپانوف است [۱۳ و ۱۴]. در میان انواع کنترل‌کننده‌های غیرخطی، کنترل‌کننده مد لغزشی کنترل‌کننده‌ای است مقاوم و پیاده‌سازی آن به‌سادگی امکان‌پذیر است. بر این اساس، این کنترل‌کننده بر کنترل‌کننده مقاوم خطی LQG برتری دارد. درخور یادآوری است که یک کنترل‌کننده مقاوم، با وجود تغییرات در پارامترهای سیستم تحت کنترل، پایداری سیستم کنترل حلقه بسته را تضمین می‌کند. کنترل‌کننده مد لغزشی به دلیل آنکه خروجی آن، ماهیت روشن/خاموش دارد، برای به‌کارگیری در مبدل‌های الکترونیک قدرت مناسب است [۱۵ و ۱۶].

در به‌کارگیری کنترل‌کننده مد لغزشی برای مبدل‌های الکترونیک قدرت، در حالت کلی، دو نوع مدولاتور شامل هیستریزس و پهنا پالس قابل استفاده هستند. مدولاتور هیستریزس ساختاری ساده دارد، ولی فرکانس سوئیچینگ متغیری برای مبدل الکترونیک قدرت ایجاد می‌کند. ضمن آنکه با به‌کارگیری مدولاتور هیستریزس، در حالت کار ماندگار مبدل، با پدیده نوسانات حول سطح لغزش مواجهیم. این در حالی است که با به‌کارگیری مدولاتور پهنا پالس، فرکانس سوئیچینگ مبدل الکترونیک قدرت ثابت است، هر چند که پیاده‌سازی آن پیچیده‌تر است و به حجم محاسبات بالاتری نیاز دارد.

در پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۰) کنترل‌کننده مد لغزشی با استفاده از مدولاتور پهنا پالس برای اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه پیاده‌سازی شده است. به علاوه، در پژوهش راجاکومار و همکاران (۲۰۲۰) برای کنترل یک اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه از کنترل‌کننده مد لغزشی با به‌کارگیری مدولاتورهای مختلف شامل هیستریزس و پهنا پالس بهره‌جسته شده است. در پژوهش‌های چی‌بی و همکاران (۲۰۱۸) و رایان و همکاران (۲۰۱۹) از کنترل‌کننده مد لغزشی به‌ترتیب برای اینورترهای تک‌فاز و سه‌فاز منفصل از شبکه بهره‌جسته شده است.

در این مقاله، با استفاده از مدولاتور هیستریزس، یک کنترل‌کننده مد لغزشی برای اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه طراحی و سپس با کمک مدل ایجادشده برای اینورتر در نرم‌افزار MATLAB/Simulink به پیاده‌سازی نرم‌افزاری آن پرداخته می‌شود. در واقع، روش در این مقاله، بهره‌مندی از ویژگی‌های مهم مدولاتور هیستریزس است که شامل سادگی و حجم محاسبات کم در پیاده‌سازی می‌شوند. از طرف دیگر، به منظور غلبه بر پدیده نوسانات حول سطح لغزش، پهنا پالس هیستریزس به نحو مناسبی انتخاب شده است. شایان یادآوری است که پهنا پالس خیلی کم برای مدولاتور هیستریزس به فرکانس سوئیچینگ خیلی زیاد منجر می‌شود که نامطلوب است. از طرف دیگر، پهنا پالس هیستریزس خیلی زیاد به دامنه نوسانات زیاد حول سطح لغزش منجر می‌شود. در این مقاله، پهنا پالس مدولاتور هیستریزس برای اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه استخراج می‌شود.

در مقایسه با پژوهش راجاکومار و همکاران (۲۰۲۰) که جامع‌ترین کار مرتبطی است که تا کنون انجام شده، در این مقاله سیستم کنترل حلقه بسته با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی برای کنترل جریان تزریقی به شبکه پیاده‌سازی شده است. شایان یادآوری است که جریان مرجع در اینجا، خروجی حلقه کنترل ولتاژ لینک DC است که محاسبه آن حجم محاسبات بالایی را نمی‌طلبد. به‌علاوه، در اندازه‌گیری جریان تزریقی به شبکه، به دلیل آنکه این جریان به شکل موج ۵۰ هرتز خیلی نزدیک است، نیاز به به‌کارگیری سنسورهای جریان با پهنا پالس باند زیاد وجود ندارد. شایان یادآوری است که در پژوهش راجاکومار و همکاران (۲۰۲۰) سیستم کنترل حلقه بسته برای جریان خروجی اینورتر پیاده‌سازی شده که هارمونیک‌های زیادی دارد و برای اندازه‌گیری آن به به‌کارگیری سنسورهای جریان با پهنا پالس باند زیاد نیاز است. به علاوه، در آنجا به منظور محاسبه جریان مرجع از محاسبات پیچیده بهره‌جسته شده است. این موضوع باعث بالا رفتن حجم محاسبات مورد نیاز در پیاده‌سازی سیستم کنترل خواهد شد.



شکل ۱. نمایش صفحه فاز و سطح لغزش [۱۳]

۲. نظریه مد لغزشی

در این بخش به شرح مفاهیم مرتبط با نظریه مد لغزشی در حالت کلی پرداخته می‌شود. در شکل ۱ صفحه فاز و یک نمونه سطح لغزش برای یک سیستم درجه دوم نشان داده شده‌اند. در صفحه فاز، رفتار حالت‌ها (در اینجا دو حالت x_1 و x_2) بر حسب همدیگر نشان داده می‌شود. سطح لغزش نشان داده شده در اینجا، خطی با شیب منفی است. در واقع، تابع لغزش که با S نشان داده می‌شود، از ترکیب خطی حالت‌ها به دست می‌آید. به عنوان نمونه داریم:

$$S = x_2 + \sigma x_1 \quad (1)$$

در معادله ۱، $\sigma > 0$ و با قرار دادن $S = 0$ سطح لغزش به دست می‌آید.

در کنترل کننده مد لغزشی، هدف آن است که بردار حالت سیستم، در هر جای صفحه فاز که در $t=t_0$ باشد، با اعمال فرمان کنترلی مناسب (فرمان قطع یا وصل) ابتدا به سطح لغزش برسد. به این مرحله، مرحله رسیدن به سطح لغزش گویند. در ادامه با اعمال فرمان‌های کنترلی متوالی مناسب (فرمان‌های قطع و وصل) مسیر بردار حالت روی سطح لغزش می‌لغزد تا به نقطه تعادل که همان مبدأ مختصات است برسیم. به این مرحله، مرحله لغزش گویند. در واقع، مبدأ مختصات یا O نقطه تعادل سیستم است و قرار است سیستم در نهایت در نقطه تعادل خود قرار بگیرد. شایان یادآوری است که ایجاد فرمان‌های قطع و وصل از طریق مدولاتور هیستریزاس انجام می‌شود. مدولاتور هیستریزاس تابعی مطابق رابطه ۲ دارد:

$$u = \begin{cases} 1 & \text{if } S \geq \delta \\ -1 & \text{if } S < -\delta \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه یادشده، δ پهنای تابع هیستریزاس است. همچنین در اینجا $u=1$ معادل با فرمان وصل و $u=-1$ معادل با فرمان قطع است. شایان یادآوری است که به ازای $-\delta \leq S < \delta$ تابع رفتار هیستریزاسی دارد. به بیان دیگر، اگر S از مقادیر بزرگ‌تر از δ وارد این ناحیه شده باشد $u=1$ می‌ماند و اگر S از مقادیر کوچک‌تر از $-\delta$ وارد این ناحیه شده باشد، $u=-1$ باقی خواهد ماند.

در کنترل کننده مد لغزشی، مسیر بردار حالت در صفحه فاز، همان گونه که از شکل ۱ پیداست، دقیقاً روی سطح لغزش قرار نمی‌گیرد، بلکه به دلیل فرمان‌های قطع و وصل متوالی، رفتاری زیگزاگی با فاصله اندک در دو طرف سطح لغزش دارد. فرکانس قطع و وصل و همچنین دامنه نوسانات حول سطح لغزش تابعی از پهنای مدولاتور هیستریزاس به کار گرفته شده است. به بیان دیگر، با افزایش δ فرکانس قطع و وصل کاهش، ولی دامنه نوسانات افزایش پیدا می‌کند. همچنین، با کاهش δ فرکانس قطع و وصل افزایش، ولی دامنه نوسانات کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، در انتخاب پهنای هیستریزاس باید مصالحه‌ای میان دو کمیت فرکانس سوئیچینگ و دامنه نوسانات حول سطح لغزش صورت گیرد [۱۳ و ۱۴].

در یک سیستم کنترل حلقه بسته، اگر بتوان سیگنال خطا و انتگرال آن را حالت‌های سیستم در نظر گرفت، آن‌گاه از ترکیب خطی آن‌ها تابع لغزش ایجاد می‌شود. سپس، با صدور فرمان مناسب قطع یا وصل توسط مدولاتور هیستریزاس، ابتدا می‌توان به

سطح لغزش رسید و در ادامه با اعمال فرمان‌های کنترلی متوالی مناسب (فرمان‌های قطع و وصل) روی سطح لغزش به سمت مبدأ مختصات که معادل با سیگنال خطای برابر با «صفر» است لغزید. شایان یادآوری است که سیگنال خطای برابر با «صفر» به معنای ردیابی ورودی مرجع توسط سیستم کنترل حلقه بسته است. این موضوع، اساس کنترل اینورتر سه فاز متصل به شبکه با استفاده از تکنیک مد لغزشی است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود [۱۸].

۳. اینورتر سه فاز متصل به شبکه

اینورتر سه فاز متصل به شبکه، ابزاری است برای تزریق توان تولیدی مولدهای برق تجدیدپذیر اعم از بادی و خورشیدی به شبکه سراسری برق. این ابزار از یک سو به مولد برق تجدیدپذیر و از سوی دیگر، به شبکه برق سراسری سه فاز متصل می‌شود. به منظور استحصال حداکثر توان از مولد برق تجدیدپذیر در هر شرایط آب‌وهوایی، لازم است سیستم کنترل اینورتر سه فاز متصل به شبکه به الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان مجهز باشد. در شکل ۲ ساختار یک اینورتر خورشیدی سه فاز متصل به شبکه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، اینورتر در سمت DC مستقیم به پنل‌های خورشیدی متصل است و در سمت AC بدون به‌کارگیری ترانسفورماتور قدرت به شبکه برق سراسری متصل است. به علاوه، از فیلتر LCL به عنوان واسط میان اینورتر و شبکه استفاده شده است. در ساختار فیلتر، مقاومت‌هایی سری شده با سلف‌ها نشان داده شده که نشان‌دهنده مقاومت معادل سیم پیچی سلف‌ها است. همچنین، مقاومت سری شده با خازن فیلتر، مقاومت میراکننده است که نقش پایدارسازی فیلتر را به عهده دارد [۹ و ۱۰].

برای اینورتر سه فاز متصل به شبکه نشان داده شده در شکل ۲، مدار معادل تک‌فاز مطابق با شکل ۳ استخراج می‌شود. همان‌گونه که در این شکل پیداست، در یک طرف شبکه و در طرف دیگر منبع ولتاژی که نشان‌دهنده ولتاژ تولیدی توسط اینورتر است قرار دارند. این منبع ولتاژ با مقدار ولتاژ $u \frac{V_{dc}}{2}$ نشان داده شده است که V_{dc} ولتاژ لینک DC اینورتر را نشان می‌دهد. کمیت u دو سطح $u = \pm 1$ را به خود اختصاص می‌دهد. در واقع، اگر سوئیچ بالایی ساق روشن و سوئیچ پایینی ساق خاموش باشد $u = 1$ و اگر سوئیچ بالایی ساق خاموش و سوئیچ پایینی ساق روشن باشد، $u = -1$ خواهد بود. بر اساس مدار معادل شکل ۳ معادلات زیر قابل استخراج هستند. برای استخراج این معادلات از جریان‌های i_1 و i_2 به عنوان جریان‌های حلقه بهره‌جسته شده است. بدیهی است که جریان عبوری از شاخه خازنی حاصل تفاضل این دو جریان یعنی برابر با $(i_1 - i_2)$ است. بر این اساس داریم:

$$\frac{dV_{CF}}{dt} = \frac{1}{C_F} (i_1 - i_2) \quad (3)$$

با به‌کارگیری قانون حلقه در خصوص جریان i_1 خواهیم داشت:

$$R_i i_1 + L_i \frac{di_1}{dt} + R_F (i_1 - i_2) + V_{CF} = u \frac{V_{dc}}{2} \quad (4)$$

این رابطه به شکل رابطه ۵ بازنویسی می‌شود:

$$\frac{di_1}{dt} = \left(\frac{-R_i}{L_i} - \frac{R_F}{L_i} \right) i_1 + \frac{R_F}{L_i} i_2 - \frac{1}{L_i} V_{CF} + u \frac{V_{dc}}{2L_i} \quad (5)$$

به علاوه با به‌کارگیری قانون حلقه در خصوص جریان i_2 خواهیم داشت:

$$R_g i_2 + L_g \left(\frac{di_2}{dt} \right) + R_F (i_2 - i_1) - V_{CF} = -V_g \quad (6)$$

این رابطه به شکل رابطه ۷ بازنویسی می‌شود:

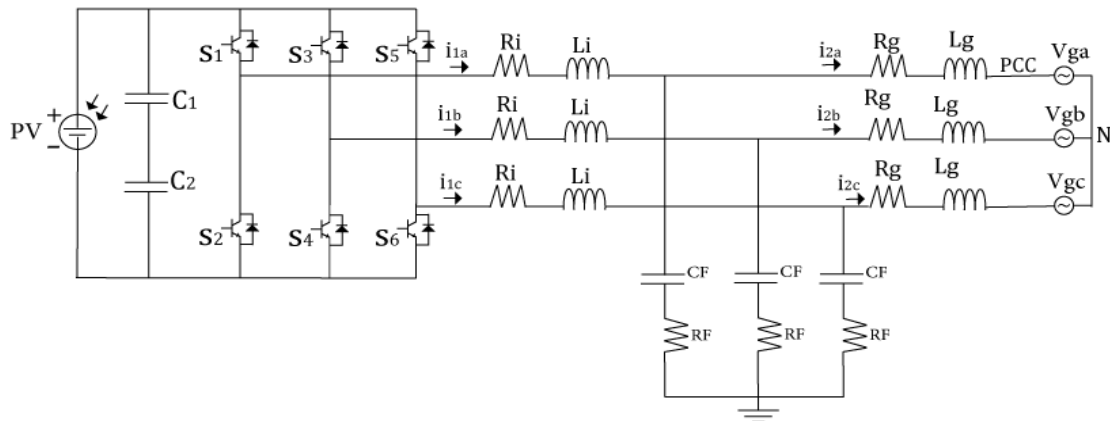
$$\frac{di_2}{dt} = \frac{R_F}{L_g} i_1 - \left(\frac{R_F + R_g}{L_g} \right) i_2 + \frac{1}{L_g} V_{CF} - \frac{1}{L_i} V_g \quad (7)$$

با ترکیب معادلات یادشده، نمایش فضای حالت مدار معادل تک‌فاز اینورتر سه فاز متصل به شبکه به شکل رابطه ۸ استخراج

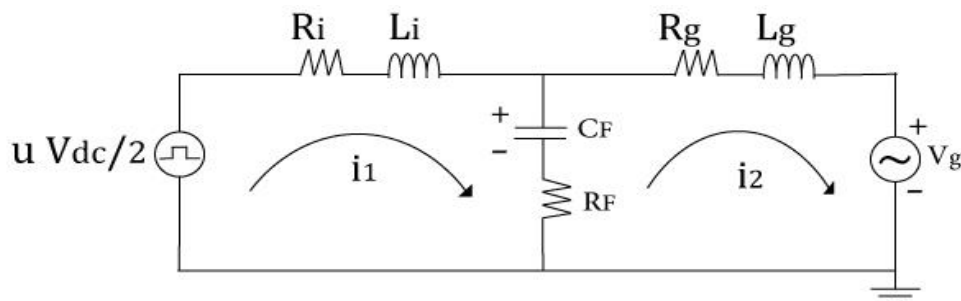
می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \frac{V_{CF}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_i + R_F}{L_i}\right) & \frac{R_F}{L_i} & \frac{-1}{L_i} \\ \frac{R_F}{L_g} & -\left(\frac{R_F + R_g}{L_g}\right) & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_F} & -\frac{1}{C_F} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ V_{CF} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \frac{V_{dc}}{2L_i} \\ -\frac{1}{L_i} V_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدار معادل تک‌فاز اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه یک سیستم مرتبه سوم است که در آن جریان‌های سلف‌ها و ولتاژ خازن حالت‌ها را تشکیل می‌دهند و ولتاژهای شبکه و تولیدی اینورتر ورودی‌های سیستم هستند.



شکل ۲. اینورتر خورشیدی سه‌فاز متصل به شبکه با فیلتر LCL



شکل ۳. مدار معادل تک‌فاز اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه

ولتاژ شبکه به عنوان یکی از ورودی‌های سیستم، از طرف شبکه برق سراسری به اینورتر اعمال می‌شود و تحت کنترل ما نیست. این ولتاژ، که در حالت ایده‌آل سه فاز متعادل است، در اغلب اوقات از حالت ایده‌آل خارج است. از جمله شرایط غیر ایده‌آل قابل رخ دادن در شبکه برق سراسری می‌توان به عدم تعادل، انحراف فرکانس و پرش فاز اشاره کرد. به علاوه، امپدانس شبکه برق سراسری در نقطه اتصال اینورتر به شبکه، مدام در حال تغییر است؛ به این دلیل که در شبکه برق سراسری، خطوط انتقال و توزیع همواره در حال وارد و خارج شدن هستند.

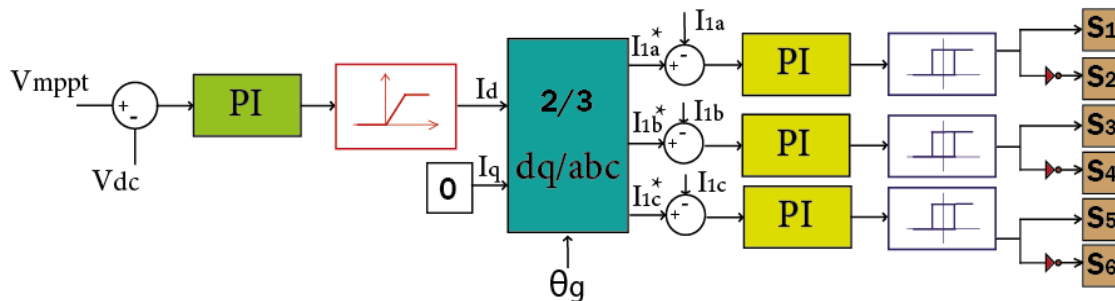
نقطه مقابل ولتاژ شبکه، ولتاژ تولیدی اینورتر قرار دارد. ولتاژ تولیدی اینورتر، همان‌گونه که مشخص است، تابعی از وضعیت سوئیچ‌های ساق است. قطع و وصل سوئیچ‌های ساق‌ها در اینورتر توسط مدولاتور انجام می‌گیرد. مدولاتور بر مبنای سیگنال دریافتی از کنترل‌کننده، تصمیم به قطع و وصل مناسب سوئیچ‌ها می‌گیرد. شایان یادآوری است که در اینورتر منبع ولتاژ

فرمان‌های سوئیچ‌های هر ساق به صورت مکمل همدیگر صادر می‌شود، منتها به منظور جلوگیری از رخ دادن اتصال کوتاه در ساق، صدور فرمان روشن شدن یکی با اندکی تأخیر نسبت به صدور فرمان خاموش شدن دیگری صورت می‌پذیرد که به این فاصله زمانی، زمان مرده^۱ گویند [۱۱ و ۱۲].

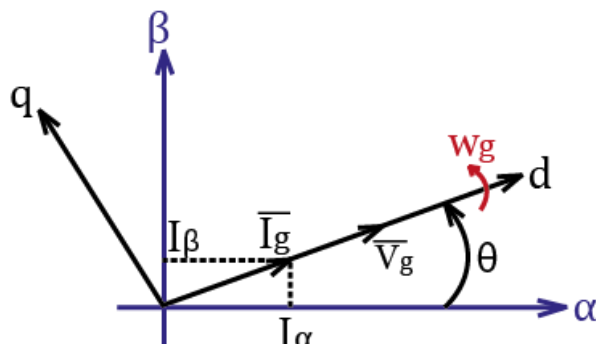
۴. کنترل مد لغزشی اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه

در این بخش، به ارائه سیستم کنترل پیشنهادی برای اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه که مبتنی بر مد لغزشی است پرداخته می‌شود. ساختار پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. این ساختار، همان گونه که پیداست، شامل یک حلقه بیرونی کنترل ولتاژ لینک DC و سه حلقه درونی کنترل جریان‌های سه فاز تزریقی به شبکه است. در حلقه بیرونی، با هدف استحصال حداکثر توان قابل تأمین توسط پنل‌ها در هر شرایط آب‌وهوایی، ولتاژ مرجع لینک DC برابر با ولتاژ نقطه حداکثر توان، V_{mpp} ، قرار داده می‌شود. کنترل کننده مد لغزشی، در ساختار پیشنهادی، به منظور کنترل جریان‌های تزریقی به شبکه به کار گرفته شده است. همان گونه که پیداست، ساختار کنترل کننده مد لغزشی برای فازهای مختلف یکسان است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

در شکل ۴ تبدیل ۲ به ۳ یا به اصطلاح تبدیل معکوس پارک برای تبدیل جریان‌های I_d و I_q ، که در دستگاه مرجع سنکرون هستند، به جریان‌های مرجع سه فاز تزریقی به شبکه به کار رفته است. زاویه به کار رفته در این تبدیل، θ_g ، که توسط حلقه قفل فاز تولید می‌شود زاویه بردار ولتاژ شبکه است [۲۱]. در شکل ۵ دستگاه‌های مرجع ساکن، $\alpha\beta$ ، و سنکرون، dq ، به همراه بردارهای ولتاژ شبکه و جریان تزریقی به شبکه بردار ولتاژ شبکه خواهد شد؛ به این معنا که ضریب توان در نقطه اتصال اینورتر به شبکه برابر با «واحد» و یا معادل آن، توان راکتیو مبادله شده با شبکه برابر با «صفر» است. در واقع با این کار، همه توان ظاهری اینورتر به توان اکتیو اختصاص می‌یابد [۲۲].



شکل ۴. ساختار پیشنهادی برای سیستم کنترل اینورتر فتوولتائیک سه فاز متصل به شبکه مبتنی بر کنترل مد لغزشی



شکل ۵. دستگاه‌های مرجع ساکن و سنکرون به همراه بردارهای ولتاژ شبکه و جریان تزریقی به شبکه

۴-۱. تحلیل و طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی

همان‌گونه که در شکل ۴ پیداست، کنترل‌کننده مد لغزشی پیشنهادی، در واقع، یک کنترل‌کننده PI به همراه تابع هیستریزس است. در ادامه به تحلیل و طراحی کنترل‌کننده فاز a، به عنوان نمونه، پرداخته می‌شود. شایان یادآوری است که این روند به فازهای b و c نیز قابل تعمیم است.

سیگنال خطای حلقه کنترل جریان فاز a به شکل رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$e_a = I_a^* - I_a \quad (9)$$

تابع لغزش S_a مطابق رابطه ۱۰ تعریف می‌شود:

$$S_a = K_1 x_{1a} + K_2 x_{2a} \quad (10)$$

در رابطه یادشده، حالت‌های x_{1a} و x_{2a} به شکل رابطه ۱۱ تعریف می‌شوند:

$$x_{2a} = \int e_a dt \quad \text{و} \quad x_{1a} = e_a \quad (11)$$

همان‌گونه که دیده می‌شود، حالت‌های در نظر گرفته شده در اینجا شامل سیگنال خطا و انتگرال سیگنال خطا هستند. از معادله ۱۰ پیداست که کمیت S_a در واقع خروجی کنترل‌کننده PI در حلقه کنترل جریان فاز است. در این معادله، ضرایب K_1 و K_2 به ترتیب بهره‌های تناسبی و انتگرالی در کنترل‌کننده PI هستند. بدیهی است که با قرار دادن $S_a = 0$ ، سطح لغزش به دست می‌آید.

کمیت S_a محاسبه شده، در ادامه، با به کارگیری تابع هیستریزس برای تولید فرمان‌های قطع و وصل سوئیچ‌های ساق به کار گرفته می‌شود. در واقع، اگر این کمیت اندکی مثبت باشد، سوئیچ بالایی ساق روشن و سوئیچ پایینی ساق خاموش خواهد شد. به علاوه، چنانچه این کمیت اندکی منفی باشد، سوئیچ بالایی ساق خاموش و سوئیچ پایینی ساق روشن خواهد شد. این موضوع، معادل با رابطه ۱۲ است:

$$u_a = \begin{cases} 1 & \text{if } S_a \geq \delta \\ -1 & \text{if } S_a < -\delta \end{cases} \quad (12)$$

بدیهی است که به ازای $-\delta \leq S < \delta$ تابع، رفتار هیستریزیسی دارد. شایان یادآوری است که u_a به کاررفته در نمایش فضای حالت مدار معادل تک‌فاز اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه، از معادله ۱۲ به دست می‌آید. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، در انتخاب δ باید مصالحه‌ای میان فرکانس سوئیچینگ و دامنه نوسانات حول سطح لغزش صورت گیرد. شایان یادآوری است که کنترل‌کننده مد لغزشی، در حالت خاص، اگر $K_1 = 1$ و $K_2 = 0$ باشد به کنترل‌کننده هیستریزس تبدیل می‌شود.

۴-۲. اثبات پایداری

برای اثبات پایداری سیستم‌های کنترل حلقه بسته جریان‌های سه‌فاز تریقی به شبکه که مبتنی بر کنترل‌کننده مد لغزشی است از نظریه پایداری لیاپانوف بهره می‌جویم. به این منظور، به عنوان نمونه، برای فاز a، تابع لیاپانوف را مطابق رابطه ۱۳ تعریف می‌کنیم:

$$V_a = \frac{1}{2} S_a^2 \quad (13)$$

در این رابطه، V تابع لیاپانوف و S تابع لغزش تعریف شده در رابطه ۱۰ است. برای تحقق پایداری نمایی یکنواخت، باید مشتق زمانی تابع لیاپانوف منفی معین باشد. به بیان دیگر، باید داشته باشیم [۱۳]:

$$\dot{V}_a = S_a \dot{S}_a < 0 \quad (14)$$

بر اساس تابع لغزش تعریف شده در رابطه ۱۰، رابطه ۱۵ به شکل ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$\dot{S}_a = K_1 \left(\frac{dI_a^*}{dt} - \frac{dI_a}{dt} \right) + K_2 (I_a^* - I_a) \quad (15)$$

اگر $S_a > 0$ ، برای تحقق شرط (۱۴) باید $\dot{S}_a < 0$ برقرار باشد. مطابق رابطه ۱۲، به ازای $S_a > 0$ خواهیم داشت: $u_a = 1$. همچنین اگر $S_a < 0$ ، برای تحقق شرط (۱۴) باید $\dot{S}_a > 0$ برقرار باشد. مطابق رابطه ۱۲، بازای $S_a < 0$ خواهیم داشت:

$u_a = -1$. شایان یادآوری است که در اینجا به منظور ساده تر شدن اثبات، به جای تابع هیستریزیس، تابع علامت در نظر گرفته شده است.

در اینجا، بدون آنکه بخواهیم وارد روابط پیچیده شویم، به این نکته اکتفا می شود که $S_a > 0$ که نتیجه آن $u_a = -1$ است به معنای وصل شدن سوئیچ بالایی ساق و قطع شدن سوئیچ پایینی ساق است. به بیان دیگر، در مدار معادل اینورتر سه فاز متصل به شبکه، ولتاژ تولیدی اینورتر برابر با $\frac{V_{dc}}{2}$ خواهد بود؛ این به معنای رو به افزایش نهادن جریان سلف سمت شبکه فیلتر و در نتیجه رو به کاهش نهادن سیگنال خطاست. در نتیجه آن، S_a کاهش می یابد که این به معنای $\dot{S}_a < 0$ است. بنابراین در این حالت، شرط $S_a \dot{S}_a < 0$ برآورده می شود.

همچنین، $S_a > 0$ که نتیجه آن $u_a = -1$ است به معنای وصل شدن سوئیچ پایینی ساق و قطع شدن سوئیچ بالایی ساق است. به بیان دیگر، در این حالت، در مدار معادل اینورتر سه فاز متصل به شبکه، ولتاژ تولیدی اینورتر برابر با $-\frac{V_{dc}}{2}$ خواهد بود؛ این به معنای رو به کاهش نهادن جریان سلف سمت شبکه فیلتر و در نتیجه، رو به افزایش نهادن سیگنال خطاست. در نتیجه آن، S_a شروع به افزایش می کند که این به معنای $\dot{S}_a > 0$ است. بنابراین در این حالت نیز، شرط $S_a \dot{S}_a < 0$ برآورده می شود. این موضوع، پایداری سیستم کنترل حلقه بسته جریان های سه فاز تزریقی به شبکه را اثبات می کند.

۵. نتایج شبیه سازی و بحث

با هدف به دست آوردن نتایج دقیق از طراحی های صورت گرفته، مدلی دقیق از اینورتر سه فاز متصل به شبکه در نرم افزار MATLAB/Simulink پیاده سازی شد. در این مدل سوئیچینگ تلاش شده است تا حد امکان پارامترهای یک اینورتر سه فاز متصل به شبکه واقعی لحاظ شوند تا بتوان به نتایج حاصل از شبیه سازی آن اطمینان کرد. در استخراج پارامترهای مربوط به کنترل کننده مد لغزشی از مدل پیاده سازی شده کمک گرفته شد تا به این ترتیب با اطمینان بیشتری بتوان نتایج حاصل از طراحی کنترل کننده را در عمل به کار گرفت. به این روش، طراحی با کمک شبیه سازی^۱ گویند.

در جدول ۱ مقادیر پارامترهای اینورتر سه فاز متصل به شبکه به همراه نتایج حاصل از طراحی کنترل کننده مد لغزشی نشان داده شده اند. در شبیه سازی، علاوه بر کنترل کننده مد لغزشی که به منظور کنترل جریان های سه فاز تزریقی به شبکه به کار می رود، حلقه کنترل ولتاژ لینک DC نیز وجود دارد که مقدار مرجع این حلقه، ولتاژ نقطه حداکثر توان پل ها است. با عملکرد صحیح حلقه کنترل ولتاژ لینک DC، اطمینان می یابیم که همواره و در هر شرایط آب و هوایی قادر هستیم حداکثر توان قابل استحصال از پل ها را دریافت کنیم. بدیهی است که این توان، پس از تبدیل، از طریق اینورتر سه فاز متصل به شبکه به شبکه سه فاز تزریق می شود. طبیعی است که با تغییر توان استحصال شده از پل ها، متناسب با شرایط آب و هوایی، توان تزریق شده به شبکه سه فاز هم تغییر کند. همان گونه از ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل ۴ مشخص است، تزریق توان به شبکه سه فاز قرار است در ضریب توان «واحد» صورت پذیرد. با این کار، همه ظرفیت نامی اینورتر به توان اختصاص می یابد. همچنین، زاویه محاسبه شده توسط حلقه قفل فاز که در سیستم کنترل به کار گرفته شده است، زاویه بردار ولتاژ توالی مثبت شبکه است. به بیان دیگر، در صورت وجود عدم تعادل در شبکه سه فاز که نتیجه آن وجود بردار ولتاژ با توالی منفی است، مینا در سیستم کنترل، زاویه بردار ولتاژ با توالی مثبت است. شایان یادآوری است که هر چند عدم تعادل در شبکه سه فاز اجتناب ناپذیر است، ولی یکی از وظایف بهره برداران شبکه، حفظ تعادل در شبکه سه فاز با وجود عدم تعادل در بارها است. چرا که وجود عدم تعادل در شبکه می تواند عملکرد بارهای سه فاز از جمله بارهای موتوری سه فاز، اینورترهای سه فاز متصل به شبکه و غیره را تحت تأثیر قرار دهد.

جدول ۱. پارامترهای به کاررفته در شبیه‌سازی اینورتر فتوولتائیک سه‌فاز متصل به شبکه

R_i	0.15 Ω
L_i	0.302 mH
R_f	1 Ω
C_f	4.7 μF
R_g	0.135 Ω
L_g	0.202 mH
K_1	10
K_2	0.5
δ	0.1

در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، میزان تابش خورشید بر حسب زمان تغییر داده شده است. در نتیجه آن، نقطه حداکثر توان و همچنین حداکثر توان قابل استحصال از پنل‌ها هم به تناسب آن تغییر می‌کند. طبیعی است که متناسب با توان استحصال شده از پنل‌ها، توان تزریقی به شبکه هم تغییر کند. با به کارگیری الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان، ولتاژ نقطه حداکثر توان در هر شرایط تابشی استخراج می‌شود. به این منظور، دو قید $V_{mpp} \geq 750V$ و $V_{mpp} \leq 1000V$ در نظر گرفته شده است. قید دوم به این دلیل لحاظ شده است که مازول IGBT به کاررفته در اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه واقعی دارای $V_{dc, max} = 1200V$ است. با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان برابر با ۲۰ درصد، ولتاژ لینک DC حداکثر تا ۱۰۰۰ ولت مجاز است بالا برود. طبیعی است که با تغییر شرایط تابشی، ولتاژ نقطه حداکثر توان هم تغییر کند که این ولتاژ باید توسط لینک DC دنبال شود. به این ترتیب، حداکثر توان قابل استحصال در هر شرایط تابشی از پنل‌ها استخراج می‌شود. به منظور مدل‌سازی رفتار پنل‌ها از معادلات ریاضی و مدار معادل‌های متنوعی بهره جسته می‌شود [۲۳ - ۲۵]. در اینجا، به این منظور، از مدل آرایه پنل‌های موجود در نرم‌افزار متلب/سیمولینک استفاده شده است. در این مدل، علاوه بر میزان تابش، دمای سلول هم به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. شایان یادآوری است که به خلاف میزان تابش، با افزایش دمای سلول، توان استحصال شده از پنل‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع، ضرورت خنک داشتن پنل‌ها را مشخص می‌سازد [۲۶].

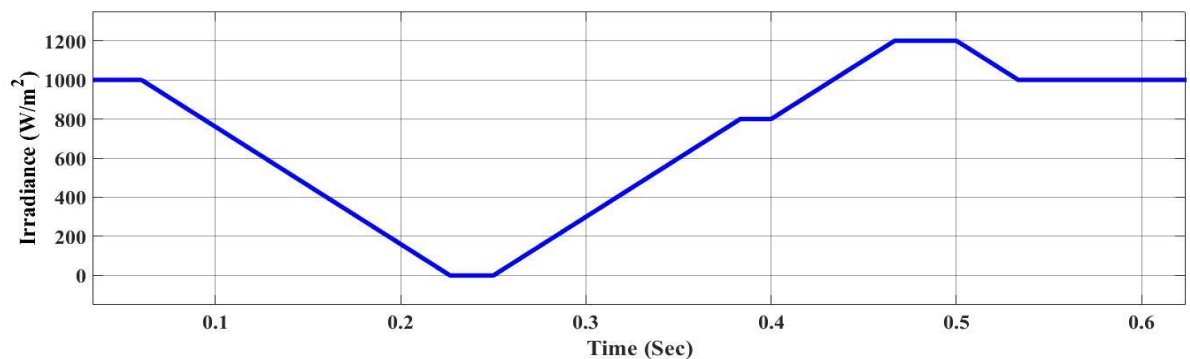
در شکل (۶- الف)، میزان تابش خورشید به دلخواه تغییر داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، میزان تابش، از ۱۲۰۰ وات بر متر مربع تا «صفر» در فواصل زمانی کوتاه تغییر داده شده است. هر چند که شرایط تست استاندارد پنل‌ها، میزان تابش برابر با ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دمای سلول برابر با ۲۵ درجه سلسیوس را تکلیف می‌کند. شایان یادآوری است که در اینجا، همواره، دمای سلول برابر با ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شده است. مطابق با شکل (۶- ب)، متناسب با میزان تابش، ولتاژ نقطه حداکثر توان پنل‌ها تغییر می‌کند. این ولتاژ همان‌گونه که مشخص است، با دقت خوبی، توسط لینک DC دنبال می‌شود. نکته قابل توجه آن است که با وجود تغییرات شدید در میزان تابش، ولتاژ نقطه حداکثر توان تغییرات اندکی دارد.

در شکل (۶- پ)، خروجی کنترل‌کننده حلقه ولتاژ لینک DC که معادل با مؤلفه d بردار جریان مرجع تزریقی به شبکه است نشان داده شده است. از شکل پیداست که متناسب با تغییرات میزان تابش، کمیت I_d هم تغییر می‌کند. در سیستم کنترل پیشنهادی، همان‌گونه که از شکل ۴ پیداست، برای این کمیت دو حد بالا و پایین در نظر گرفته شده است. حد پایین در نظر گرفته شده برای این کمیت «صفر» است، چرا که این کمیت با توان تزریقی به شبکه متناسب است. از آنجا که در اینورتر فتوولتائیک متصل به شبکه توان تزریقی به شبکه همواره بزرگ‌تر یا مساوی با «صفر» است، یا به بیان دیگر توان اکتیو هیچ موقع منفی نیست، پس کمیت I_d هم نمی‌تواند مقدار منفی به خود بگیرد. با اعمال این حد، از شارش معکوس توان یعنی از شبکه به اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه جلوگیری به عمل می‌آید. از طرفی، با «صفر» قرار داده شدن I_d دامنه جریان تزریقی به شبکه برابر با I_d خواهد بود. پس، حد بالای I_d برابر با حداکثر دامنه جریان قابل تزریق به شبکه توسط اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه واقعی است. به بیان دیگر، با اعمال این حد، از اعمال اضافه بار به اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه جلوگیری می‌شود. در شکل (۶- ج) جریان‌های سه‌فاز تزریقی به شبکه نشان داده شده است. همچنین، در شکل (۶- چ) خطای حلقه‌های کنترل جریان که برابر با تفاضل جریان‌های مرجع و جریان‌های واقعی تزریقی به شبکه است نشان داده شده است. واضح است که با تغییر I_d دامنه

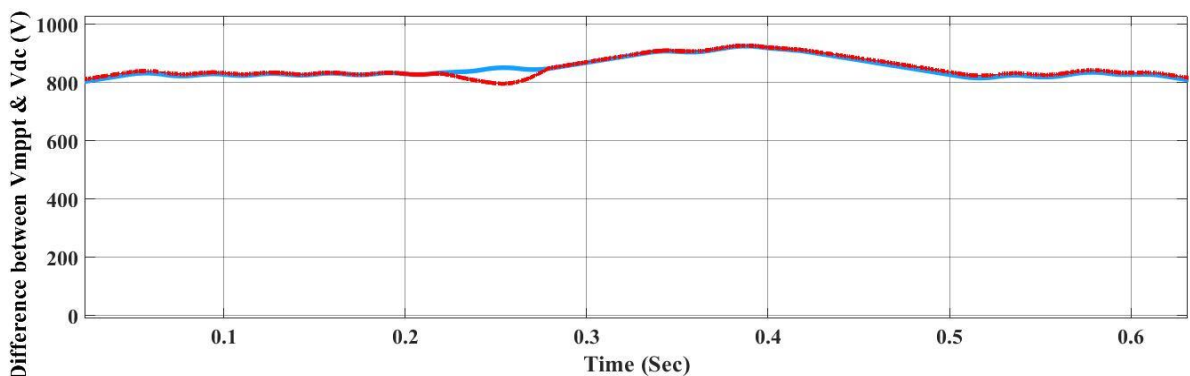
جریان‌های سه فاز تزریقی به شبکه تغییر می‌کند. همان‌گونه که در بخش‌های قبل گفته شد، تابع لغزش از روی سیگنال خطای حلقه کنترل جریان ساخته می‌شود که بر اساس آن، مدولاتور هیستریزس، فرمان‌های قطع و وصل سوئیچ‌های اینورتر را تولید می‌کند. از شکل موج جریان‌ها، متعادل بودن آن‌ها پیداست؛ به این معنا که فرمان‌های ساق‌های اینورتر به شکل متعادل توسط مدولاتور هیستریزس تولید می‌شوند. به خلاف مدولاتور پهنای پالس که با به‌کارگیری آن فرکانس سوئیچینگ اینورتر ثابت است، با به‌کارگیری مدولاتور هیستریزس، فرکانس سوئیچینگ ثابت نیست. باید گفت که فرکانس سوئیچینگ اینورتر سه فاز متصل به شبکه با فرض پارامترهای ثابت برای کنترل‌کننده مد لغزشی و فیلتر، تابعی از امپدانس شبکه در نقطه اتصال اینورتر به شبکه است. در واقع، برای یک شبکه قوی که در آن امپدانس در نقطه اتصال ناچیز است، فرکانس سوئیچینگ بالاتری نسبت به یک شبکه ضعیف به دست می‌آید. به علاوه، با تغییر امپدانس شبکه، فرکانس سوئیچینگ تغییر می‌کند [۲۷].

در شکل (۶-ه)، توان اکتیو تزریقی به شبکه نشان داده شده است. همان‌گونه که پیداست، با تغییر دامنه جریان‌ها، توان اکتیو تزریقی به شبکه هم متناسب با آن تغییر می‌کند. شایان یادآوری است که در ساختار کنترلی پیشنهادی، توان راکتیو مبادله شده میان اینورتر و شبکه همواره برابر با «صفر» است. برای ارزیابی کیفیت جریان تزریقی به شبکه از معیار اعوجاج هارمونیکی کل بهره گرفته می‌شود. مطابق استاندارد، این کمیت برای مولدهای برق تجدیدپذیر متصل به شبکه باید کمتر از ۵ درصد باشد [۲۸] و [۲۹]. بر اساس محاسبات صورت گرفته اعوجاج هارمونیکی کل، برای جریان‌های تزریقی به شبکه، در شبیه‌سازی‌ها همواره کمتر از ۲ درصد است. بنابراین، سیستم کنترل پیشنهادی به‌خوبی شرایط مورد نظر استاندارد را تأمین می‌کند.

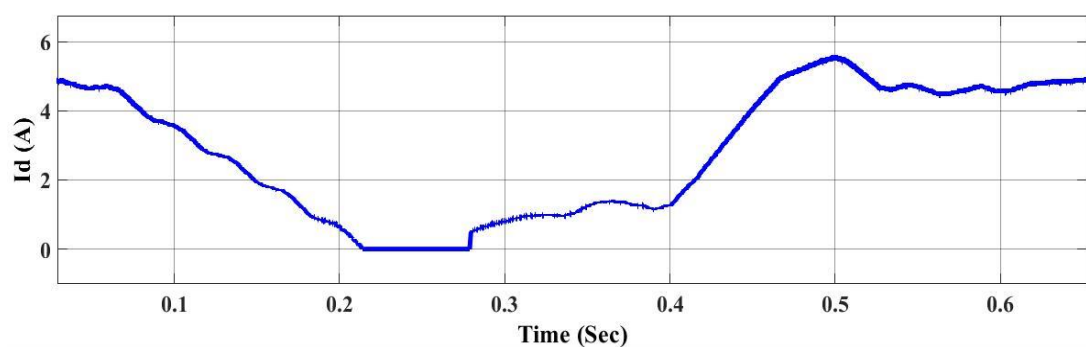
در پژوهش راجاکومار و همکاران (۲۰۲۰) پارامترهای به‌کاررفته برای کنترل‌کننده مد لغزشی عبارت‌اند از: $K_1=1$ و $K_2=0.001$. این در حالی است که پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی استخراج شده در اینجا برابر با $K_1=10$ و $K_2=0.5$ هستند. پارامترهای به‌کاررفته در پژوهش راجاکومار و همکاران (۲۰۲۰) کنترل‌کننده را نزدیک به یک کنترل‌کننده هیستریزس کرده است. این در حالی است که کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده در اینجا واقعاً یک کنترل‌کننده مد لغزشی است.



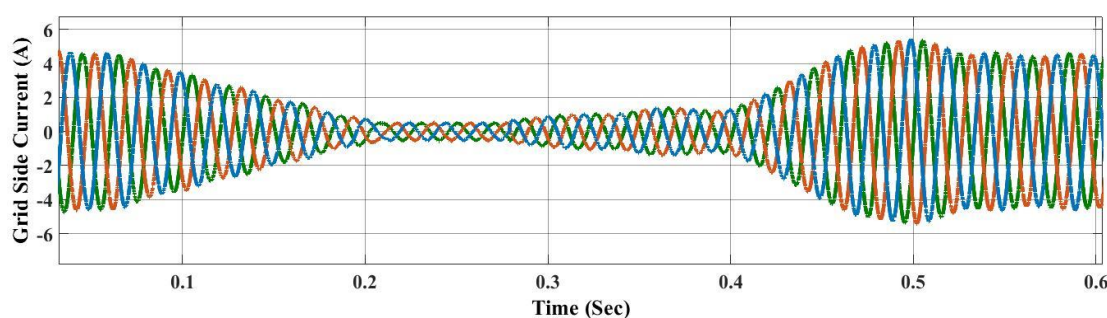
(الف)



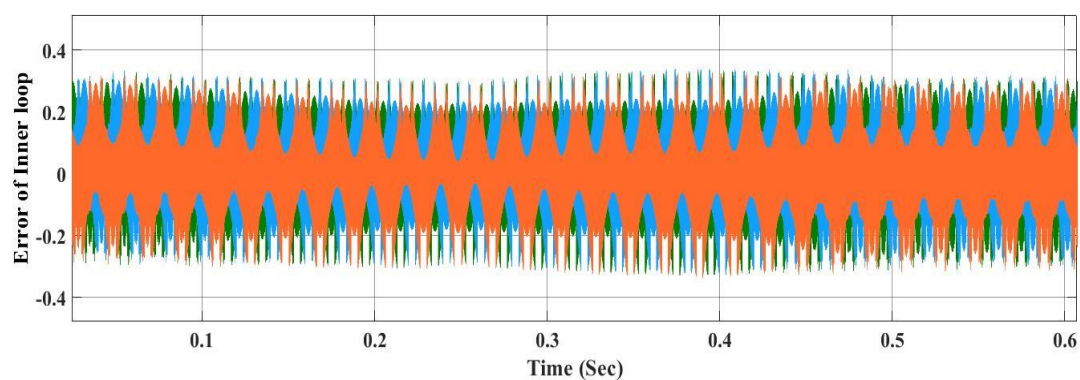
(ب)



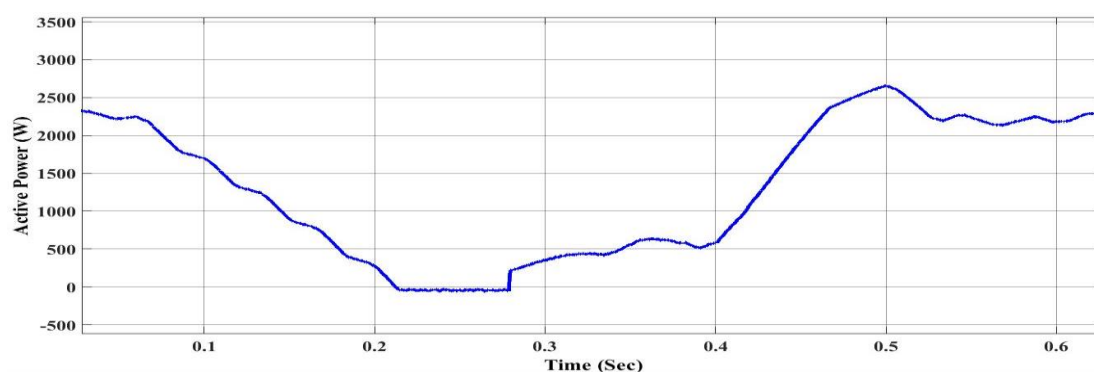
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی عملکرد اینورتر فتوولتائیک سه‌فاز متصل به شبکه به همراه سیستم کنترل حلقه بسته آن (الف) میزان تابش خورشید؛ (ب) ولتاژ نقطه حداکثر توان به همراه ولتاژ لینک DC؛ (پ) جریان I_d ؛ (ج) جریان‌های سه‌فاز تزریقی به شبکه؛ (چ) خطای حلقه‌های کنترل جریان؛ (ه) توان اکتیو تزریقی به شبکه

۶. نتیجه‌گیری و کارهای آتی

در این مقاله، نوعی سیستم کنترل مبتنی بر مد لغزشی برای اینورتر فتوولتائیک سه‌فاز متصل به شبکه ارائه شده است. نشان داده شده است که کنترل‌کننده مد لغزشی ضمن فراهم آوردن پایداری مقاوم برای سیستم کنترل حلقه بسته، دارای روند طراحی نسبتاً ساده است. به علاوه این کنترل‌کننده، به منظور پیاده‌سازی، به حجم محاسبات اندکی نیاز دارد. این در حالی است که، در مقابل، کنترل‌کننده خطی مقاوم LQG روند طراحی پیچیده‌ای دارد و حجم محاسبات مورد نیاز برای پیاده‌سازی آن زیاد است. این موضوع مزیت‌های این کنترل‌کننده غیرخطی را مشخص می‌سازد، هر چند که متغیر بودن فرکانس سوئیچینگ در پیاده‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی یک چالش به حساب می‌آید. در این مقاله، عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی طراحی شده در شرایط ایده‌آل شبکه سه‌فاز مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است. این در حالی است که شبکه سه‌فاز در اغلب اوقات خارج از حالت ایده‌آل است. بنابراین، لازم است عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی طراحی شده در شرایط غیر ایده‌آل شبکه هم مورد ارزیابی قرار گیرد. از جمله شرایط غیر ایده‌آل شبکه سه‌فاز عبارت‌اند از: عدم تعادل، انحراف فرکانس و پرش فاز. این موضوع به عنوان کارهای آتی این تحقیق در نظر گرفته می‌شود.

منابع

- [1] A. Das, H. K. Jani, G. Nagababu, and S. S. Kachhwaha, "A comprehensive review of wind-solar hybrid energy policies in India: Barriers and Recommendations," *Renew. Energy Focus*, vol.35, pp.108-121, 2020.
- [2] N. Omar, A. K. Tiwari, and K. Seethalekshmi, "Design of a novel synchronized transition control and processor in the loop validation with TI C2000 DSP TMS320F28335 for microgrid operations," in *2021 Int. Conf. on Technology and Policy in Energy and Electric Power*, pp. 169–174.
- [3] S. Sarkar, M. S. Bhaskar, K. U. Rao, V. Prema, D. Almakhlles, and U. Subramaniam, "Solar PV network installation standards and cost estimation guidelines for smart cities," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 1277–1287, 2022.
- [4] W. Ali, H. Farooq, A. U. Rehman, Q. Awais, M. Jamil, and A. Noman, "Design considerations of stand-alone solar photovoltaic systems," in *2018 Int. Conf. on Computing, Electronic and Electrical Engineering*, pp. 1–6.
- [5] M. Sarvi and A. Azadian, "A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems," *Energy Syst.*, pp. 1–40, 2021.
- [6] K. Gupta et al., "Effect of various incremental conductance MPPT methods on the charging of battery load feed by solar panel," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 90977–90988, 2021.
- [7] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 47–61, 2015.
- [8] I. Vairavasundaram, V. Varadarajan, P. J. Pavankumar, R. K. Kanagavel, L. Ravi, and S. Vairavasundaram, "A Review on small power rating PV inverter topologies and smart PV inverters," *Electronics*, vol. 10, no. 11, 2021.
- [9] F. Barati, A. Mazaheri, and M. Jamil, "A simulation-aided LCL filter design for grid-interactive three-phase photovoltaic inverters," *J. Sol. Energy Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 229–236, 2019.
- [10] M. Dursun and M. K. DÖŞOĞLU, "LCL filter design for grid connected three-phase inverter," in *2018 Int. Symp. on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, pp. 1–4.
- [11] A. Mazaheri, F. Barati and F. Ghavipankeh, "Multi-variable PI control design for grid-tied three-phase PV inverters," *2019 Iranian Conf. on Renewable Energy & Distributed Generation*, pp. 1-5.
- [12] A. Mazaheri, F. Barati, and F. Ghavipankeh, "Dead-time compensation in three-phase grid-tied inverters using LQG multivariable control," *Scientific Reports*, vol.13, no. 1, 2023.
- [13] H. K. Khalil and J. W. Grizzle, *Nonlinear systems*, Prentice Hall, 2002.
- [14] J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, 1991.
- [15] A. Mehta and B. Naik, *Sliding mode controllers for power electronic converters*, Springer, 2019.
- [16] S.C. Tan, Y.M. Lai, and C.K. Tse, *Sliding mode control of switching power converters: techniques and implementation*. CRC press, 2018.
- [17] H. Li, W. Wu, M. Huang, H. S. Chung, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Design of PWM-SMC controller using linearized model for grid-connected inverter with LCL filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 12, pp. 12773–12786, 2020.
- [18] V. Rajakumar, K. Anbukumar, and I. Selwynraj, "Sliding mode controller-based voltage source inverter for power quality improvement in microgrid," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 11, pp. 1860–1872, 2020.
- [19] Y. Chaibi, M. Salhi, and A. El-Jouni, "Sliding mode controllers for standalone PV systems: modeling and approach of control," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2019, 2019.
- [20] K. Rayane, M. Bougrine, A. Benalia, and K. Guesmi, "Sliding mode control of a three-phase inverter with an output LC filter," in *2018 Int. Conf. on Applied Smart Systems*, pp. 1–4.
- [21] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, and J. L. Kirtley, "A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, clarke, and park," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2070–2083, 2019.
- [22] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*, John Wiley, 2010.

- [23] “PV array block in Simulink”, MathWorks Inc., 2018. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>.
- [24] M. Drif, M. Bahri, and D. Saigaa, “A novel equivalent circuit-based model for photovoltaic sources,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 242, p. 167046, 2021.
- [25] D. Wei, M. Wei, H. Cai, X. Zhang, and L. Chen, “Parameters extraction method of PV model based on key points of IV curve,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 209, p. 112656, 2020.
- [26] A. Babu and P. Pathipooranam, “PV module temperature estimation by using ANFIS,” in *Springer 2020 Soft Computing for Problem Solving*, pp. 311–318.
- [27] M.R. Ghodsi, *Design and simulation of sliding mode controller for three-phase grid-connected inverter* [In Persian], Master's thesis, Materials and Energy Research Center, 2024.
- [28] “IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems,” , 2000.
- [29] “IEEE 1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems,” IEEE Standard, 2003.