

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.6.5>
Research Article

Improving the Efficiency of Floating Photovoltaic System in the Northern Part of Iran Using a Two-stage Multi-String Inverter

Sina Semeskandeh, *PhD Student*, Mehrdad Hojjat, *Assistant Professor*, Mohamad Hosseini-Abardeh, *Assistant Professor*

Department of Electrical and Computer Engineering- Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
s.semeskandeh@iau-shahrood.ac.ir, mehrdad.hojjat@iau-shahrood.ac.ir, mohamad.hosseini@um.ac.ir

Abstract

Floating photovoltaic (FPV) systems are a new approach to the use of water-based photovoltaic (PV) systems. This system creates a new opportunity to increase the production capacity of solar PV systems, especially in the northern regions of Iran, where the price of land is high. To enhance the efficiency of inverters connected to the network of FPV systems in the northern regions of Iran, we have combined the structure of a two-stage and a multi-string inverter in this paper. On the other hand, the perturb and observe (P&O) method is one of the most common methods for maximum power point tracking (MPPT) with a variety of disadvantages including algorithm fluctuations during sudden changes in radiation. Since these sudden changes during radiation occur abundantly in the northern regions of Iran due to cloudy weather, a modified P&O algorithm is proposed by adding a current change parameter to overcome this problem. In fact, the ZETA converter and the proposed algorithm are used in inverter and track the maximum power point and in the second stage, DC to AC conversion occurs. To evaluate the efficiency improvement, the proposed inverter is compared with a single-stage centralized inverter. This study also considered the effect of wind and water temperature on the production capacity of the FPV system. System simulation is performed using Matlab/Simulink software. The simulation results show that the proposed two-stage multi-string inverter produce an average of 18.88 kWh, which is an increase compared to the centralized single-stage inverter.

Keywords: floating, inverter, photovoltaic, power, radiation

Received: 2 May 2022

Revised: 21 June 2022

Accepted: 3 September 2022

Corresponding Author: Dr. Mehrdad Hojjat

Citation: 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, Spring 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.6.5>

مقاله پژوهشی

بهبود بهره‌وری استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک شناور در شمال ایران با استفاده از ساختار اینورتر چند-رشته‌ای دو-مرحله‌ای

سینا سمسکنده، دانشجوی دکتری، مهرداد حجت، استادیار، محمد حسینی-ابرده، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
s.semskandeh@iau.shahrood.ac.ir, mehrdad.hojat@iau-shahrood.ac.ir, mohamad.hosseini@um.ac.ir

چکیده: سیستم‌های فتوولتائیک شناور، رویکردی جدید برای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در آب است. این سیستم، فرصت جدیدی را برای افزایش ظرفیت تولید سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی به ویژه در مناطق شمالی ایران که قیمت زمین زیاد است، ایجاد می‌کند. در این مقاله جهت افزایش بهره‌وری بیشتر از اینورترهای متصل به شبکه سیستم‌های خورشیدی شناور در مناطق شمالی کشور، ساختار اینورتر دو-مرحله‌ای با اینورتر چند-رشته‌ای ترکیب شده است. از طرفی دیگر، روش اغتشاش و مشاهده (P&O) یکی از متداول‌ترین روش‌های ردیابی حداکثر توان (MPPT) است که از معایب این روش می‌توان به نوسانات الگوریتم در طول تغییرات ناگهانی تابش اشاره کرد. از آنجایی که مناطق شمالی ایران به دلیل ابری بودن هوا دارای این تغییرات ناگهانی در طول تابش هستند، جهت غلبه بر این مانع، با اضافه کردن پارامتر تغییر جریان، الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده پیشنهاد گردیده است. در واقع در این ساختار دو-مرحله‌ای مبدل زتا و الگوریتم پیشنهادی اغتشاش و مشاهده جهت افزایش سطح ولتاژ مناسب پنل‌ها جهت روشن بودن اینورتر و ردیابی حداکثر توان استفاده می‌گردد و در مرحله دوم تبدیل توان DC به AC انجام می‌گیرد. جهت بررسی بهبود بهره‌وری، اینورتر پیشنهادی با اینورتر متمرکز تک-مرحله‌ای مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین در این مطالعه اثر باد و دمای آب در میزان تولید سیستم فتوولتائیک شناور در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اینورتر پیشنهادی دو-مرحله‌ای چند-رشته‌ای، ۱۸/۸۸ کیلووات ساعت به‌طور متوسط توان تولید می‌کند که این میزان در مقایسه با اینورتر تک-مرحله‌ای متمرکز افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: اینورتر، تابش، روش اغتشاش و مشاهده، شناور، فتوولتائیک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهرداد حجت

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شاهرود- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تامین انرژی، علاوه بر گرم شدن کره زمین و آلودگی محیط زیست بر سلامت عمومی نیز تاثیر گذار است. تخمین زده می‌شود که هزینه های مستقیم خسارت ناشی از تغییرات آب و هوایی به سلامت انسان‌ها تا چهار میلیارد دلار آمریکا تا سال ۲۰۳۰ در سراسر جهان باشد. مطابق مشاهدات صورت گرفته در ایران، میزان متوسط کل دی‌اکسید کربن ساطع شده در هر کیلووات ساعت هنگام تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی ۷۶۷/۵ گرم بر کیلووات و برای سایر آلاینده‌ها مانند کربن مونواکسید و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب ۰/۷ و ۲/۹ گرم بر کیلووات ساعت بوده است [۱]. مطابق مشاهدات نتیجه گرفته می‌شود که این سطح از آلودگی به‌طور قابل توجه سلامت انسان را به خطر می‌اندازد. از این‌رو، نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید انرژی الکتریکی امری ضروری به شمار می‌رود. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتائیک^۱ به دلیل مزیت‌های منحصر به فرد مانند هزینه نگهداری پایین، بی صدا بودن، طول عمر بیشتر و سازگاری با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. یکی از محدودیت‌های اعمال سیستم‌های فتوولتائیک نیاز به زمین وسیع است. جهت غلبه بر این مانع، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک شناور موثر است. این سیستم یک رویکرد جدید در نصب سیستم‌های فتوولتائیک بر روی آب است. از مزایای این ساختار می‌توان به بهبود عملکرد انرژی به دلیل تاثیر خنک کردن آب، کاهش وجود گرد و غبار نسبت به سیستم‌های فتوولتائیک زمینی، کاهش یا از بین بردن اثر سایه پنل‌ها توسط محیط اطراف، حذف نیاز به آماده‌سازی مانند تسطیح یا گذاشتن پایه و نصب و استقرار آسان از طریق لنگر انداختن اشاره کرد. از طرفی دیگر، با نصب سیستم‌های فتوولتائیک شناور می‌توان تبخیر آب را تا ۷۰ درصد کاهش داد [۲]. در سیستم‌های فتوولتائیک شناور، اینورترها اجزای ضروری هستند که برق DC را به AC تبدیل می‌کند [۳]. در گذشته، جداسازی گالوانیکی در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه عمدتاً از طریق ترانسفورماتورهای فرکانس خط بین سیستم فتوولتائیک و شبکه اجرا می‌شد. از معایب این سیستم‌ها می‌توان به وزن زیاد و اندازه بزرگ ترانسفورماتورها و پیچیدگی سیستم به دلیل چندین مرحله قدرت اشاره کرد [۴]. برای غلبه بر این موانع، اینورترهای بدون ترانسفورماتور معرفی شده‌اند. در مرجع‌های [۵] و [۶]، به بررسی اینورترهای بدون ترانسفورماتور پرداخته شده است. از این مطالعات نتیجه گرفته شده است که در اینورترهای بدون ترانسفورماتور، اجزای سیلیکونی مانند مبدل‌های DC-DC و ICها جایگزین اجزای ترانسفورماتور می‌شوند. از مزایای استفاده از این قطعات می‌توان به افزایش راندمان سیستم، کاهش حجم، کاهش هزینه مصرف مواد معدنی تجدیدناپذیر مانند مس و آهن اشاره کرد [۷]. مبدل‌های DC-DC و روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان می‌توانند نقش مهمی در ساختار اینورترهای دو-مرحله‌ای بدون ترانسفورماتور ایفا کنند. در اینورترهای دو-مرحله‌ای بدون ترانسفورماتور، اغلب از مبدل‌های کلاسیک افزایشنده یا کاهشنده استفاده می‌شود. در مرجع‌های [۸]، [۹] و [۱۰]، به بررسی جامع مبدل‌های DC-DC با هدف کاربرد برای سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته شده است. از این مطالعات نتیجه‌گیری شده است که عیب اصلی مبدل چاک^۲ و سپیک^۳ این است که این مبدل‌ها دارای اجزای واکنش‌پذیر بالا و هزینه ساخت بیشتر نسبت به سایر است. همچنین مبدل‌های افزایشنده، کاهشنده، افزایشنده-کاهشنده دارای راندمان پایین و اجزای ریپل زیاد و مبدل زتا^۴ دارای ریپل ولتاژ خروجی کمی است. افزایش مقدار ریپل در مبدل، سبب افزایش هزینه فیلترگذاری، حجم و وزن سیستم است. از طرفی دیگر، روش‌های اغتشاش و مشاهده^۵ (P&O) و هدایت افزایشی^۶ رایج‌ترین روش‌ها برای ردیابی حداکثر توان^۷ است. در مرجع‌های [۱۱] الی [۱۴] به بررسی و معرفی این دو الگوریتم پرداخته شده است. از این مطالعات نتیجه گرفته شده است که عیب روش P&O، نوسان‌های الگوریتم در طول تغییرهای ناگهانی تابش و عیب اصلی روش هدایت افزایشی عملکرد ضعیف آن در تابش کم است. در مرجع [۱۵]، ردیابی حداکثر توان با استفاده از الگوریتم بهبود یافته منطق فازی و مبدل افزایشنده پیشنهاد شده است. از این مطالعه نتیجه گرفته شده است که عیب اصلی این روش پیچیده بودن روش پیشنهادی است. در مرجع [۱۶]، به مطالعه فنی-اقتصادی احداث نیروگاه فتوولتائیک شناور در چند ناحیه مختلف در ایران، از جمله شمال کشور پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده که با توجه به میزان کم تابش در مناطق شمالی، مقدار توان تولیدی سیستم فتوولتائیک شناور در شمال کشور کمتر از نواحی جنوبی کشور است. عیب اصلی این مطالعه عدم در نظر گرفتن اثر وزش باد در مطالعه است. همچنین در محاسبات توان، از مفهوم راندمان پیک اینورتر استفاده شده که این مفهوم منجر به طراحی ناکارآمد و بررسی

نادرست مطالعات می‌گردد. زیرا با توجه به متفاوت بودن میزان تابش در طول روز، اینورتر تنها برای مدت کمی می‌تواند در این بازه قرار بگیرد. نوآوری در این مقاله در مقایسه با مطالعات قبلی به شرح زیر است که:

جهت افزایش بهره‌وری بیشتر از اینورترهای متصل به شبکه سیستم‌های خورشیدی شناور در مناطق شمالی کشور، ساختار اینورتر دو-مرحله‌ای با اینورتر چند-رشته‌ای ترکیب شده است. همچنین الگوریتم اغتشاش و مشاهده یکی از متداول‌ترین روش‌های ردیابی حداکثر توان در اینورترهای متصل به شبکه است که از معایب این روش می‌توان به نوسانات الگوریتم در طول تغییرات ناگهانی تابش اشاره کرد. در این الگوریتم، در ولتاژهای کمتر از ولتاژ نقطه حداکثر توان، با تغییر در میزان تابش نتیجه محاسبه در توان منفی می‌شود و الگوریتم دچار نوسان می‌گردد. از آنجایی که مناطق شمالی ایران به دلیل ابری بودن هوا دارای این تغییرات ناگهانی در طول تابش هستند، جهت بهبود عملکرد ردیابی حداکثر توان، الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده پیشنهاد گردیده است. در الگوریتم اصلاح شده با اضافه شدن پارامتر تغییر جریان، نوسان‌های الگوریتم در طول تغییرات ناگهانی تابش قابل تشخیص می‌شود. در واقع در این ساختار دو-مرحله‌ای با ترکیب مبدل زتا و الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده سیستم ردیابی نقطه حداکثر توان پیشنهاد می‌گردد. مبدل زتا و الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده جهت افزایش سطح ولتاژ مناسب پنل‌ها جهت روشن بودن اینورتر در ردیابی حداکثر توان استفاده می‌گردد و در مرحله دوم تبدیل توان DC به AC انجام می‌گیرد. از طرفی دیگر، هنگام محاسبه مقدار توان، در مقاله‌های دیگر از مفهوم راندمان پیک (عدد نوشته شده بر روی پلاک اینورتر) استفاده می‌شود. به دلیل متفاوت بودن میزان تابش در طول روز، اینورتر برای مدت کمی می‌تواند در بازه‌ی حداکثر قرار گیرد. تفاوت این مقاله با سایر مقاله‌ها در این است که جهت محاسبه دقیق‌تر توان اینورتر از مفهوم راندمان وزنی اروپایی استفاده شده است. همچنین در این مطالعه جهت محاسبه توان، اثر وزش باد و دمای آب به معادله‌ها سیستم اضافه گردیده است.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. معرفی و ساختار سیستم فتوولتائیک شناور در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ به نحوه پیکربندی اینورترهای متصل به شبکه پرداخته و در بخش ۴ به ساختار اینورتر پیشنهادی دو-مرحله‌ای چند-رشته‌ای پرداخته شده است. در بخش‌های ۵ و ۶ به معرفی راندمان وزنی اروپایی و محاسبه توان و نسبت عملکرد سیستم فتوولتائیک شناور پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری به ترتیب در بخش‌های ۷ و ۸ آمده است.

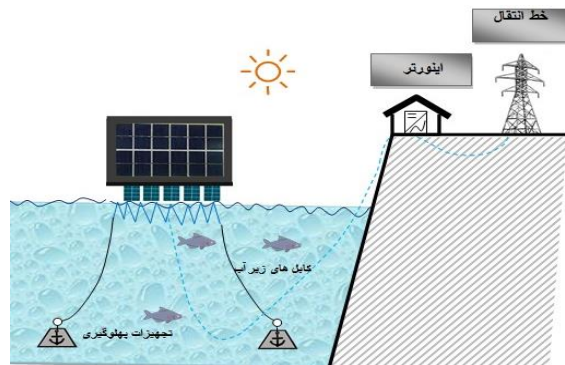
۲- ساختار سیستم فتوولتائیک شناور

همان‌طور که قبلاً بیان گردید، سیستم‌های فتوولتائیک شناور، رویکرد جدیدی در استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در آب است که به دلیل افزایش راندمان و عدم نیاز به زمین در مقایسه با سیستم‌های فتوولتائیک زمینی در حال رشد هستند. در سال ۲۰۰۷ میلادی، اولین نیروگاه فتوولتائیک شناور با ظرفیت ۲۰ کیلووات ساعت در ژاپن ساخته شد. سپس در سال ۲۰۰۸ اولین واحد در مقیاس تجاری با ظرفیت ۱۷۵ کیلووات ساعت در کالیفرنیا احداث شد. از اوایل سال ۲۰۱۳، نیروگاه فتوولتائیک شناور در مقیاس مگاوات در ژاپن و کره جنوبی نصب و اجرا شد. در حالی که چین با بیش از ۹۶۰ مگاوات، بزرگ‌ترین ظرفیت نصب شده را دارد. یک نیروگاه فتوولتائیک شناور را می‌توان بر روی سطوح مختلف آب مانند مخازن آب، سطوح دریاها، دریاچه‌ها و کانال‌های آب راه‌اندازی کرد [۱۷]. طراحی سیستم فتوولتائیک شناور مانند سیستم‌های فتوولتائیک معمولی است که تنها تفاوت عمده آن، اضافه شدن فناوری شناور است. شکل (۱) اجزای اصلی سیستم فتوولتائیک شناور را نشان می‌دهد. این اجزا عبارتند از:

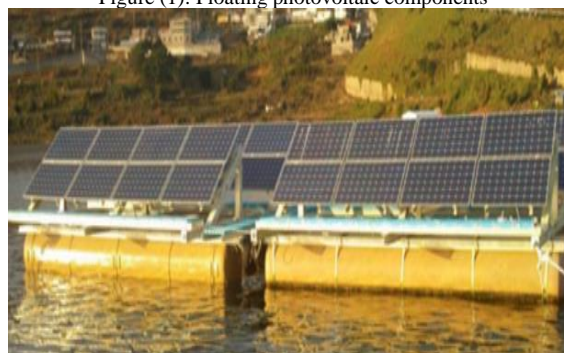
الف- سیستم شناور^۸: سیستم شناور ترکیبی از پایه و شناور است که امکان نصب سلول‌های خورشیدی بر روی سطح آب را فراهم می‌کند. شکل (۲) ساختار شناور را نشان می‌دهد. یک واحد از این شناور شامل یک بخش راهرو و قسمتی که پنل خورشیدی در آن قرار می‌گیرد است.

ب- سیستم نگرگیری^۹ (پهلویی): با استفاده از این سیستم، شناور با حفظ موقعیت خود و جلوگیری از چرخش یا شناور شدن ماژول‌ها، با نوسانات آب تنظیم می‌شود.

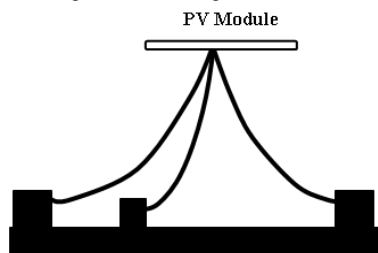
ج- سیستم فتوولتائیک: که شامل پنل‌های خورشیدی، اینورتر و کابل‌ها می‌شود.



شکل (۱): اجزای سیستم فتوولتائیک شناور
 Figure (1): Floating photovoltaic components



شکل (۲): ساختار شناور [۱۸]
 Figure (2): Floating structure [18]



شکل (۳): سیستم پهلوگیری نیروگاه فتوولتائیک شناور
 Figure (3): Floating photovoltaic plant mooring system

۳- پیکربندی اینورترهای متصل به شبکه

در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه، اینورترها نقش اساسی در راندمان سیستم و نحوه پیکربندی سیستم را دارا هستند. جهت اتصال اینورترهای فتوولتائیک به شبکه، چهار پیکربندی متداول وجود دارد که عبارتند از اینورترهای مرکزی، اینورترهای رشته‌ای، اینورترهای چند رشته‌ای و اینورترهای ماژول^۱. شکل (۴) نحوه پیکربندی اینورترها را نشان می‌دهد. در اینورترهای مرکزی، آرایه‌های فتوولتائیک برای دستیابی به ولتاژ بالاتر به صورت سری متصل می‌شوند. راندمان کم، قرار گرفتن در معرض ولتاژ بالا، تلفات عدم تطابق به دلیل خصوصیات فیزیکی مختلف ماژول‌های فتوولتائیک و دیویدهای رشته‌ای مورد استفاده در سیستم از جمله معایب این ساختار است. در اینورترهای رشته‌ای، ماژول‌های فتوولتائیک به صورت سری در سمت DC به یکدیگر متصل می‌شوند و خروجی هر رشته از طریق یک اینورتر کوچک به AC تبدیل می‌شود. اینورترهای چند رشته‌ای ترکیبی از اینورترهای مرکزی و رشته‌ای هستند. در این ساختار چندین رشته پنل فتوولتائیک به مبدل‌های DC-DC متصل می‌شوند تا استخراج حداکثر توان را به طور مستقل انجام دهند. سپس، خروجی‌های کل مبدل DC-DC به عنوان ورودی به یک اینورتر مشترک را تغذیه می‌کند. در این ساختار توسعه سیستم به راحتی توسط یک رشته جدید با مبدل DC-DC انجام می‌گیرد. انعطاف‌پذیری و راندمان بالا از جمله مزایای این ساختار هستند [۱۹]. در اینورترهای ماژول، هر ماژول دارای یک اینورتر کوچک است که به شبکه AC متصل است. از معایب این روش می‌توان به مقدار خروجی کم اینورتر و راندمان پایین اشاره کرد. از لحاظ

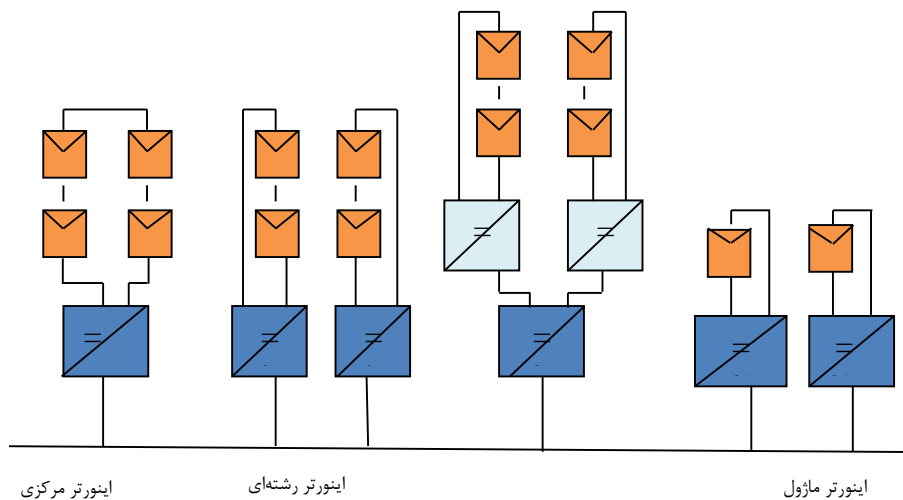
تعداد مرحله‌های پردازش، اینورترها به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: اینورترهای تک-مرحله‌ای و اینورترهای دو-مرحله‌ای. شکل (۵) ساختار اینورترهای دو مرحله‌ای را نشان می‌دهد. مطالعات گذشته بر ساختار اینورترهای تک-مرحله‌ای بوده است، اما مطالعات فعلی و آینده بر اینورترهای دو مرحله‌ای تمرکز دارد [۴]. در ساختار دو مرحله‌ای از یک مبدل DC-DC برای اتصال پنل به اینورتر استفاده می‌شود. مبدل DC-DC حداکثر توان را ردیابی می‌کند و بخش DC-AC تبدیل توان DC به AC را انجام می‌دهد.

۴- ساختار اینورتر پیشنهادی

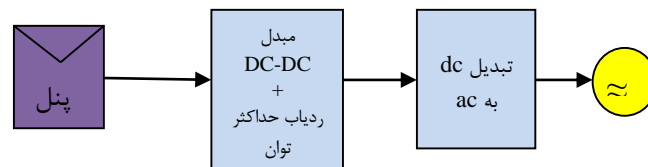
در این مقاله، جهت افزایش راندمان سیستم‌های فتوولتائیک شناور در شمال ایران، اینورتر دو-مرحله‌ای چند رشته‌ای با استفاده از مبدل زتا و الگوریتم بهبود یافته اغتشاش و مشاهده پیشنهاد شده است.

۴-۱- مبدل زتا

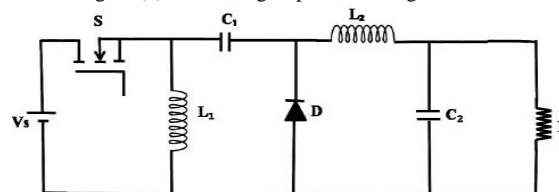
شکل (۶) مدار مبدل زتا را نشان می‌دهد. عملکرد مدار از دو مرحله تشکیل می‌شود. مرحله اول با اتصال ماسفت^{۱۱} و در حالی که دیود خاموش است آغاز می‌شود. در طی این مرحله، جریان از طریق سلف‌های L_1 و L_2 از منبع V_s کشیده می‌شود. مرحله دوم ماسفت خاموش و دیود روشن است. در طی این مرحله تمام انرژی ذخیره شده در L_2 به بار منتقل می‌شود.



شکل (۴): طبقه‌بندی اینورترهای فتوولتائیک
Figure (4): Classification of photovoltaic inverters



شکل (۵) مراحل پردازش اینورترهای دو-مرحله‌ای
Figure (5): Processing steps of two-stage inverters



شکل (۶): مدار مبدل زتا [۱۰]
Figure (6): The circuit diagram of ZETA converter [10]

پارامترهای مبدل زتا از طریق معادلات زیر محاسبه می‌گردد [۲۰]:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \quad (1)$$

$$C1 = \frac{D \times V_{out}}{F_s \times R \times \Delta V_c} \quad (2)$$

$$\Delta I_L = \frac{D \times V_{in}}{F_s \times L} \quad (3)$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{D \times V_{in}}{8 \times F_s^2 \times C2 \times L2} \quad (4)$$

$$L1 = L2 = \frac{D \times V_{in}}{F_s \times \Delta I_L} \quad (5)$$

$$C2 = \frac{D \times V_{in}}{8 \times F_s^2 \times L2 \times \Delta V_c} \quad (6)$$

که پارامتر D سیکل وظیفه، $C1$ و $C2$ مقدار خازن، F_s فرکانس کلیدزنی، $L1$ و $L2$ مقدار سلف، V_{out} مقدار ولتاژ خروجی، V_{in} مقدار ولتاژ ورودی، ΔI_L مقدار ریپل جریان سلف، ΔV_{C2} ریپل ولتاژ خازن دوم هستند.

۲-۴ الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده

الگوریتم اغتشاش و مشاهده به دلیل ساختار ساده، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در سیستم‌های ردیابی حداکثر توان است. این الگوریتم به دو پارامتر ولتاژ و جریان نیاز دارد تا بتواند توان خروجی را محاسبه نماید. عملکرد این الگوریتم مبتنی بر اغتشاش با افزایش اندک در ولتاژ آرایه و مقایسه توان آرایه با سیکل اغتشاش قبلی است. الگوریتم اغتشاش و مشاهده دارای چندین معایب از جمله نوسانات بدون توقف در اطراف نقطه حداکثر توان و انحراف از این نقطه تحت تغییرات تابش خورشیدی است [۲۱]. تفاوت الگوریتم اغتشاش و مشاهده اصلاح شده با الگوریتم متداول در این است که جهت بهبود عملکرد الگوریتم در طول تغییرات تابش، پارامتر تغییر جریان پنل به الگوریتم اضافه شده است. در سیستم‌های فتوولتائیک هر چه میزان تابش بیشتر شود، جریان خروجی پنل بیشتر می‌شود و توان افزایش می‌یابد. در واقع پارامتر تغییر جریان، سبب شناسایی میزان تابش در الگوریتم اصلاح شده است. همچنین اندازه گام با پارامتر تغییر جریان و تفاوت توان جایگزین می‌شود. به عبارت دیگر واگرایی از نقطه حداکثر توان زمانی قابل تشخیص است که تغییر در توان منفی باشد (در ولتاژهای کمتر از ولتاژ نقطه‌ی ماکزیمم توان با تغییر میزان تابش نتیجه محاسبه منفی می‌شود و سیستم دچار اشکال می‌گردد و ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان به درستی صورت نمی‌گیرد). بنابراین چهار حالت جدید برای نشان دادن حالت سطح نوسان اضافه می‌شود. با این حال، زمانی که اختلاف توان و تغییر جریان زیاد باشد، واگرایی از نقطه حداکثر توان قابل تشخیص است و اندازه گام ($\Delta d2$) برای ردیابی افزایش می‌یابد (دو برابر می‌شود) تا سرعت ردیابی افزایش یابد. با این روش تغییرات ناگهانی در هنگام تابش شناسایی می‌شود و در این لحظه با افزایش گام، سرعت ردیابی بیشتر می‌شود و الگوریتم ردیابی حداکثر توان را از دست نمی‌دهد. شکل (۷) الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده را نشان می‌دهد.

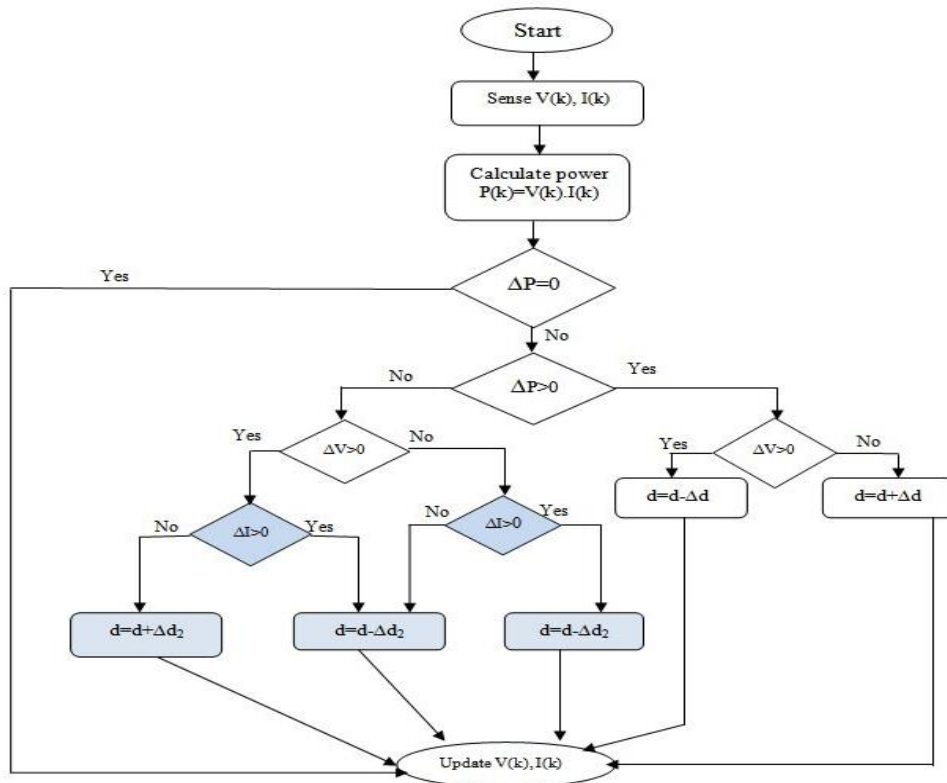
۳-۴ روش کنترلی اینورتر پیشنهادی

در این مقاله به منظور کنترل اینورتر پیشنهادی، یک کنترل‌کننده جریان اتخاذ شده است. حلقه کنترل جریان، جهت تنظیم جریان تزریق شده به شبکه و حفظ ولتاژ فاز شبکه برای دستیابی به ضریب توان واحد استفاده می‌شود. مزیت کنترل‌کننده جریان این است که نسبت به تغییر ولتاژ فاز و اعوجاج شبکه حساسیت کمتری دارد و همچنین دارای پاسخ سریعتری است [۲۲]. شکل (۸) بلوک دیاگرام کنترل اینورتر پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این روش کنترل‌کننده متناسب-انتگرال‌گیر PI (۹۰)

وظیفه محاسبه خطا با استفاده از تفاوت بین جریان خروجی اندازه‌گیری شده اینورتر و جریان مورد نظر تزریق شده به شبکه را دارد تا خطای بین آنها را به حداقل برساند [۳]. تابع کنترل کننده متناسب-انتگرال گیر به صورت زیر بیان می‌گردد:

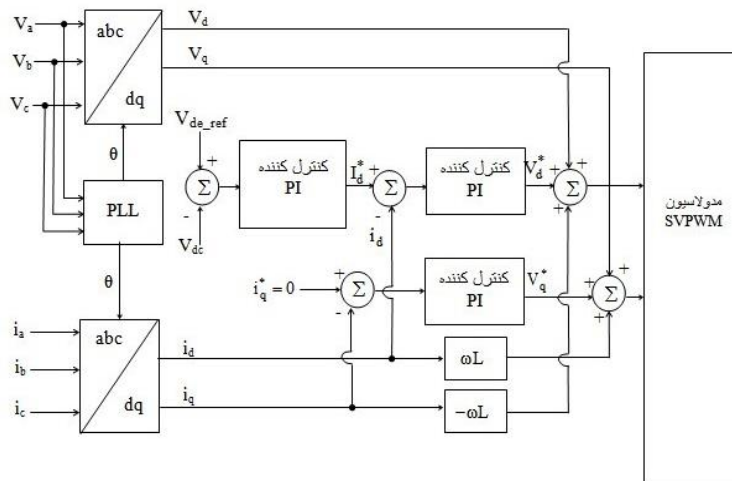
$$U(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) . I(S) \tag{7}$$

که در آن I و U به ترتیب نشان دهنده سیگنال‌های خطای ورودی و خروجی کنترل کننده هستند. همچنین s متغیر لاپلاس است و K_p و K_i دو پارامتر کنترل کننده هستند. مقادیر مناسب کنترل کننده متناسب-انتگرال گیر اغلب با روش آزمایشی-خطایی تنظیم می‌شود [۲۳]. در این روش ابتدا K_i برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و سپس مقدار K_p تنظیم می‌گردد (افزایش می‌یابد) تا خروجی حلقه کنترل با نرخ ثابتی نوسان کند.



شکل (۷): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی اغتشاش و مشاهده

Figure (7): The flowchart of proposed P&O algorithm



شکل (۸): بلوک دیاگرام کنترلی اینورتر پیشنهادی

Figure (8): Proposed inverter control diagram block

هنگامی که پاسخ مناسبی دریافت گردید، مقدار K_i تنظیم می‌گردد به طوری که نوسانات به تدریج کاهش یابد. از طرف دیگر، استخراج زاویه فاز از ولتاژ شبکه امری ضروری است. یک حلقه قفل شده فاز^{۱۳}، زاویه فاز مورد استفاده در تبدیل abc-dq را استخراج می‌کند و به همین ترتیب جریان کنترل شده را با ولتاژ شبکه هماهنگ می‌کند [۲۴].

۵- محاسبه‌ی راندمان اینورتر

راندمان اینورتر مفهوم مهمی در مطالعات استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک است. اختلاف درصد کم در راندمان اینورترهای فتوولتائیک باعث تغییرات قابل توجهی در قیمت آنها می‌شود. برای طراح سیستم فتوولتائیک، راندمان اینورتر مهمترین عامل در تصمیم‌گیری در نحوه پیکربندی سیستم است. این امر به این دلیل است که به ازای هر یک درصد تفاوت در مقدار راندمان، هزینه اینورتر تقریباً ۱۰ درصد متغیر است [۲۵]. در اکثر موارد طراحان فقط به اعداد موجود در پلاک اینورتر اعتماد می‌کنند که این مقدار بیانگر راندمان حداکثر اینورترها است. این رویکرد می‌تواند باعث طراحی ناکارآمد و همچنین بررسی نادرست مطالعات امکان‌سنجی شود، زیرا میزان تابش در طول روز متفاوت است و اینورترها برای مدت کمی می‌توانند در بازه حداکثر راندمان قرار بگیرند. در نتیجه راندمان حداکثر عملکرد واقعی اینورترها را منعکس نمی‌کند. از این جهت، مفهوم راندمان وزنی اروپایی جهت محاسبات دقیق‌تر بیان می‌گردد. میانگین وزنی راندمان اینورتر، یک روش موثر جهت تخمین راندمان اینورترهای خورشیدی است که جهت محاسبه توان تولید نیروگاه خورشیدی استفاده می‌شود. در واقع ضریب وزنی نشان دهنده کسری از زمان برای هر اینورتر است که در یک سطح توان خاص عمل می‌کند. مقدار راندمان وزنی اروپایی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۶]:

$$\text{Efficiency Euro} = 0.03 \times \text{Eff } 5\% + 0.06 \times \text{Eff } 10\% + 0.13 \times \text{Eff } 20\% + 0.1 \times \text{Eff } 30\% + 0.48 \times \text{Eff } 50\% + 0.2 \times \text{Eff } 100\% \quad (8)$$

که در این رابطه Eff 5%, Eff 10%, Eff 20%, Eff 30%, Eff 50% و Eff 100% به ترتیب بازه اینورتر هنگامی که با ظرفیت نامی ۵ درصد، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد، ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد هستند. به عنوان مثال ضریب وزنی ۰/۰۳ با بازه اینورتر هنگامی که با ظرفیت نامی ۰/۰۵ کار می‌کند ضرب می‌شود و به طور مشابه برای بقیه ضرایب هم اعمال می‌شود.

۶- محاسبه توان و نسبت عملکرد در سیستم فتوولتائیک شناور

در این مقاله، در محاسبه مقدار توان تولیدی سیستم فتوولتائیک شناور ۵ کیلوواتی، اثر دمای آب و وزش باد هم در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ریاضی جهت محاسبه توان سیستم فتوولتائیک شناور از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$P = P_{\text{array STC}} \times \left(\frac{G}{1000} \right) \times \left(1 + \frac{Y_{\text{pmp}}}{100} (T_{\text{FPV}} - 25) \right) \times F_{\text{dirt}} \times F_{\text{mm}} \times F_{\text{cable}} \times F_{\text{inv}} \quad (9)$$

که در آن $P_{\text{array STC}}$ توان کل آرایه در حالت استاندارد، F_{mm} ضریب عدم تطابق ماژول، F_{dirt} ضریب گرد و غبار (۰/۹۷)، T_{FPV} دمای ماژول شناور، F_{cable} تلفات کابل (معمولاً بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹)، F_{inv} راندمان وزنی اروپایی اینورتر (که طبق معادله (۸) محاسبه می‌گردد) و γ_{pmp} ضریب دمایی است. همچنین مقدار T با در نظر گرفتن اثر وزش باد و دمای آب مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد که در آن V سرعت باد، T_w دمای آب و T_a دمای محیط هستند [۲۷]:

$$T_{\text{FPV}} = [1.8081 + (0.9282T_a) + (0.0221G) - (1.2210V) + (0.0246T_w)] \quad (10)$$

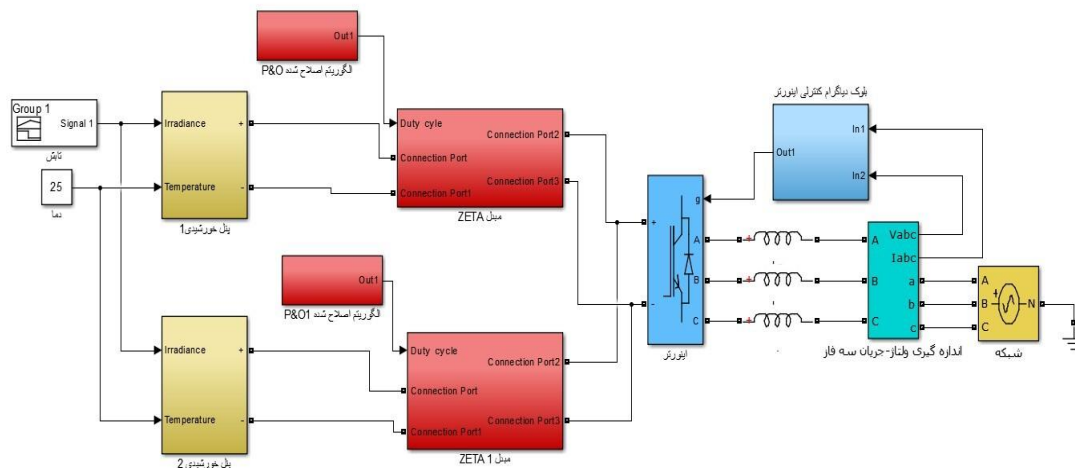
نسبت عملکرد، رابطه بین خروجی انرژی واقعی و نظری نیروگاه فتوولتائیک را توصیف می‌کند [۲۸]. با استفاده از مفهوم نسبت عملکرد، انرژی تولید شده توسط نیروگاه‌های فتوولتائیک را می‌توان با سایر نیروگاه‌های فتوولتائیک مقایسه کرد. نسبت عملکرد مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$PR = \frac{E_{\text{grid}} / P_o}{I_T / I_o} \quad (11)$$

که I_T تابش دریافتی توسط ماژول فتوولتائیک، I_O تابش خورشیدی مرجع (۱۰۰۰ وات بر متر مربع)، P_O توان نامی سیستم فتوولتائیک و E_{grid} انرژی تامین شده توسط نیروگاه فتوولتائیک است.

۷- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۹) شبیه‌سازی کلی اینورتر پیشنهادی را در نرم‌افزار متلب نمایش می‌دهد. جهت احداث نیروگاه فتوولتائیک شناور ۵ کیلوواتی در شمال ایران، دریای خزر دو رشته پنل خورشیدی توسط دو سیستم ردیاب حداکثر توان مجزا به اینورتر متصل شده است. در هر رشته، ۸ پنل خورشیدی به صورت سری متصل می‌شود. اینورتر پیشنهادی، با استفاده از مبدل زتا و الگوریتم پیشنهادی اغتشاش و مشاهده ردیابی حداکثر توان را انجام می‌دهد. در این مقاله، طراحی مبدل در حالت هدایت پیوسته انجام می‌گیرد، زیرا در حالت هدایت پیوسته ولتاژ خروجی مبدل به مقدار بار وابسته نیست. توان نامی مبدل بین ۱/۵ تا ۶/۵ کیلووات و محدوده ولتاژ ورودی بین ۲۰۰ ولت تا ۸۰۰ ولت در نظر گرفته می‌شود. اولین گام محاسبه سیکل وظیفه مطابق رابطه (۱) برای حداقل و حداکثر ولتاژ خروجی و فرکانس کلیدزنی مبدل انجام می‌گیرد. پس از آن مقادیر سلف‌ها و خازن‌ها مطابق رابطه‌ها (۲) تا (۶) به دست می‌آید. همچنین نحوه کلیدزنی مبدل بر اساس روش مدولاسیون پهنا پالس (PWM) در نظر گرفته شده است. همچنین جهت حفاظت از ماسفت، اسنابر RC در نظر گرفته شده است. مقدار مقاومت اسنابر ($R_{snubber}$) و خازن اسنابر ($C_{snubber}$) در جدول (۱) آمده است. شکل (۱۰) ولتاژ و جریان کلید را نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که حداکثر استرس ولتاژ کلید برابر با ۴۰۰ ولت است و همان‌طور که مشاهده می‌شود استرس ولتاژ اضافی روی کلید مبدل وجود ندارد. جهت نمایش بهتر عملکرد الگوریتم اغتشاش و مشاهده پیشنهادی، در مقایسه با الگوریتم اغتشاش و مشاهده متداول، شبیه‌سازی تحت شرایط تابش متغیر و دمای ثابت انجام شده است.

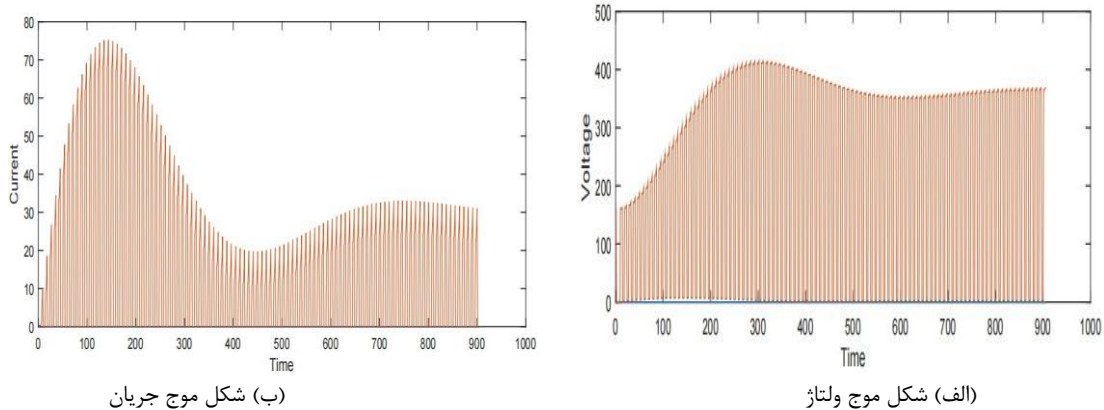


شکل (۹): شبیه‌سازی اینورتر پیشنهادی در نرم‌افزار متلب

Figure (9): Simulation of proposed inverter in MATLAB software
جدول (۱): مقدار پارامترهای مبدل زتا و سیستم کنترلی اینورتر

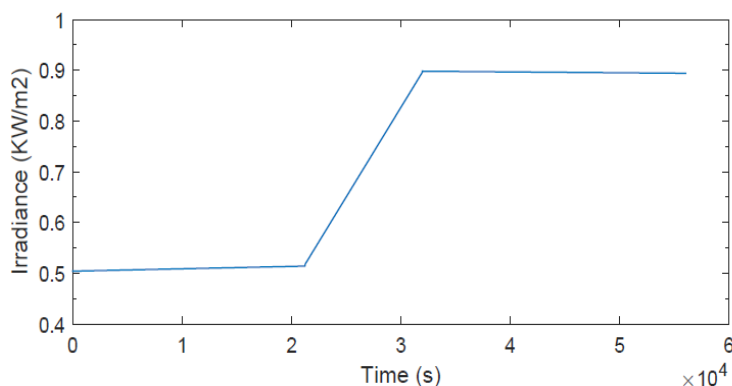
Table (1): ZETA converter and inverter controller parameters

| پارامتر | مقدار |
|---------------|----------------|
| L1 | ۴ میلی‌هانری |
| L2 | ۴ میلی‌هانری |
| C1 | ۱۵۰ میکروفاراد |
| C2 | ۱۰۰ میکروفاراد |
| Fs | ۱۰ کیلوهرتز |
| $R_{snubber}$ | ۳۲ اهم |
| $C_{snubber}$ | ۳۹۰ پیکوفاراد |
| Kp | ۰/۰۸ |
| Ki | ۲۰۰ |



شکل (۱۰): ولتاژ و جریان کلید مبدل

Figure (10): Voltage and current of the converter switch, (a) Switch voltage, (b) Current waveform

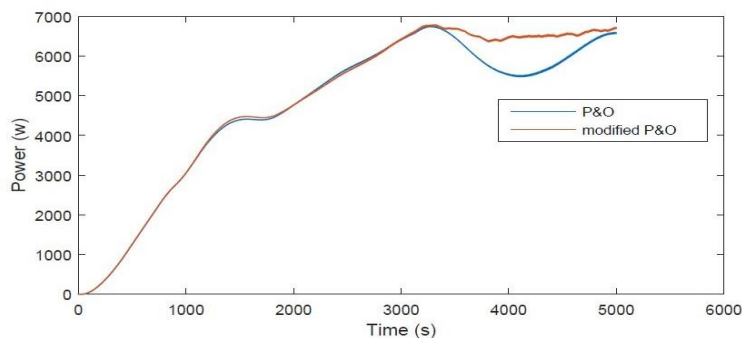


شکل (۱۱): میزان تابش مورد استفاده در شبیه‌سازی

Figure (10): The amount of radiation used in the simulation

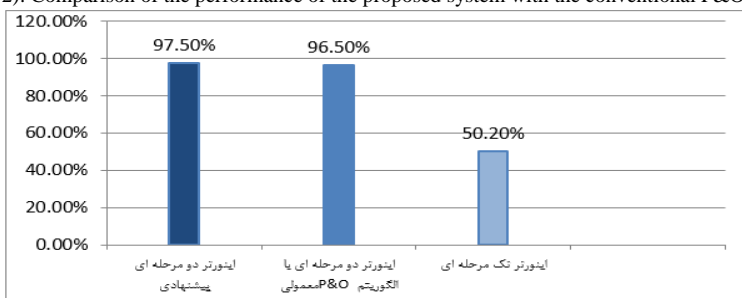
مقدار دما ۲۵ سانتیگراد و میزان تابش از ۰/۵ تا ۰/۹ کیلووات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) مقایسه عملکرد سیستم ردیابی حداکثر توان پیشنهادی را با الگوریتم معمولی اغتشاش و مشاهده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تابش ۰/۹ میزان توان به ۶۵۰۰ وات می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم ردیاب حداکثر توان با الگوریتم معمولی اغتشاش و مشاهده در طول تغییرات سریع تابش (پس از زمان ۳ ثانیه) ردیابی حداکثر توان را از دست می‌دهد. برای غلبه بر این مانع، با افزودن پارامتر تغییر جریان به الگوریتم پیشنهادی، نوسان سریع در تابش شناسایی شده و عملکرد ردیابی بهبود می‌یابد. در واقع، زمانی که تغییر توان منفی و اختلاف توان و تغییر جریان زیاد باشد، الگوریتم پیشنهادی واگرایی از نقطه‌ی حداکثر توان را تشخیص می‌دهد. همچنین اندازه گام برای ردیابی افزایش می‌یابد تا از عملکرد نامطلوب (گم کردن نقطه حداکثر توان) جلوگیری کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، سیستم ردیابی حداکثر توان با الگوریتم معمولی ۴۶۷۶ وات توان و سیستم پیشنهادی ۴۹۹۳ وات توان ردیابی کرده است (افزایش ۷/۶ درصد). در این مقاله، جهت محاسبه راندمان اینورتر دو مرحله‌ای پیشنهادی، از راندمان وزنی اروپایی طبق معادله (۸) استفاده شده است. شکل (۱۳) مقایسه راندمان وزنی اروپایی اینورتر تک مرحله‌ای و اینورتر دو مرحله‌ای پیشنهادی با استفاده از مبدل زتا والگوریتم اصلاح یافته اغتشاش و مشاهده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار راندمان وزنی اینورتر پیشنهادی ۹۷/۵ درصد است.

جدول (۲) میزان تابش، سرعت باد، دمای محیط و دمای آب دریای خزر را جهت محاسبه مقدار توان تولیدی نیروگاه ۵ کیلوواتی فتوولتائیک شناور را نشان می‌دهد. جهت محاسبه مقدار توان تولید شده از معادله (۸) استفاده شده است. شکل (۱۴) مقایسه بین مقدار توان تولیدی سیستم شناور با استفاده از اینورتر دو-مرحله‌ای پیشنهادی در برابر اینورتر تک-مرحله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی با الگوریتم اغتشاش و مشاهده معمولی

Figure (12): Comparison of the performance of the proposed system with the conventional P&O algorithm



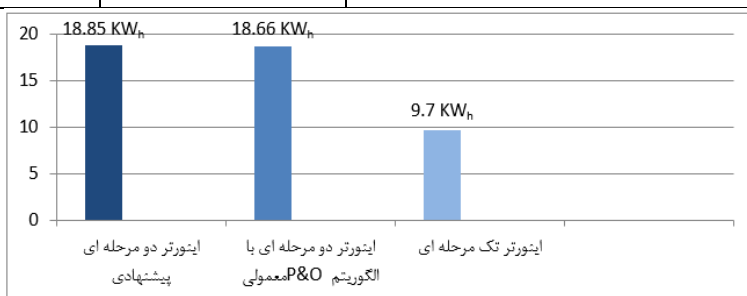
شکل (۱۳): مقایسه راندمان وزنی اروپایی اینورتر پیشنهادی

Figure (13): Comparison of European inverter efficiency of the proposed inverter

جدول (۲): داده‌های آب و هوایی دریای خزر [۲۸،۳۴]

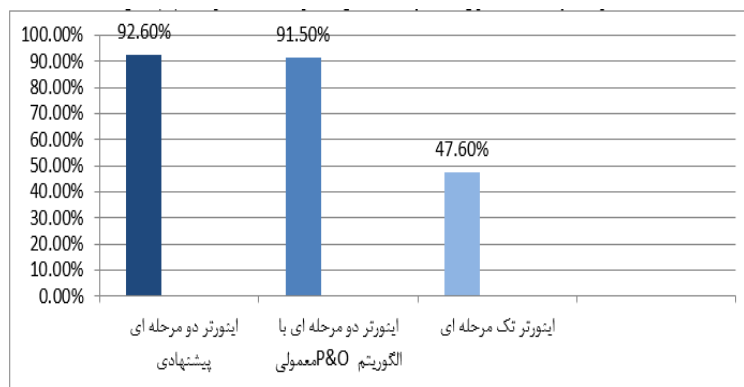
Table (2): Caspian Sea climate data [28,34]

| ماه | دمای هوا (سانتیگراد) | سرعت باد (متر بر ثانیه) | تابش خورشید (کیلووات بر مترمربع بر روز) | دمای آب (سانتیگراد) |
|---------|----------------------|-------------------------|---|---------------------|
| ژانویه | ۳/۳ | ۳/۷ | ۲/۴۲ | ۱۳ |
| فوریه | ۳/۸ | ۳/۷ | ۳/۱۳ | ۱۱ |
| مارس | ۷ | ۳/۶ | ۳/۹۸ | ۱۱ |
| آوریل | ۱۳/۶ | ۳/۴ | ۴/۸۴ | ۱۴ |
| می | ۱۸/۳ | ۳/۸ | ۵/۴ | ۱۹ |
| ژوئن | ۲۳/۲ | ۴/۱ | ۵/۶۳ | ۲۴ |
| جولای | ۲۶ | ۴/۴ | ۵/۴۳ | ۲۷ |
| اگوست | ۲۶/۱ | ۴/۳ | ۴/۹۳ | ۲۸ |
| سپتامبر | ۲۲ | ۴ | ۴/۱۵ | ۲۶ |
| اکتبر | ۱۵/۹ | ۳/۶ | ۳/۳۸ | ۲۳ |
| نوامبر | ۱۰/۲ | ۳/۵ | ۲/۴۷ | ۱۹ |
| دسامبر | ۵/۵ | ۳/۶ | ۲/۰۷ | ۱۶ |
| میانگین | ۱۴/۵۷ | ۳/۸ | ۳/۹۸ | ۱۹/۲۵ |



شکل (۱۴): مقایسه توان تولید شده سیستم فتوولتائیک شناور بر حسب کیلووات ساعت

Figure (14): Comparison of the power generated by floating photovoltaic system per Kw_h



شکل (۱۵): مقایسه نسبت عملکرد نیروگاه فتوولتائیک شناور با اینورترهای مختلف

Figure (15): Comparison of the performance ratio of floating photovoltaic power plant with different inverters

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد اینورتر پیشنهادی مقدار $18/85$ کیلووات ساعت توان تولید می‌کند که این مقدار بیشتر از اینورتر تک-مرحله‌ای و اینورتر با الگوریتم اغتشاش و مشاهده معمولی است. شکل (۱۵) مقایسه نسبت عملکرد نیروگاه فتوولتائیک شناور با اینورتر پیشنهادی، در برابر اینورتر تک-مرحله‌ای متمرکز و دو-مرحله‌ای با الگوریتم متداول اغتشاش و مشاهده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت عملکرد نیروگاه فتوولتائیک شناور با اینورتر پیشنهادی به مقدار $92/6$ درصد افزایش یافته و این مقدار بیشتر از دو اینورتر دیگر است.

۸- نتیجه‌گیری

روند رو به رشد مصرف انرژی در سراسر جهان، وضعیت اقتصادی کشورها و مشکلات زیست محیطی نیاز به تجدید ساختار تولید الکتریسیته را آشکار می‌سازد. با توجه به افزایش مصرف سالانه الکتریسیته، آلودگی‌های زیست محیطی و نیروی کار متخصص، ایران می‌تواند الکتریسیته مصرفی خود را از انرژی خورشیدی تامین نماید. سیستم فتوولتائیک شناور فن‌آوری نوینی است که پنل‌های خورشیدی بر روی آب نصب می‌شوند. از آنجایی که مناطقی شمالی ایران دارای محدودیت زمین است، نصب این سیستم‌ها می‌تواند نیاز به زمین را از بین ببرد و همچنین باعث افزایش ظرفیت تولید نسبت به سیستم‌های فتوولتائیک معمولی شود (به دلیل اثر خنک‌کنندگی آب). در این مطالعه جهت افزایش بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک شناور، ساختار اینورتر دو-مرحله‌ای با اینورتر چندمرشته‌ای ترکیب شده است. در واقع در اینورتر پیشنهادی، مبدل زتا و الگوریتم اصلاح شده اغتشاش و مشاهده جهت افزایش سطح ولتاژ مناسب پنل‌ها و ردیابی حداکثر توان استفاده می‌گردد و در مرحله دوم تبدیل توان DC به AC انجام می‌گیرد. همچنین اینورتر پیشنهادی با اینورتر تک-مرحله‌ای متمرکز از نظر میزان توان تولیدی مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت محاسبات دقیق‌تر میزان توان تولیدی، اثر سرعت باد و دمای آب در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اینورتر پیشنهادی دو-مرحله‌ای $18/88$ کیلووات ساعت به طور متوسط توان تولید می‌کند که این میزان در مقایسه با اینورتر تک-مرحله‌ای متمرکز افزایش یافته است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] A. Shahsavari, F. Yazdi, H. Yazdi, "Potential of solar energy in Iran for carbon dioxide mitigation", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, pp. 507-525, Jan. 2019 (doi: 10.1-007/s13762-108-1779-7).
- [2] S.H. Kim, S.C. Baek, K.B. Choi, S.J. Park, "Design and installation of 500-KW floating photovoltaic structures using high-durability steel", *Energies*, vol. 13, no. 19, Article Number: 4996, Sept. 2020 (doi: 10.3390/e-n13194996).
- [3] M.H.M. Hariri, M.K.M. Desa, S. Masri, M.A.A.M. Zainuri, "Grid-connected PV generation system-components and challenges: A review", *Energies*, vol. 13, no. 17, Article Number: 4279, Aug. 2020 (doi: 10.3390/e-n13174279).
- [4] M. Shayestegan, "Overview of grid-connected two-stage transformer-less inverter design", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 642-655, July 2018 (doi: 10.1007/s40565-017-0367-z).
- [5] K.S. Kummar, A. Kirubakaran, N. Subrahmanyam, "Bidirectional clamping-based H5, HERIC, and H6 transformerless inverter topologies with reactive power capability", *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 56, pp. 5119-5128, Sept./Oct. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2999552).
- [6] H. Xia, "Overview of transformer-less photovoltaic grid-connected inverters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 533-548, Jan. 2021 (doi: 10.1109/TPEL.2020.3003721).
- [7] M.N.H. Khan, M. Forouzesh, Y. Siwakoti, L. Li, T. Kerekes, F. Blaabjerg, "Transformerless inverter topologies for single-phase photovoltaic systems: a comparative review", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 805-835, Mar. 2019 (doi: 10.1109/JESTPE.2019.2908672).
- [8] K.V.G. Raghavendra, Z. Kamran, K. Zeb, A. Muthusamy, T.N.V. Krishna, S.V.S.V. Prabhudeva Kumar, D. Kim, M. Kim, H. Cho, H. Kim, "A comprehensive review of dc-dc converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic system", *Electronics*, vol. 9, no. 1, Article Number: 31, Dec. 2019 (doi: 10.3390/electronics9010031).
- [9] N.H. Baharudin, T.M.N. Mansur, F.A. Hamid, R. Ali, M.I. Misrun, "Topologies of dc-dc converter in solar PV applications", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, no.2, pp. 368-374, Nov. 2017 (doi: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374).
- [10] M.R. Banaei, H.A.F. Bonab, "A high efficiency nonisolated buck-boost converter based on ZETA converter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 3, pp. 1991-1998, Mar. 2020 (doi: 10.1109/TIE.2019.290-2785).
- [11] K. Harini, S. Syama, "Simulation and analysis of incremental conductance and perturb and observe MPPT with DC-DC converter topology for array", *Proceeding of the IEEE/ICECCT*, pp. 1-5, Coimbatore, India, Mar. 2015 (doi: 10.1109/ICECCT.2015.7225989).
- [12] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S.V. Spataru, R. Teodorescu, "On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no.3, pp. 1070-1078, July 2013 (doi: 10.1109/Jphotov.2013.2261118).
- [13] A.K. Gupta, R. Saxena, "Review on widely-used MPPT techniques for PV applications", *Proceeding of the IEEE/CICCS*, pp. 270-273, Greater Noida, India, Feb. 2016 (doi: 10.1109/ICICCS.2016.7542321).
- [14] A. Safari, S. Mekhilef, "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1154-1161, April 2011 (doi: 10.1109/TIE.2010.2048834).
- [15] R.M. Asif, M.A.B. Siddique, A.U. Rehman, M.T. Sadiq, A. Asad, "Modified fuzzy logic MPPT for PV system under severe climatic profiles", *Pakistan Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 49-55, 2021.
- [16] M. Fereshtehpour, R. Javidi Sabbaghian, A. Farrokhi, E.B. Jovein, E.E. Sarindizaj, "Evaluation of factor governing the use of floating solar system: A study on Iran's important water infrastructures", *Renewable Energy*, vol. 171, pp. 1171-1187, Dec. 2021 (doi: 10.51846/vol4iss2pp49-55).
- [17] A.S. Pasalic, A. Aksamovic, S. Avdakovic, "Floating photovoltaic plants on artificial accumulations-example of jablanica lake", *Proceeding of the IEEE/ENERGYCON*, pp. 1-6, Limassol, Cyprus, June 2018 (doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398765).
- [18] S.H. Kim, S.J. Yoon, W. Choi, K.B. Choi, "Application of floating photovoltaic energy generation systems in South Korea", *Sustainability*, vol. 8, no. 12, Article Number: 1333, Dec. 2016 (doi: 10.3390/su8121333).
- [19] S.K. Sahoo, S. Sukchai, F. Yanine, "Review and comparative study of single-stage inverters for a PV system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 962-986, 2018 (doi: 10.1016/j.rser.2018.04.063).
- [20] P. R. Babu, S.R. Prasath, R. Kiruthika, "Simulation and performance analysis of CCM ZETA converter with PID controller", *IEEE International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*, pp. 1-7, Nagercoil, India, 2015 (doi: 10.1109/ICCPCT.2015.7159506).

- [21] M. Ngan, C.W. Tan, "A study of maximum power point tracking algorithm for stand-alone photovoltaic systems", IEEE Applied Power Electronics Colloquium, pp. 1-6, Johor Bahru, Malaysia, Apr. 2011 (doi: 10.1109/IAPEC.2011.5779863).
- [22] S. Tahir, J. Wang, M.H. Baloch, G.S. Kaloi, "Digital control techniques based on voltage source inverters in renewable energy applications: a review", Electronics, vol. 7, no. 2, Article Number: 18, Feb. 2018 (doi: 10.3390/electronics7020018).
- [23] K. Dezelak, P. Bracinek, K. Sredensek, K.S. Seme, "Proportional-integral controllers performance of a grid-connected solar PV system with particle swarm optimization and Ziegler-Nichols tuning method", Energies, vol. 14, no. 9, Article Number: 2516, April. 2021 (doi: 10.3390/en14092516).
- [24] C. Buccella, C. Cecati, H. Latafat, K. Razi, "Multi string grid-connected PV system with LLC resonant DC/DC converter", Intelligent Industrial Systems, vol. 1, pp. 37-49, May. 2015 (doi: 10.1007/s40903-015-0006-9).
- [25] Z. Salam, A. Rahman, "Efficiency for photovoltaic inverter: a technological review", IEEE Conference on Energy Conversion [CENCON], Johor Bahru, Malaysia, Oct. 2014 (doi: 10.1109/CENCON.2014.6967497).
- [26] A. Omar, M. Hussin, S. Shaari, K. Sopian, "Energy yield calculation of the grid connected photovoltaic power system", Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy, pp. 162-167, 2014.
- [27] A.P. Sukarso, K.N. Kim, "Cooling effect on the floating solar PV: performance and economic analysis on the case of west Java province in Indonesia", Energies, vol. 13, no. 9, 2020 (doi: 10.3390/en/13092126).
- [28] D. Mittal, B. Saxena, K. Rao, "Floating solar photovoltaic systems: an overview and their feasibility at Kota in Rajasthan", Proceeding of the IEEE/ICCPCT, PP. 1-7, Kollam, India, Apr. 2017 (doi: 10.1109/ICCPCT.20-17.8074182).
- [29] E. Torres, "Work in progress: Using RETScreen expert software for authentic assessment", Proceeding of the IEEE/EDUNINE, pp. 1-3, Bogota, Colombia, March 2020 (doi: 10.1109/EDUNINE48860.2020.9149494).
- [30] M. Sandeep, M. J Sathik, U. Yaragatti, V. Krishnasamy, A.K. Verma, H.R. Pota, "Common-grid type five-level transformerless inverter topology with full dc-bus utilization", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 56, no. 4, pp. 4071-4080, July/Aug. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2996152).
- [31] N.M. Kumar, J. Kanchikere, P. Mallikarjun, "Floatvoltaics: towards improved energy efficiency, land and water management", International Journal of Civil Engineering and Technology, vol. 9, no. 7, pp. 1089-1096, July 2018.
- [32] J. Jiang, S. Pan, J. Gong, "A leakage current eliminated and power oscillation suppressed single-phase single-stage nonisolated grid-tied inverter and improved control strategy", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 36, pp. 6738-6749, Jun. 2021 (doi: 10.1109/TPEL.2020.3035033).
- [33] H. Li, Y. Zeng, B. Zhang, T.Q. Zheng, R. Hao, Z. Yang, "An improved H5 topology with low common-mode current for transformerless PV grid-connected inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1254-1265, Feb. 2019 (doi: 10.1109/TPEL.2016.2018.2833144).
- [34] S. Semeskandeh, M. Hojjat, M. Hosseini-Abardeh, "Techno-economic-environmental comparison of the floating photovoltaic plant with conventional solar photovoltaic plant in northern Iran", Clean Energy, vol. 6, no. 2, pp. 353-361, April. 2022 (doi: 10.1093/ce/zkac019).
- [35] H. Shahsavari, S.M.M Mirtalaei, "Design and implementation of a non-isolated multi-part converter with high voltage gain", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 46, pp. 33-48, Sept. 2021 (doi: 20.1001.1.23223871.1400.12.2.3.1).
- [36] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M Mirtalaei, M. Jabbari, "An overview of the structure and improvement of the main parameters of non-isolated dc/dc boost converters", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 47, pp. 1-29, Dec. 2021 (doi: 20.1001.1.23223871.1400.1-2.48.6.6).
- [37] S. Farhang, S. Zanjani, B. Fani, "Analysis and simulation of inverter-based microgrid droop control method in island operation mode", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 6, no. 1, pp. 65-81, March 2022 (doi: 20.1001.1.25887327.2022.6.1.4.0).

زیرنویس

| | |
|---------------------------------|---|
| 1. Photovoltaic system | 8. Floating system |
| 2. CUK | 9. Mooring |
| 3. SEPIC | 10. Module inverter |
| 4. ZETA | 11. Metal oxide semiconductor field effect transistor |
| 5. Perturb and observe | 12. Proportional integral |
| 6. Incremental conductance | 13. Phase lock loop |
| 7. Maximum power point tracking | 14. Pulse width modulation |