



## Single Stage Solar PV-Battery Based Hybrid Water Pumping System Using BLDC Motor Drive

Aram Azizi<sup>1</sup>, M.Sc, Mehrdad Gholami<sup>1</sup>, Assistant professor

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran

### Abstract:

Water pumping is one of the significant applications of solar energy. The solar pumping system can be categorized into two types based on the number of power conversion stages: single-stage and multi-stage. In multi-stage systems, a DC-DC converter is required to ensure the maximum power point tracking (MPPT). However, this power conversion block leads to increased costs, size, complexity, and reduced system efficiency. In this study, a single-stage solar pumping system using a brushless DC (BLDC) motor is designed to eliminate the need for a DC-DC converter. The single-stage structure is preferred over the multi-stage structure due to its advantages, and the BLDC motor is chosen for its suitability in solar pumping systems. In the proposed system, a hybrid photovoltaic (PV) and battery source is utilized to ensure consistent pumping volume regardless of weather conditions. The PV array serves as the primary power source, while the battery acts as a backup. The battery is discharged only during unfavorable weather conditions or at night when the PV array cannot provide power to the motor-pump. Conversely, when water pumping is not required or the PV power exceeds the motor-pump's power demand, the extra power is stored in the battery, which is then charged. A bidirectional charging control system is employed to automatically switch the battery's mode of operation using a bidirectional converter. To control the BLDC motor, a simple control technique is proposed, which allows the solar PV array to operate at its peak power using a voltage source inverter (VSI).

**Keywords:** Solar pv, Bldc motor, Water pumping, Bidirectional charging control, Mppt, Hybrid source

**Received:** 14 March 2024

**Revised:** 4 July 2024

**Accepted:** 23 August 2024

**Corresponding Author:** Dr. Mehrdad Gholami, m.gholami@uok.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1105278>





# فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

## سیستم پمپاژ آب یک سطحی با منبع هیبریدی فوتوولتائیک - باتری با استفاده از موتور BLDC

آرام عزیزی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، مهرداد غلامی<sup>۱</sup>، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان، ایران

**چکیده:** پمپاژ آب یکی از کاربردهای مهم انرژی خورشیدی است. سیستم پمپاژ را می‌توان با توجه به تعداد مراحل تبدیل توان به دو دسته یک سطحی و چند سطحی دسته بندی کرد. در سیستم های پمپاژ خورشیدی چند سطحی همواره یک مبدل DC-DC برای ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) نیاز است. این تبدیل توان منجر به افزایش هزینه، اندازه، پیچیدگی و کاهش بازده سیستم می‌شود. در این مقاله یک سیستم پمپاژ یک سطحی متشکل از یک موتور BLDC تغذیه شده با آرایه فوتوولتائیک ارائه شده است که در آن مبدل DC-DC حذف شده است. سیستم یک سطحی با توجه به مزیت های فراوان آن، به سیستم چند سطحی ترجیح داده می‌شود. همچنین به دلیل اینکه موتور BLDC با توجه به ویژگی های آن برای سیستم خورشیدی بسیار مناسب است، در این مقاله از این موتور استفاده می‌شود. در این سیستم برای دستیابی به پمپاژ با حجم حداکثر و ثابت بدون توجه به شرایط آب‌وهوایی، از یک منبع هیبریدی فوتوولتائیک با پشتیبانی باتری استفاده شده است، به این صورت که آرایه PV منبع تغذیه اصلی است و باتری به عنوان پشتیبان عمل می‌کند. نحوه عملکرد باتری در این سیستم به این شکل است که، باتری فقط در شرایط نامناسب آب‌وهوایی یا در طول شب که توان تولیدی آرایه PV برای تغذیه موتور در دسترس نیست، تخلیه می‌شود. از سوی دیگر زمانی که به پمپاژ آب نیاز نباشد یا میزان توان PV مازاد بر مقدار توان مورد نیاز موتور-پمپ باشد، باتری شارژ می‌شود. کنترل شارژ و دشارژ باتری به طور خودکار توسط یک مبدل دو جهته باک بوست کنترل می‌شود. یک سیستم کنترل ساده برای کنترل آرایه PV به منظور دریافت حداکثر توان و از طریق اینورتر منبع ولتاژ استفاده می‌شود. همچنین از یک روش ساده و مقرون به صرفه برای کلیدزنی اینورتر به منظور راه‌اندازی و کنترل سرعت موتور BLDC استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** فوتوولتائیک، موتور BLDC، پمپاژ آب، کنترل کننده شارژ دو جهته، MPPT، منبع تغذیه هیبریدی

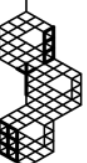
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهرداد غلامی، m.gholami@uok.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1105278>



یکی از منابع ضروری برای حیات انسان، آب است که زندگی امروزه تا حد زیادی به آن وابسته است. علاوه بر نیاز به آب آشامیدنی، کشاورزی، دامداری و حتی صنعت به آب وابسته اند [۱]. در بیشتر مناطق روستایی، منابع آب کیلومترها از خطوط شبکه‌ی برق فاصله دارند. به این دلیل نصب خطوط جدید و تجهیزات مربوطه از جمله ترانسفورمرها اغلب هزینه‌ی گزافی دارد. اولین گزینه در دسترس در این شرایط، پمپ‌های دیزلی یا تولید برق به وسیله ژنراتورهای دیزلی است. استفاده از پمپ‌های دیزلی نه تنها نیازمند سوخت گران هستند، موجب آلودگی هوا و آلودگی صوتی نیز می‌شوند، به علاوه این پمپ‌ها معایب دیگری دارند از جمله، نیاز به نگهداری منظم و هزینه‌های بالای حمل سوخت به مکان‌های دور دست [۲]. این مشکلات منجر به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و سیستم‌های پمپاژ مبتنی بر سلول‌های خورشیدی، به عنوان یک راه‌حل قابل اعتماد و پایدار در مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه با سطوح بالای تابش سالانه شده است [۳].

سیستم پمپاژ خورشیدی آلودگی ندارد و برخلاف پمپ‌های دیزلی هیچ آسیبی به محیط زیست وارد نمی‌کند. طول عمر سیستم‌های PV<sup>1</sup> طولانی و در حدود ۲۵ الی ۳۰ سال است. اگر سیستم پمپاژ فوتوولتائیک به درستی طراحی شده باشد تنها به یک بازدید دوره ای برای پاکسازی پنل‌ها نیاز دارند و نگهداری خاصی نیاز ندارند. این سیستم‌ها در بلند مدت در مقایسه با سیستم‌های پمپاژ معمولی رایج باعث صرفه جویی در هزینه‌ها می‌شود [۴].

به طور کلی یک سیستم پمپاژ خورشیدی شامل بخش‌های مختلف است از جمله سیستم فوتوولتائیک، موتور الکتریکی، پمپ آب، مبدل‌های الکترونیک قدرت، سیستم کنترل کننده و ذخیره سازها.

برای دریافت حداکثر توان از آرایه PV از کنترل کننده ردياب نقطه حداکثر توان (MPPT<sup>2</sup>) استفاده می‌شود. الگوریتم MPPT یک سیستم فوتوولتائیک برای تنظیم مداوم ولتاژهای مرجع جدید فوتوولتائیک به کار گرفته می‌شود تا منحنی‌های ولتاژ-توان را اندازه گیری کند و نقطه کار فوتوولتائیک را به سمت نقطه توان بیشینه هدایت کند.

در سیستم‌های پمپاژ خورشیدی مبتنی بر موتورهای AC بر اساس تعداد مراحل تبدیل توان، که برای تبدیل توان DC خروجی منابع PV به توان AC مورد نیاز موتور انجام می‌شود، دو ساختار متداول یک سطحی و دو سطحی وجود دارد. پمپ خورشیدی دو سطحی متشکل از دو رابط الکترونیک قدرت مابین منبع برق خورشیدی و پمپ موتور است. مرحله اول برای رديابی بیشترین توان از منبع انرژی خورشیدی و معمولاً یک مبدل DC - DC بهره‌بردار برای بالا بردن ولتاژ PV استفاده می‌شود. مرحله دوم برای کنترل موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد و مختص موتور بکار رفته برای پمپاژ است. در ساختار یک سطحی، فقط یک مرحله تبدیل الکترونیک قدرتی بین پمپ خورشیدی PV و پمپ موتور AC وجود دارد و مبدل استفاده شده علاوه بر اینکه ولتاژ DC را به AC تبدیل می‌کند، وظیفه رديابی نقطه‌ی حداکثر توان را نیز انجام می‌دهد. اینورتر مورد استفاده در این سیستم‌ها عموماً اینورتر سه فاز شش کلیدی معمولی می‌باشد. ولتاژ خروجی پنل PV به لینک DC اینورتر اعمال شده و در نهایت موتور از ولتاژ AC خروجی اینورتر تغذیه می‌شود [۵].

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC<sup>۳</sup>) اغلب برای کاربردهای پویا از قبیل صنایع خودروسازی، صنایع پمپاژ و صنایع نورد ترجیح داده می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی سهم موتورهای BLDC در جریان انتقال قدرت در صنایع افزایش یابد که جایگزین موتورهای القایی سنتی می‌شوند [۶]. در مقایسه با موتورهای دیگر، موتور BLDC مزایایی دارد از جمله بازده بالاتر، قابلیت اطمینان زیاد، هزینه نگهداری کم، نسبت گشتاور به وزن بالاتر، ساختار فشرده‌تر و همچنین نویز عملیاتی کمتری دارد. موتورهای BLDC به دلیل طبیعت صرفه‌جویی انرژی، برای کاربردهای پمپاژ ترجیح داده می‌شوند [۷].

در تحقیقات گذشته در مورد سیستم‌های پمپاژ خورشیدی، بیشتر بر روی ساختار دو سطحی کار شده است، تعدادی از مقالات هم به ساختار یک سطحی پرداخته‌اند.

در [۸] در ساختار دو سطحی پمپ آب خورشیدی مبتنی بر موتور BLDC، برای رديابی نقطه توان حداکثر آرایه PV از مبدل Landsman استفاده شده است. هدف اصلی مبدل Landsman بهینه‌سازی توان خروجی آرایه فوتوولتائیک است و همچنین برای راه اندازی اولیه نرم و ایمن موتور BLDC استفاده می‌شود. مبدل Landsman به عنوان رابطی بین آرایه فوتوولتائیک و اینورتر قرار دارد و با اجرای الگوریتم MPPT به منظور استخراج حداکثر توان از آرایه خورشیدی عمل می‌کند. اینورتر از طریق کموتاسیون الکترونیکی راه‌اندازی می‌شود و موتور BLDC را تغذیه می‌کند. مقاله [۹] روشی ساده، مقرون‌به‌صرفه و موثر برای درایو موتور BLDC برای پمپ آب تغذیه شده با آرایه فوتوولتائیک خورشیدی ارائه می‌کند. در این مرجع برای استخراج حداکثر توان موجود از آرایه PV، یک مبدل



Zeta مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختار آرایه PV توان الکتریکی مورد نیاز پمپ موتور را تولید می‌کند. این توان الکتریکی از طریق مبدل زتا و یک VSI<sup>۴</sup> به موتور-پمپ داده می‌شود.

در سیستم های مذکور الگوریتم های ردیابی نقطه توان حداکثر به یک مبدل DC-DC برای بهینه سازی نقطه توان آرایه خورشیدی نیاز دارند. این تبدیل توان باعث افزایش هزینه، اندازه سیستم، پیچیدگی و کاهش بازده می‌شود.

در [۱۰] یک روش منحصر به فرد ارائه شده است که در سیستم مبدل DC-DC حذف شده است و یک سیستم تک مرحله‌ای داریم. این سیستم دارای یک روش کنترل ساده با استفاده از یک اینورتر منبع ولتاژ مشترک است که قادر به کنترل آرایه خورشیدی برای دریافت حداکثر توان آن است، همچنین برای کنترل موتور BLDC نیز استفاده شده است. سنسورهای جریان فاز موتور در روش کنترل پیشنهادی حذف شده است و همچنین نیازی به کنترل کننده اضافی برای کنترل سرعت موتور نیست. سرعت از طریق توان بهینه آرایه خورشیدی کنترل می‌شود. در این سیستم برای ردیابی نقطه توان حداکثر آرایه خورشیدی از الگوریتم هدایت افزایشی استفاده می‌شود. این تکنیک از ولتاژ و جریان آرایه خورشیدی به عنوان سیگنال های بازخورد برای تولید یک نسبت وظیفه بهینه استفاده می‌کند که مربوط به حداکثر توان آرایه خورشیدی می‌باشد. موتور استفاده شده دارای سه سنسور موقعیت داخلی برای انجام کموتاسیون الکتریکی است. هر گونه تغییر در شرایط جوی باعث تغییرات در خروجی توان آرایه خورشیدی و در نتیجه در سرعت موتور BLDC می‌شود. در واقع، نسبت وظیفه بهینه تولید شده توسط الگوریتم MPPT که به عنوان نسبت وظیفه برای اینورتر منبع ولتاژ عمل می‌کند، ولتاژ ورودی به موتور را با عمل کنترل اینورتر منبع ولتاژ تنظیم می‌کند. در نتیجه ولتاژ ورودی موتور، سرعت موتور را تنظیم می‌کند. همانطور که نسبت وظیفه توسط الگوریتم MPPT متغیر است، پس سرعت موتور هم به نسبت شرایط جوی متغیر است. تجزیه و تحلیل نتایج بهره‌وری و بازده بیشتر سیستم پیشنهادی را نسبت به ساختار های دو مرحله ای نشان می‌دهد. در مقاله [۱۱] یک کنترل یک سطحی بدون سنسور ساده برای موتور BLDC درون چاهی با تغذیه PV برای یک چاه عمیق ارائه شده است سیستم پیشنهادی استفاده از سنسورهای موقعیت موتور را حذف کرده است همچنین مبدل DC-DC را برای ردیابی نقطه توان حداکثر را نیز حذف کرده است. به علاوه نیاز به سنسورهای جریان فاز نیز رفع شده است. موتور پمپ درون چاهی شناور مستقیماً به وسیله یک اینورتر به آرایه PV متصل می‌شود. در این مقاله چالش های موتور پمپ شناور در آب به خوبی رفع شده اند. در مقاله [۱۲] پمپ آب با استفاده از یک توپولوژی تک مرحله‌ای در نظر گرفته می‌شود. این سیستم دارای کنترل موتور BLDC، اندازه خازن DC پایین، قیمت پایین، تراکم بالا و راندمان بالاتر است. در این مقاله مدل سازی سیستم با استفاده از MPPT مبتنی بر ANN<sup>۵</sup> مورد بحث قرار می‌گیرد. روش های مختلف MPPT مبتنی بر ANN پیوسته توسعه یافته و بهبود یافته‌اند. MPPT مبتنی بر شبکه عصبی دارای مزایایی مانند ردیابی سریع، عدم نوسان در نقطه حداکثر توان، توانایی ردیابی حتی در محیط با تغییرات زیاد، عملکرد مقاوم، تحمل سیستم‌های غیرخطی است. این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد MPPT مبتنی بر ANN عملکرد گذرا سیستم را بهبود می‌بخشد اما در سیستم های مبتنی بر شبکه عصبی، هزینه و پیچیدگی همواره مورد توجه بوده و پیاده‌سازی عملی یک چالش است.

در [۱۳] یک سیستم پمپ آب خورشیدی مستقل پیشنهاد شده است. در این سیستم باتری های اسیدی به منظور ذخیره انرژی نصب شده است و یک موتور BLDC متصل پمپ آب عمل پمپاژ را انجام می‌دهد. سیستم کنترل کننده از سه مرحله کنترل تشکیل شده است. مرحله اول کنترل سرعت و کنترل کننده هیستریزس جریان برای موتور BLDC است. مرحله دوم برای ردیابی نقطه توان بیشینه آرایه PV و مرحله آخر عملیات شارژ و تخلیه باتری را کنترل می‌کند.

در این مقاله یک سیستم پمپاژ با ساختار یک سطحی ارائه شده است که علاوه بر تغذیه از طریق آرایه PV دارای باتری های ذخیره ساز برای پشتیبانی می‌باشد. یکی از مشکلات اساسی سیستم های یک سطحی موجود، وابستگی کامل سرعت موتور و حجم پمپاژ آب به مقدار تابش خورشید است که در سیستم پیشنهادی این مشکل حل شده است. کنترل سیستم پیشنهادی به گونه‌ای است که با وجود باتری در سیستم، نیازی به مبدل DC-DC مابین باتری و آرایه PV که در سیستم های دارای باتری معمول است، رفع شده است. سیستم پیشنهادی به گونه ای که این سیستم هم خصوصیات مثبت سیستم پمپاژ یک سطحی را دارا است و هم با توجه به سیستم کنترل شارژ و دشارژ استفاده شده برای باتری، دارای قابلیت اطمینان بالا و قابلیت بهره برداری در شرایط مختلف جوی و طول شبانه روز است و همچنین قادر است عملیات پمپاژ را با حجم ثابت بدون توجه به تغییرات تابش خورشید ناشی از عبور ابر ها، انجام دهد، که این ویژگی ها با هم در سیستم های یک سطحی معمول و سیستم های دارای باتری موجود وجود نداشت.



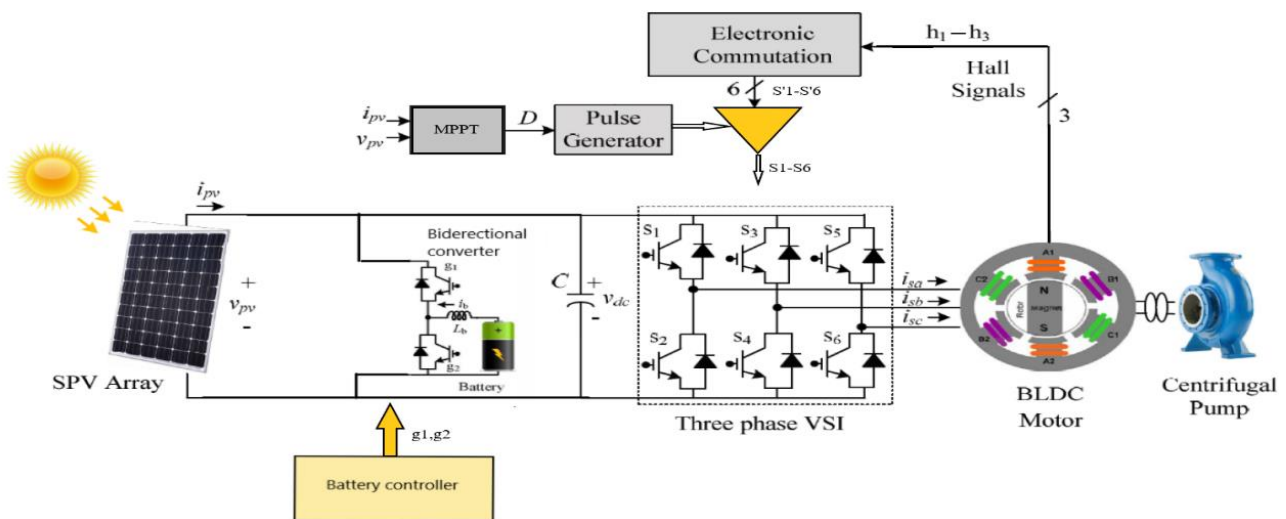
## ۲- سیستم پیشنهادی

ساختار های مرسوم برای سیستم پمپاژ خورشیدی، سیستم تبدیل انرژی خورشیدی دو مرحله‌ای را اتخاذ می‌کنند که اساساً به یک مبدل DC-DC میانی نیاز دارد. این تبدیل توان باعث افزایش هزینه، اندازه، پیچیدگی و کاهش بازده سیستم می‌شود. همچنین در سیستم های پمپاژ مرسوم، میزان سرعت موتور و بالطبع مقدار آب پمپاژ شده کاملاً وابسته به سطح تابش خورشید است و تغییرات تابش مستقیماً باعث تغییرات سرعت موتور می‌شود. همچنین عملکرد این سیستم ها در آب و هوای ابری با چالش مواجه می‌شود به علاوه در طول شب و در دسترس نبودن نور خورشید بلا استفاده هستند. در این مقاله برای حل مشکلات ذکر شده، یک سیستم یک سطحی هیبرید خورشیدی با پشتیبانی باتری لیتیومی پیشنهاد می‌شود که برای بهینه سازی نقطه توان حداکثر آرایه PV از همان اینورتر استفاده شده برای کنترل موتور، استفاده می‌کند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، باتری های لیتیوم یون مزایای زیادی در مقایسه با دیگر باتری های سربی دارند از جمله، بازده تقریباً ۱۰۰ درصد در فرایند شارژ و دشارژ، ظرفیت ثابت (کمتر وابسته به جریان تخلیه)، عمر طولانی تر [۱۴]، تراکم توان بالاتر، نیاز به نگهداری کمتر و ولتاژ پایدارتر در طول چرخه های تخلیه و از نظر زیست محیطی نیز، امن تر هستند [۱۵].

در این سیستم با توجه به مزایای موتور BLDC در سیستم پمپاژ خورشیدی از جمله سادگی، فشردگی و سایز کوچک، کاهش هزینه و همچنین بازده تبدیل توان بالا از این موتور استفاده می‌شود. یک موتور BLDC با بازده بالا به طور قابل توجهی اندازه آرایه PV و در نتیجه هزینه نصب آن را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، تعداد ماژول های فوتوولتائیک مورد نیاز در مقایسه با یک سیستم با موتور القایی کمتر است. موتور BLDC دارای ضریب توان بالایی است که منجر به کاهش ظرفیت اینورتر مورد استفاده می‌شود. این ویژگی به کاهش هزینه سیستم های پمپاژ فوتوولتائیک کمک می‌کند.

## ۳- مدل سازی سیستم پیشنهادی

ساختار سیستم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم پیشنهادی شامل آرایه PV، موتور BLDC، اینورتر سه فاز، پمپ آب، باتری، کنترل کننده باتری، کنترل کننده موتور و MPPT است. نحوه مدل سازی و محاسبات مربوط به هر بخش در ادامه شرح داده می‌شود. آرایه PV به یک خازن لینک DC متصل است که از طریق اینورتر متصل به آن موتور BLDC را تغذیه می‌کند. یک باتری هم از طریق مبدل دوجته به لینک DC متصل است که وظیفه پشتیبانی برای تغذیه موتور را انجام می‌دهد. روش انحراف و مشاهده<sup>۶</sup> MPPT (P&O) برای آرایه خورشیدی استفاده می‌شود. این روش از ولتاژ و جریان PV به عنوان سیگنال بازخورد برای تولید نسبت وظیفه بهینه متناظر با حداکثر توان آرایه خورشیدی استفاده می‌کند. موتور BLDC دارای سه حسگر اثر هال داخلی است که از سیگنال های آن ها برای انجام کموتاسیون الکترونیکی برای کنترل اینورتر استفاده می‌شود.



شکل (۱): ساختار سیستم پیشنهادی



## ۳-۱- موتور و پمپ

برای این سیستم یک موتور ۶ قطب، ۱۶۳۳ W با سرعت نامی ۲۵۰۰ rpm در ولتاژ نامی ۱۳۰ V (DC) انتخاب می‌شود. برای مدل‌سازی پمپ در نرم افزار متلب، گشتاور پمپ که حاصل ضرب ضریب k پمپ در توان دوم سرعت زاویه ای موتور است، به عنوان ورودی به موتور BLDC داده می‌شود. سایر مشخصات موتور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات موتور BLDC و پمپ

پارامترها	مقادیر
Power	$P_m = 1/633 \text{ kW}$
Number of poles	$P = 6$
Rated voltage (DC)	۱۳۰ V
Rated speed	۲۵۰۰ rpm
Stator resistance	$R_s = 0/37 \Omega$
Stator inductance	$L_s = 1 \text{ mH}$
Voltage constant	۳۴ V (L-L)/krpm
Pump Proportionality constant	$k = 3/5 * (10)^{-5}$

## ۳-۲- طراحی آرایه PV

یک آرایه PV با حداکثر ظرفیت توان برابر با ۱۶۰۰ kW در شرایط استاندارد یک اتمسفر (تابش  $1000 \text{ W/m}^2$  و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) توجه به مشخصات اسمی موتور انتخاب می‌شود. ظرفیت عملیاتی آرایه فوتوولتائیک انتخاب شده برای اجرای سیستم پمپ موتور در شرایط مجاز آن، علاوه بر جبران تلفات توان مربوط به اینورتر و موتور-پمپ، کافی است. در مدل سازی سیستم از ماژول های "Development" Anhui Rinengzhongtian Semiconductor با توان ۲۰۰ W استفاده می‌شود. ولتاژ آرایه PV مورد نیاز در لینک DC اینورتر برای تغذیه موتور BLDC انتخاب شده در گشتاور و سرعت مجاز آن ۱۳۰ ولت است. بدیهی است که ولتاژ آرایه فوتوولتائیک در MPP<sup>8</sup> باید بالاتر از ۱۳۰ ولت باشد. بنابراین تعداد ماژول های متصل به هم سری به صورت رابطه (۱) تقریب زده می‌شود:

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_{mpp}} = \frac{130}{36.12} = 3.6 \quad (1)$$

$V_{dc}$  ولتاژ باس مورد نیاز موتور و  $V_{mpp}$  ولتاژ ماژول در نقطه MPP است. بنابراین از ۴ ماژول سری با هم برای تامین ولتاژ مورد نظر استفاده می‌شود. جریان PV در MPP به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\frac{P_{pv}}{V_{mpp}} = \frac{200}{36.12} = 5.54 \text{ A} \quad (2)$$

$P_{pv}$  توان نامی ماژول PV مورد استفاده است.

از آنجا که حداکثر توان مورد نیاز آرایه فوتوولتائیک ۱۶۳۳ وات است، جریان مورد نیاز موتور به با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\frac{P_m}{V_{dc}} = \frac{1633}{130} = 12.56 \text{ A} \quad (3)$$



Pm توان نامی مورد نیاز موتور BLDC است. تعداد ماژول های مورد نیاز برای اتصال موازی برای تامین جریان مورد نیاز توسط معادله (۴) محاسبه می شود:

$$Np = \frac{12.56}{5.54} \approx 2 \quad (4)$$

در نهایت ۸ ماژول PV متصل به هم برای طراحی آرایه PV با ولتاژ ۱۴۴ و جریان ۱۱ آمپر استفاده می شود. مشخصات آرایه PV در جدول ۲ آورده شده است.

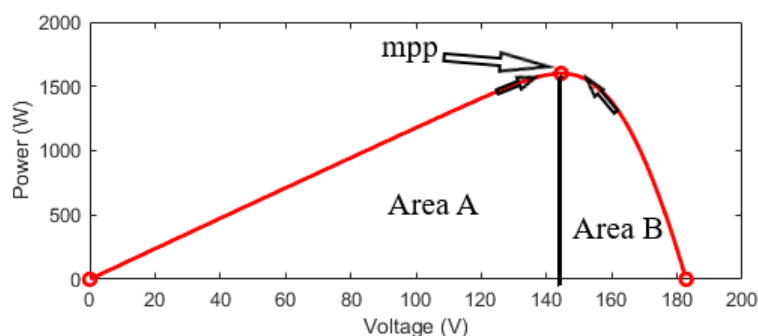
کنترل سیستم پیشنهادی شامل پنج بخش می شود که شامل کنترل آرایه PV از طریق الگوریتم MPPT تبدیل الکترونیکی موتور BLDC، تولید پالس های کلید زنی برای اینورتر ولتاژ، کنترل سرعت موتور BLDC و کنترل شارژ و دشارژ باتری می شود. در ادامه هر بخش تشریح می شود.

جدول (۲): مشخصات ماژول PV

مقادیر	پارامترها
۱۶۰۰ W	Maximum power
۱۸۲ / ۸ V	Open circuit voltage (Voc)
۱۱ / ۹ A	Short circuit current (Isc)
۱۴۴ / ۴۸ V	Voltage at maximum power point (Vmpp)
۱۱ / ۸ A	Current at maximum power point (Impp)

### ۳-۳- ردیابی نقطه توان حداکثر (MPPT)

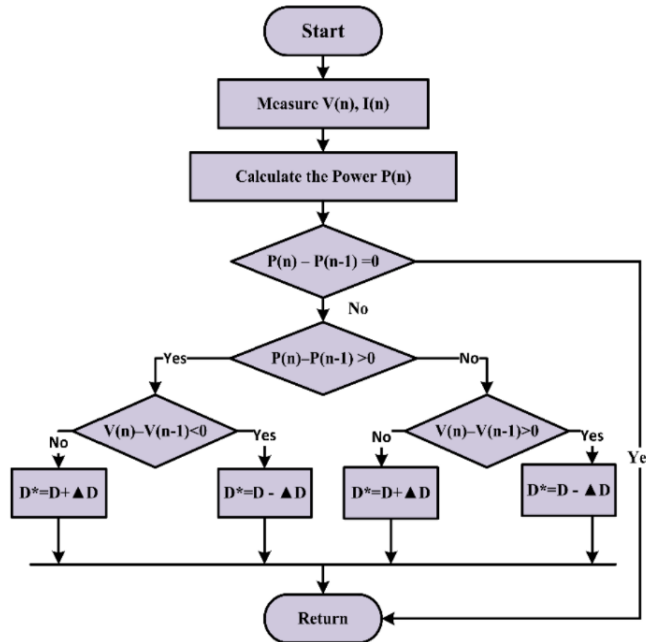
برای استخراج حداکثر توان از آرایه PV از الگوریتم انحراف و مشاهده (P&O) استفاده می شود. نحوه عملکرد الگوریتم P&O برای دستیابی به حداکثر توان آرایه PV با توجه به نمودار ولتاژ - توان آرایه PV مورد استفاده توضیح داده می شود. در شکل ۱ ناحیه تحت پوشش منحنی ولتاژ - توان به دو ناحیه تقسیم می شود. در ناحیه A هنگامی که نقطه کار سلول های فوتوولتائیک به سمت نقطه MPP جابجا می شود توان فوتوولتائیک بطور پیوسته افزایش پیدا می کند تا به نقطه MPP برسد. به عبارت دیگر در ناحیه A، افزایش ولتاژ فوتوولتائیک بطور مکرر باعث افزایش توان می گردد. بالعکس در ناحیه B، افزایش ولتاژ فوتوولتائیک باعث کاهش توان فوتوولتائیک می گردد.



شکل (۲): منحنی ولتاژ - توان فوتوولتائیک در شرایط استاندارد



الگوریتم (P&O) به گونه‌ای طراحی می‌شود تا پیوسته ولتاژ فوتولتائیک با یک گام معین تغییر داده شود تا اطلاعاتی از موقعیت فعلی نقطه کار به دست آید و در نهایت نقطه کار به سمت نقطه توان حداکثر واقعی هدایت شود. به دلیل طبیعت الگوریتم P&O می‌توان انتظار داشت که نقطه کار در نزدیکی نقطه توان بیشینه با میزان نوسان اندکی حفظ شود. پیاده سازی الگوریتم P&O ساده می‌باشد و مزیت این روش این است که به شدت تحت تاثیر نویز قرار نمی‌گیرد زیرا که این الگوریتم شامل هیچ گونه عملیات مشتق گیری نمی‌باشد. فلوجارت الگوریتم روش P&O در شکل ۲ نشان داده می‌شود.



شکل (۳): فلوجارت الگوریتم P&O

### ۳-۴ - تبدیل الکترونیکی موتور BLDC

با استفاده از یک تبدیل الکترونیکی، جریان مستقیم متقارن از باس DC اینورتر برای ۱۲۰ درجه کشیده می‌شود و در مرکز EMF مخالف قرار می‌گیرد. سه حسگر حال مجموعه‌ای از سیگنال‌های حال ( $H_3 - H_3$ ) را در فواصل ۶۰ درجه مطابق با موقعیت روتور تولید می‌کنند. با استفاده از یک مدار رمزگشا این سیگنال‌ها به شش پالس فرکانس اصلی ( $S'_1 - S'_6$ ) تبدیل می‌شوند که در ادامه با ترکیب با نسبت وظیفه MPPT، حالت‌های کلیدزنی اینورتر ولتاژ را تعیین می‌کنند. تنها دو پالس در هر لحظه روشن هستند که این امر منجر به کاهش تلفات هدایتی می‌شود. منطق رمزگشا برای تولید سیگنال‌های کموتاسیون موتور BLDC در جدول ۳ نشان داده شده است.

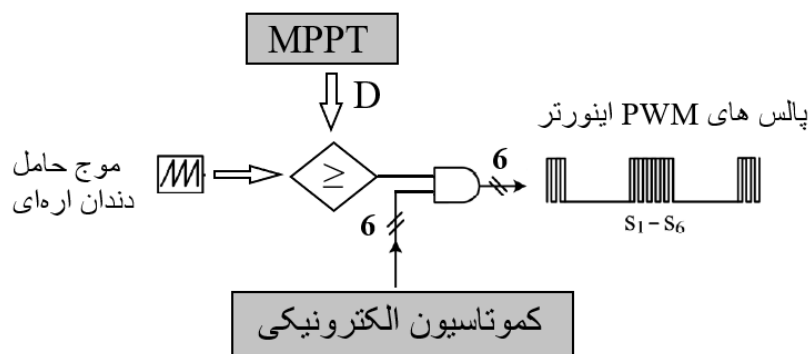
جدول (۳): سطوح کلیدزنی کموتاسیون الکترونیکی موتور

موقعیت روتور ( $\theta$ )	سیگنال‌های حال			حالت‌های کلیدزنی					
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$S'_1$	$S'_2$	$S'_3$	$S'_4$	$S'_5$	$S'_6$
۰-۶۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰
۶۰-۱۲۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰
۱۲۰-۱۸۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
۱۸۰-۲۴۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰
۲۴۰-۳۰۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱
۳۰۰-۳۶۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱



### ۳-۵- تولید پالس های کلید زنی اینورتر

پالس های لازم برای کلیدزنی اینورتر از ترکیب خروجی دو کنترل کننده ذکر شده به دست می آید. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نسبت و وظیفه  $D$  خروجی از قسمت  $MPPT$  با یک موج حامل دندان اره ای فرکانس بالا مقایسه می شود تا پالس فرکانس بالای  $PWM$  ساخته شود. برای تغییر مد دادن، ۶ پالس فرکانس اصلی  $S'1 - S'6$  خروجی، از کموتاسیون الکترونیکی یک مدار منطقی AND استفاده می شود. گیت منطقی AND پالس فرکانس بالای PWM و پالس فرکانس پایه ( $S'1$ ) را به عنوان ورودی دریافت می کند و در نهایت در خروجی، پالس کلیدزنی PWM ( $S1$ ) را برای سوئیچ بالایی ساق اول اینورتر فراهم می کند. به طور مشابه، پالس های کلیدزنی برای کلیدهای باقیمانده اینورتر با استفاده از گیت های AND تولید می شوند. سیگنال خروجی روشن (on) تنها در صورتی به وجود می آید که هر دو ورودی به گیت AND سیگنال روشن (on) باشند از این رو، گیت AND تنها دوره زمانی پالس on فرکانس پایه را با فرکانس موج دندان اره ای تغییر می دهد. بنابراین کنترل سیستم پمپاژ آب پیشنهادی با ترکیب الگوریتم  $MPPT$  و تبدیل الکترونیکی محقق می شود.



شکل (۴): تولید پالس های کلیدزنی اینورتر

### ۳-۶- کنترل سرعت موتور - پمپ BLDC

سرعت موتور BLDC با تنظیم ولتاژ باس DC در مقدار ولتاژ DC نامی موتور کنترل می شود. کنترل دو جهته جریان و توان، باعث تنظیم ولتاژ باس DC و در نتیجه تثبیت سرعت عملیاتی، قادر به ارائه مقدار کامل توان مورد نیاز موتور-پمپ برای پمپاژ آب با ظرفیت کامل است.

### ۳-۷- باتری و کنترل کننده شارژ و دشارژ

در این سیستم از باتری لیتیوم یونی با ولتاژ نامی  $96\text{ V}$  استفاده می شود. با توجه به اینکه در بدترین حالت کارکرد سیستم که تابش خورشید صفر است مقدار حدوداً  $7$  آمپر جریان از باتری کشیده می شود، باتری را به گونه ای انتخاب می کنیم که توانایی تغذیه موتور را به مدت  $20$  ساعت داشته باشد، بنابراین ظرفیت باتری از معادله (۵) محاسبه می شود.

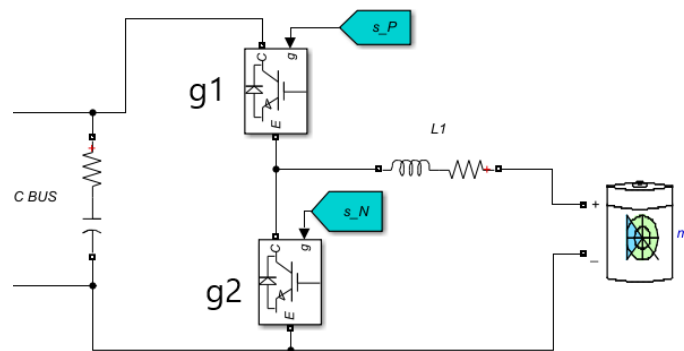
$$I_B = \frac{C}{N} \rightarrow C = I_B \times N = 7 \times 20 = 140 \text{ Ah} \quad (5)$$

در این معادله  $C$  ظرفیت باتری بر حسب آمپر ساعت،  $I_B$  جریان باتری و  $N$  زمان شارژ دهی باتری بر حسب ساعت است. در جدول ۴ مشخصات باتری نشان داده شده است.

جدول (۴): مشخصات باتری

پارامترها	مقادیر
Battery type	Lithium Ion
Nominal voltage (V)	۹۶
Rated capacity (Ah)	۱۴۰
Initial state of charge (%)	۵۰
Battery response time (sec)	۰/۱

باتری مطابق شکل ۴ از طریق یک مبدل دو جهته به باس DC متصل می‌شود. در حالت شارژ باتری، در حالت شارژ باتری، مبدل دو جهته به‌عنوان یک مبدل Buck عمل می‌کند و در حالت دشارژ باتری به‌عنوان یک مبدل Boost عمل می‌نماید.



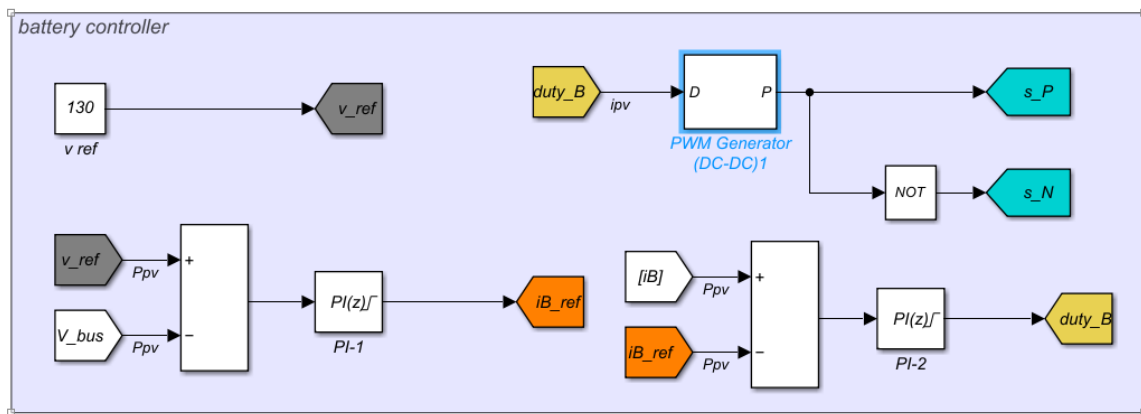
شکل (۵): مبدل باک و بوست دو جهته

برای مبدل مقدار سلف استفاده شده برابر است با  $0.5 \text{ mH}$  و مقاومت سری با آن  $0.1 \text{ اهم}$  است همچنین ظرفیت خازن لینک DC برابر با  $1/2 \text{ mH}$  است. با استفاده از کنترل کننده ولتاژ، ولتاژ باس DC (Vdc) در مقدار ولتاژ نامی موتور BLDC که برابر است با  $130 \text{ V}$ ، تنظیم می‌شود. جریان شارژ و دشارژ باتری  $ib$  با استفاده از کنترل کننده جریان، کنترل می‌شود. کنترل کننده تناسبی انتگرالی (PI) به‌عنوان تنظیم کننده جریان و ولتاژ استفاده می‌شود. تنظیم کننده جریان، نسبت وظیفه مربوطه را فراهم می‌کند که به پالس PWM برای مبدل دو جهته تبدیل می‌شود.

حالت عملکرد مبدل دو جهته توسط ولتاژ باس DC کنترل می‌شود. هنگامی که تابش خورشیدی کاهش می‌یابد یا در طول شب، یک افت در ولتاژ باس DC رخ می‌دهد. کنترل کننده، سطح ولتاژ را در مقدار تنظیم شده خود با عملکرد مبدل در حالت بوست حفظ کرده و توان را از باتری به باس DC می‌رساند؛ بنابراین در این حالت باتری را تخلیه می‌کند. در این حالت تنها سوئیچ  $g2$  روشن است و دیود معکوس سوئیچ  $g1$  مدار مبدل بوست را کامل می‌کند. در مقابل، زمانی که توان PV در دسترس است و پمپ مورد نیاز نیست و یا میزان توان تولیدی PV مازاد بر مقدار مورد نیاز است، در این حالت ولتاژ باس DC زیاد می‌شود. در این حالت مبدل با عملکرد در حالت باک و برقرار کردن جریان توان از باس DC به سمت باتری، ولتاژ را در مقدار تنظیم شده نگه می‌دارد. در این حالت سوئیچ  $g1$  روشن است و همزمان دیود معکوس سوئیچ  $g2$  مدار مبدل باک را کامل می‌کند. از سوی دیگر، باتری زمانی غیرفعال می‌شود که آرایه PV تنها توان کافی برای اجرای پمپ با ظرفیت کامل خود تولید کند. در این حالت شارژ و دشارژ باتری صورت نمی‌گیرد. بدین ترتیب در هر حالتی ولتاژ باس DC در  $130 \text{ V}$  حفظ می‌شود.

پالس های سوئیچ های مبدل متصل به باتری توسط کنترل کننده باتری تولید می‌شود. کنترل کننده شامل دو حلقه تنظیم کننده ولتاژ و تنظیم کننده جریان است. نحوه کار کنترل کننده به این شکل است که ابتدا مقدار ولتاژ مرجع  $130 \text{ V}$  که برابر با ولتاژ نامی موتور

است، به تنظیم کننده ولتاژ داده می‌شود که با ولتاژ باس DC مقایسه می‌شود و از طریق کنترل کننده تناسبی انتگرالی ( $PI^{10}$ ) سیگنال جریان مرجع تولید می‌شود. در ادامه جریان باتری با سیگنال جریان مرجع مقایسه و از طریق کنترل کننده PI بعدی نسبت وظیفه مورد نیاز برای بلوک PWM ساخته می‌شود که در انتها پالس های لازم برای کلیدزنی سوئیچ های مبدل دوجبهته تولید می‌شود. دیاگرام بلوکی کنترل کننده باتری، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): دیاگرام بلوکی کنترل کننده باتری

پارامتر های مربوط به کنترل کننده PI مربوط به تنظیم کننده ولتاژ و جریان که با روش آزمون و خطا به دست آمده‌اند، در جدول ۵ نشان داده شده است. فرکانس کلیدزنی بلوک PWM برابر با ۲۰ کیلو هرتز انتخاب می‌شود.

جدول (۵): پارامتر های مربوط به کنترل کننده های PI

پارامتر	حلقه کنترل ولتاژ PI	حلقه کنترل جریان PI
Kp ضریب تناسبی	۰/۸۵	۰/۱
Ki ضریب انتگرالی	۱۰	۵
Output Upper limit	-۸	۰/۹۵
Output Lower limit	-۸	۰

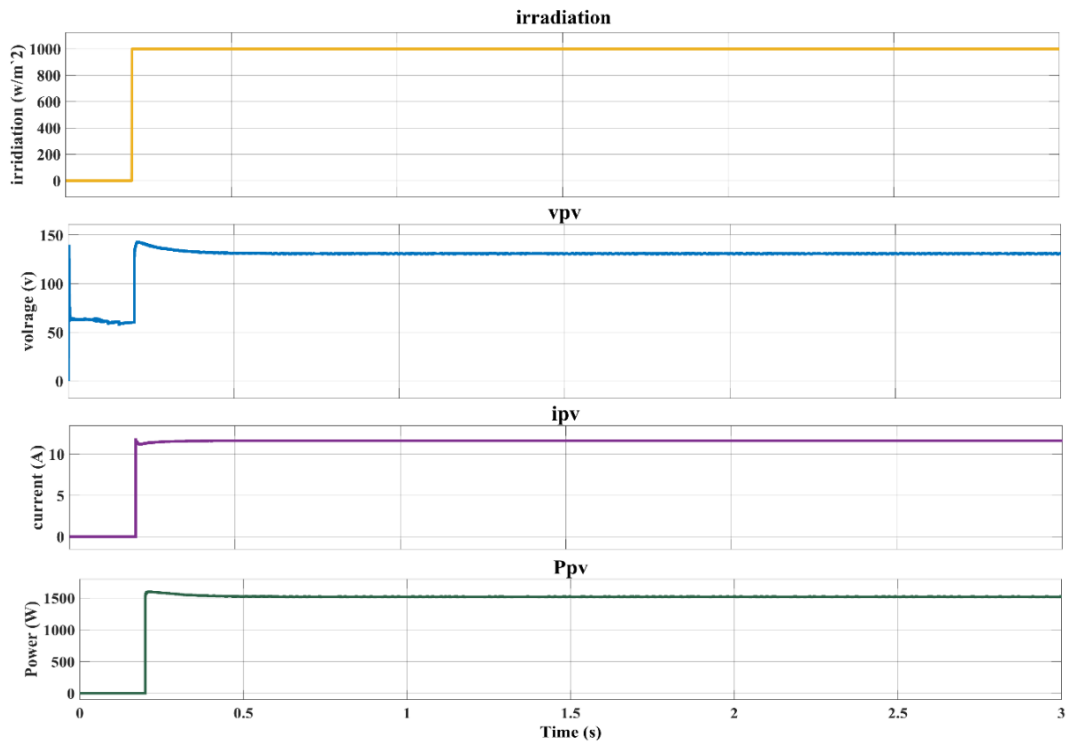
#### ۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش مدل شبیه سازی شده سیستم پمپاژ آب پیشنهادی در نرم‌افزار سیمولینک متلب اجرا شده و نحوه عملکرد سیستم در شرایط مختلف ارزیابی می‌شود. مواردی که مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل: عملکرد آرایه PV و MPPT، عملکرد کنترل کننده شارژ و دشارژ باتری و بررسی نقش باتری در سیستم کلی و بررسی عملکرد موتور پمپ BLDC و کارکرد مطلوب کنترل کننده موتور. ارزیابی عملکرد سیستم برای حالت های مختلف از جمله راه‌اندازی و حالت ماندگار، حالت گذرا و تغییرات لحظه‌ای در شرایط جوی انجام شده است.

##### ۴-۱- عملکرد در زمان راه اندازی و حالت ماندگار سیستم

برای بررسی عملکرد سیستم پمپاژ در زمان شروع به کار و حالت ماندگار، سیستم را در زمان تابش خورشید برابر با  $1000 W/m^2$  و در زمان بدون نور خورشید یعنی تابش  $0 W/m^2$  در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد شبیه سازی می‌کنیم. ابتدا سیستم را در تابش  $1000 W/m^2$  اجرا می‌کنیم. در شکل ۶ پارامتر های جریان، ولتاژ و توان مربوط به آرایه PV در تابش  $1000 W/m^2$  مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، ولتاژ و جریان PV در حالت پایدار به مقدار مطلوب می‌رسند و عملکرد سیستم MPPT مورد قبول است.

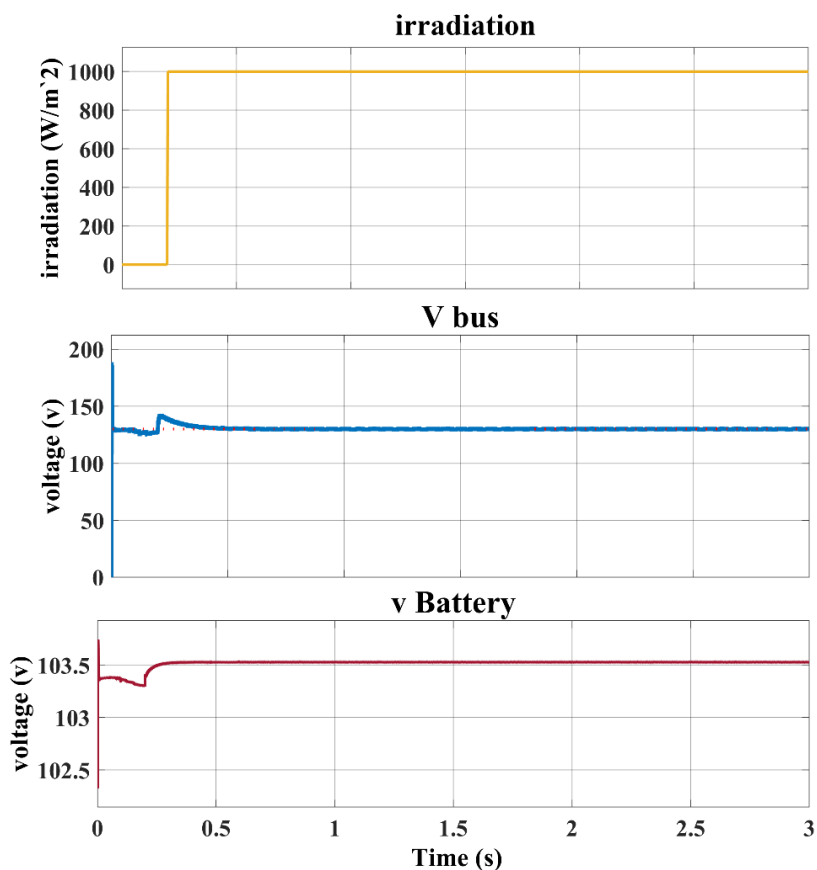




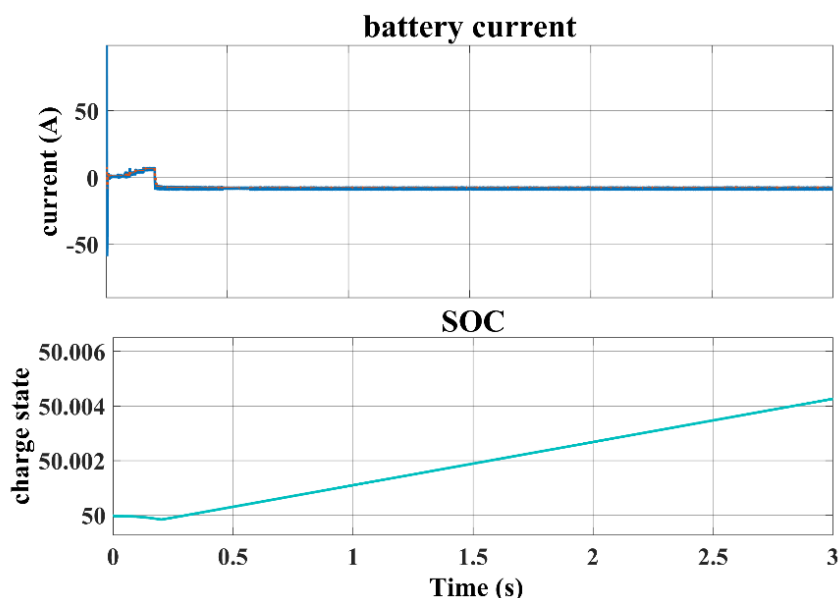
شکل (۶): پارامترها PV در حالت ماندگار تابش  $1000 \text{ W/m}^2$

در شکل ۷ پارامترهای مربوط به باتری و ولتاژ باس DC در حالت ماندگار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ولتاژ باس DC در حالت پایدار به مقدار مرجع  $130 \text{ V}$  می‌رسد و به همین شکل ولتاژ باتری نیز مقدار مطلوب را حفظ می‌کند. جریان باتری در حالت تابش  $1000 \text{ W/m}^2$  در شکل ۸ نشان داده شده، مشاهده می‌شود که در این حالت جریان باتری مقداری منفی است که به معنی شارژ شدن باتری است. در شکل ۸ نمودار سطح شارژ باتری ( $\text{SOC}^{11}$ ) نیز نشان می‌دهد که سطح شارژ از مقدار ۵۰ درصد اولیه بالاتر می‌رود و باتری در حال شارژ است. نتایج نشان می‌دهند که در این حالت کنترل کننده باتری عملکرد مناسبی دارد و تنظیم ولتاژ باس و شارژ باتری به درستی انجام می‌شود.

در شکل ۹ پارامترهای مربوط به موتور- پمپ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در حال تابش پایدار  $1000 \text{ W/m}^2$  هر یک از پارامترهای جریان استاتور، نیرو ضد محرکه استاتور (back EMF)، گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار مقدار مطلوبی دارند و سرعت موتور به مقدار مطلوب ۲۵۰۰ دور در دقیقه می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که در ابتدا سرعت موتور به آرامی افزایش می‌یابد و موتور شروع نرمی دارد. بنابراین عملکرد کنترل کننده موتور و کموتاسیون الکترونیکی در این حالت قابل قبول است.



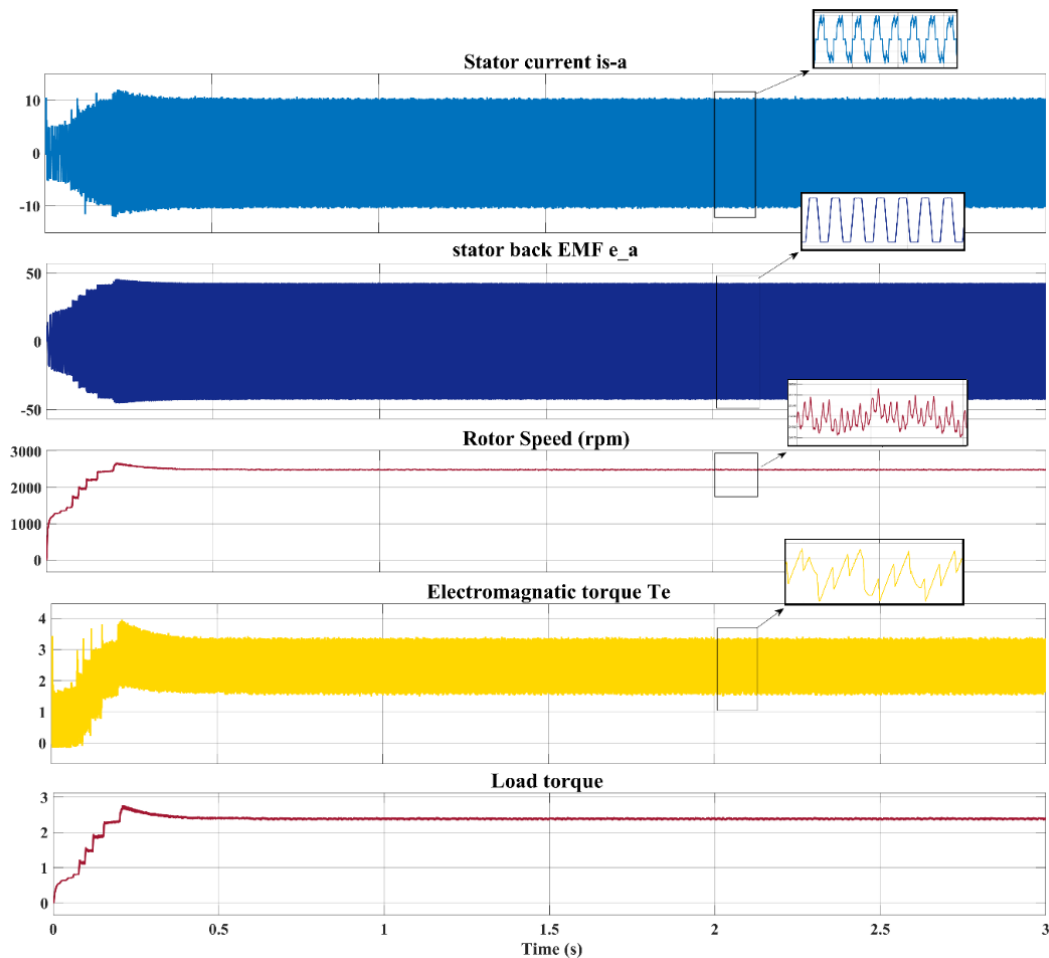
شکل (۷): ولتاژ باس DC و ولتاژ باتری در حالت پایدار  $1000 W/m^2$



شکل (۸): جریان باتری و سطح شارژ باتری در حالت پایدار  $1000 W/m^2$

همچنین سیستم بار دیگر برای طی شب و تابش  $W/m^2$ ، شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۱۰ پارامترهای باتری را برای حالت ماندگار در تابش صفر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ولتاژ باس در مقدار ۱۳۰۷ مرجع تنظیم شده است. در این حالت ولتاژ PV صفر است و باتری وظیفه تغذیه موتور پمپ را انجام می‌دهد، بنابراین جریان باتری مثبت است، که این امر در نمودار جریان باتری مشاهده می‌شود. حالت تخلیه باتری از شیب منفی نمودار SOC هم قابل مشاهده است.



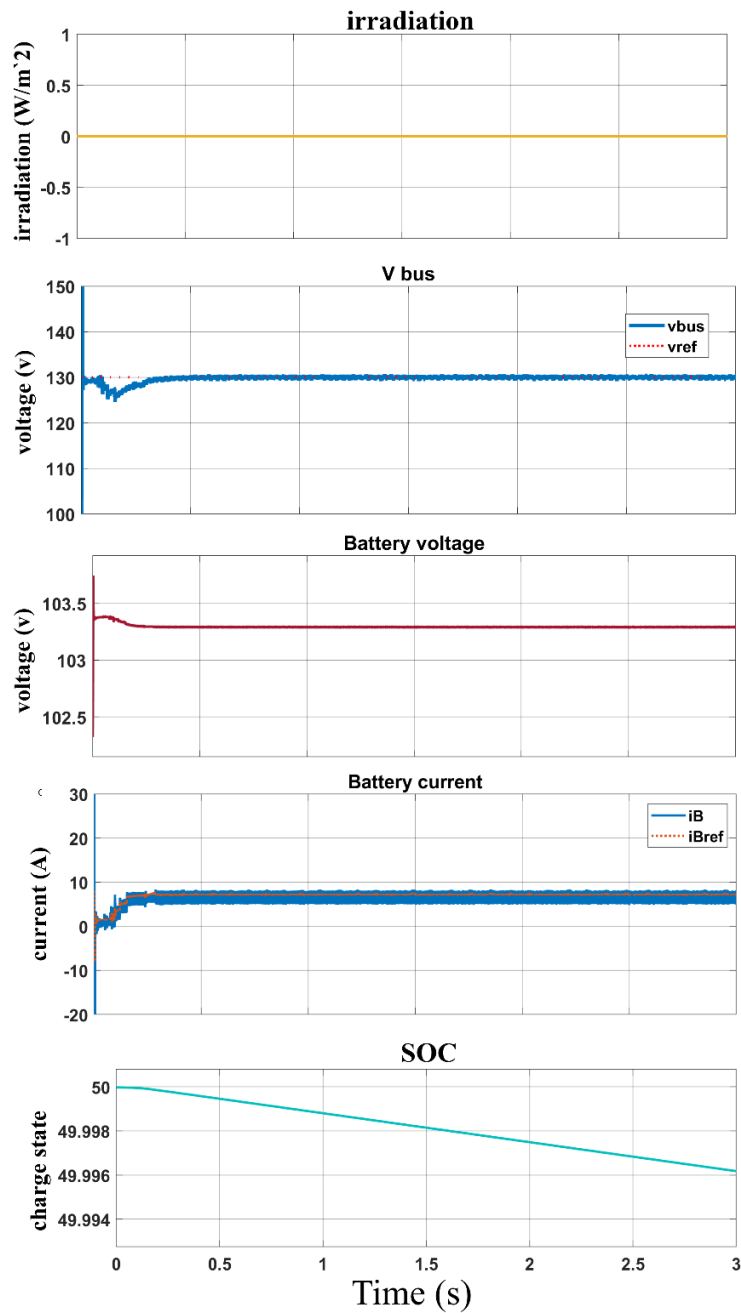


شکل (۹): ولتاژ باس DC پارامترهای مربوط به موتور BLDC در حالت ماندگار  $1000W/m^2$

با توجه به نتایج می‌توان فهمید که عملکرد سیستم در این حالت پایدار است و کنترل کننده باتری به درستی ولتاژ باس را در مقدار خواسته شده کنترل کرده است.

در شکل ۱۱ پارامترهای مربوط به موتور پمپ در تابش صفر نشان داده شده است. همه پارامترهای موتور، عملکرد مطلوب موتور در حالت تابش صفر را نشان می‌دهند. همچنین نمودار سرعت موتور نشان می‌دهد که موتور راه‌اندازی نرمی دارد و در حالت ماندگار مقدار سرعت ثابت می‌ماند. نتایج نشان می‌دهند که کنترل کننده سرعت موتور و کموتاسیون الکترونیکی در این حالت نیز عملکرد مناسبی دارند.

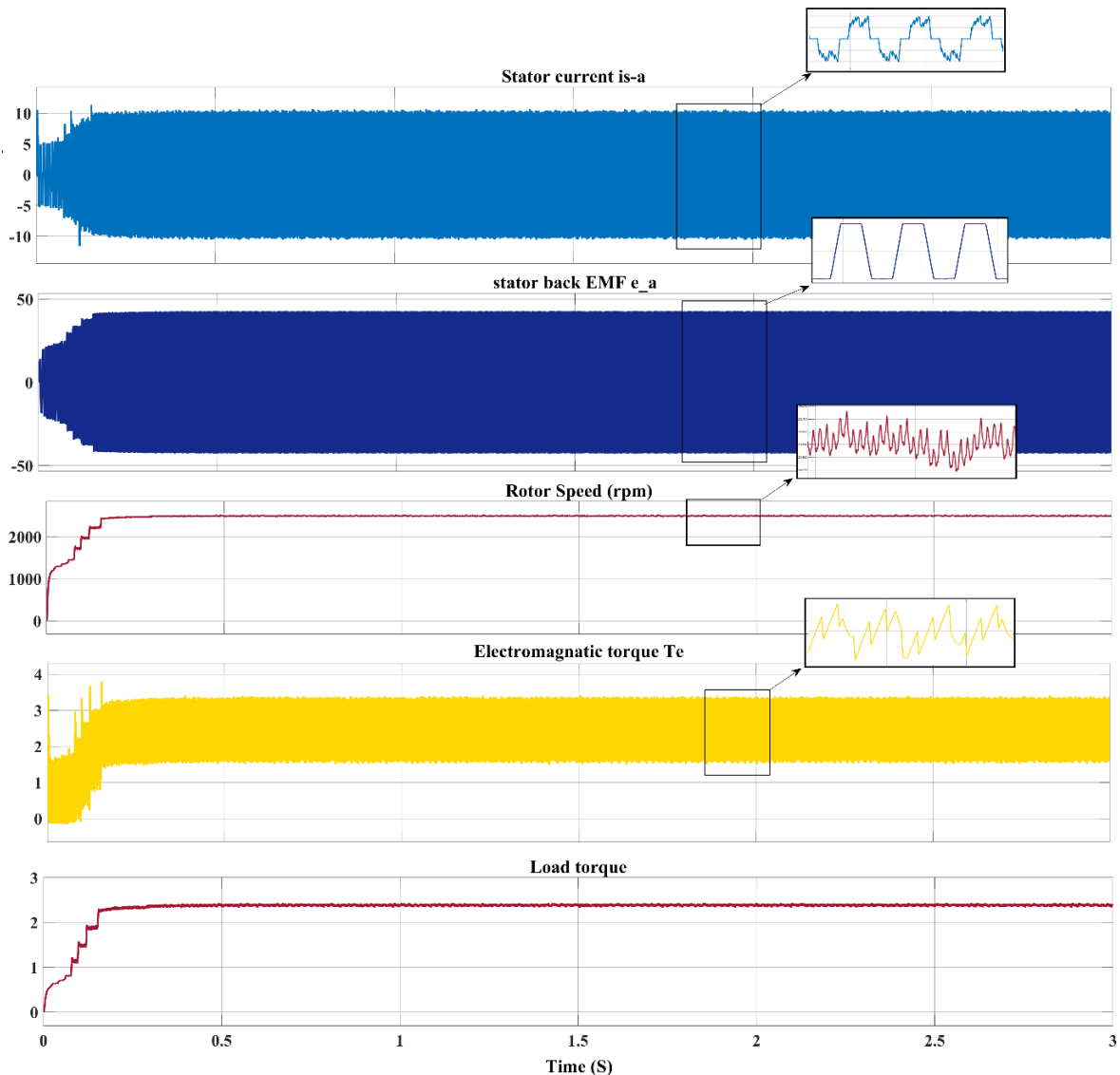
با توجه به نتایج شبیه‌سازی سیستم در حالت ماندگار، مشاهده می‌شود که در هر دو حالت تابش  $1000W/m^2$  و در طی شب و تابش صفر، هر کدام از بخش‌های سیستم از جمله آرایه PV و کنترل کننده MPPT، کنترل کننده باتری و موتور پمپ، عملکرد مطلوبی دارند.



شکل (۱۰): پارامترهای مربوط به باتری و ولتاژ باس در حالت ماندگار تابش  $W/m^2$ .

#### ۴-۲- عملکرد سیستم در زمان تغییرات تابش خورشید

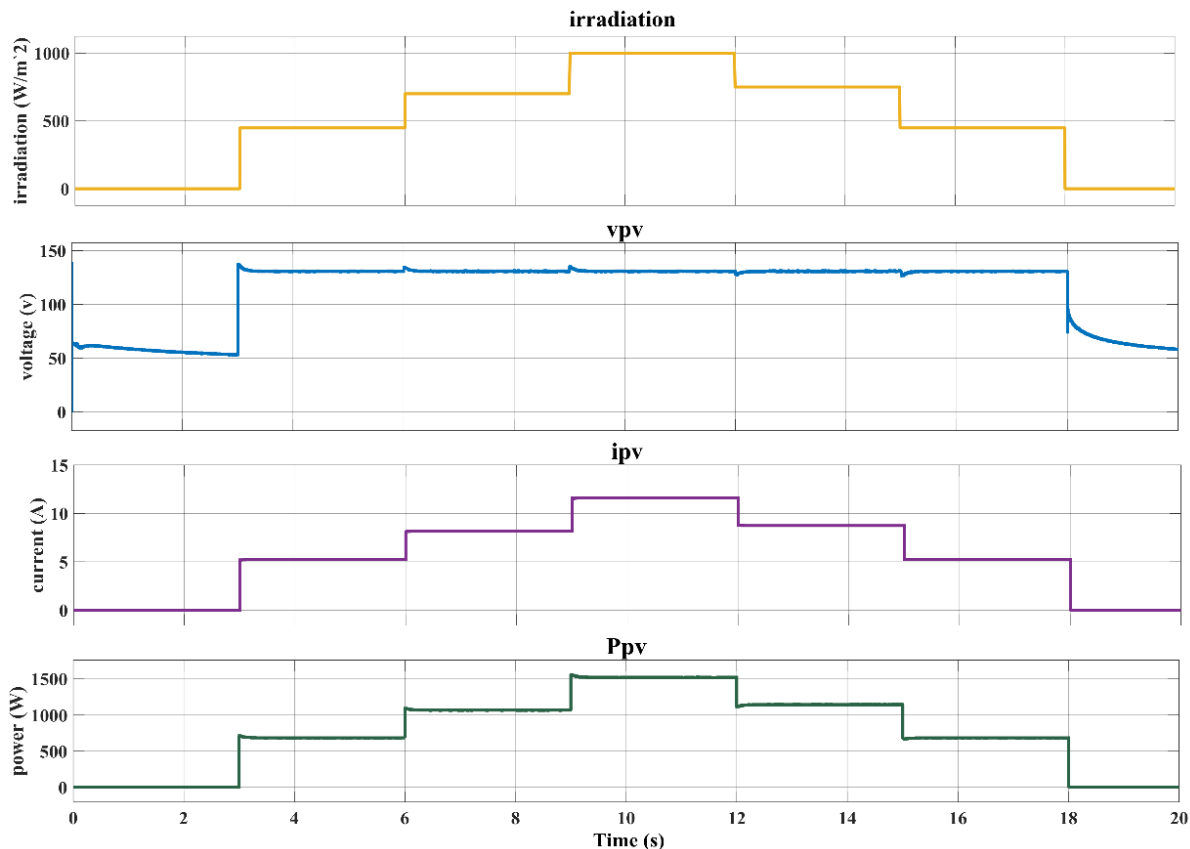
برای مشاهده عملکرد سیستم پیشنهادی، در حالت تغییرات تابش خورشیدی، سیستم را با فرض شروع به کار سیستم در تابش صفر و سپس تغییرات پله ای مقدار تابش، شبیه سازی می کنیم. به این منظور سیستم در آغاز، با مقدار تابش صفر شروع به کار می کند سپس در ثانیه ۳م، مقدار تابش به  $450 W/m^2$  افزایش می یابد. در ثانیه ۶م، مقدار تابش به  $700 W/m^2$  و در ثانیه ۹م به حداکثر تابش  $1000 W/m^2$  افزایش می یابد. بعد از افزایش پله ای مقدار تابش، در ثانیه ۱۲م به سطح  $750 W/m^2$  کاهش می یابد و به همین ترتیب در ثانیه ۱۵م و ۱۸م، به سطوح  $450 W/m^2$  و  $0 W/m^2$  کاهش می یابد.



شکل (۱۱): پارامترهای مربوط به موتور BLDC در حالت ماندگار تابش  $W/m^2$ .

شکل ۱۲ عملکرد آرایه PV را در این آزمایش نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، جریان PV همانطور که انتظار می‌رود در آغاز صفر است و هر چه مقدار تابش بیشتر می‌شود، جریان هم افزایش می‌یابد تا اینکه در مقدار تابش حداکثر به بیشترین جریان PV می‌رسیم. با کاهش سطح تابش خورشید، جریان نیز کاهش می‌یابد تا اینکه در مقدار تابش صفر، جریان نیز صفر می‌شود. به دلیل اینکه آرایه PV و باتری، هر دو به باس DC متصل اند، ولتاژ PV در مقدار تابش‌های بیشتر از صفر، ثابت نشان داده شده است که این امر به این دلیل است که حسگرهای ولتاژ در این حالت در حقیقت ولتاژ باس DC را نشان می‌دهند. توان آرایه PV نیز که متناسب با ولتاژ و جریان آرایه PV است، متناسب با تغییرات جریان تغییر می‌کند. با توجه به نتایج، می‌توان فهمید که سیستم کنترل کننده MPPT عملکرد مناسبی دارد و در زمان تغییرات تابش، قادر به ردیابی و دریافت حداکثر توان قابل دسترس از PV است.



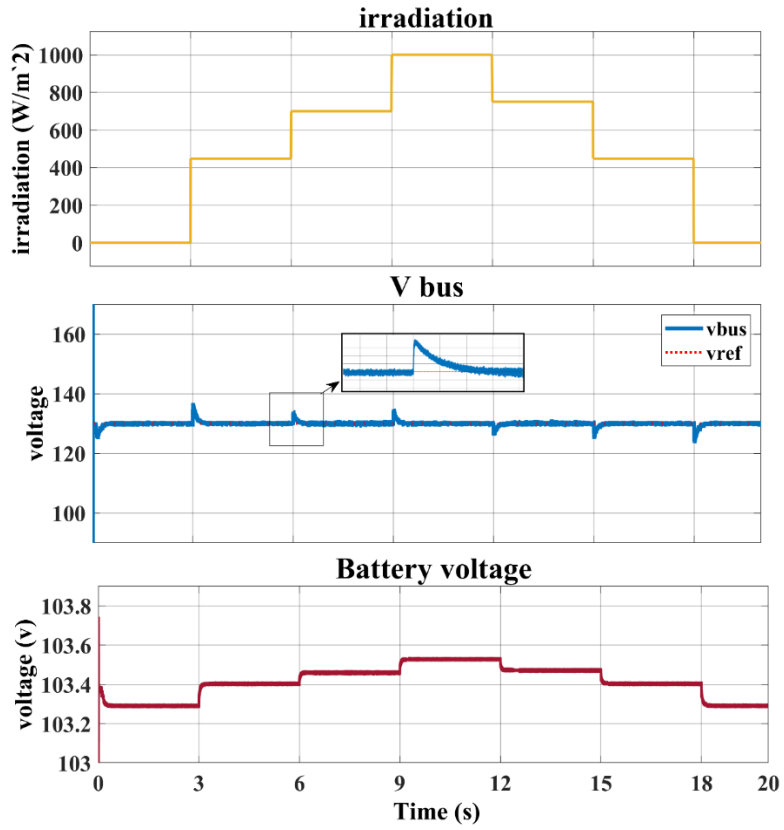


شکل (۱۲): پارامترهای مربوط به آرایه PV در زمان تغییرات تابش خورشید

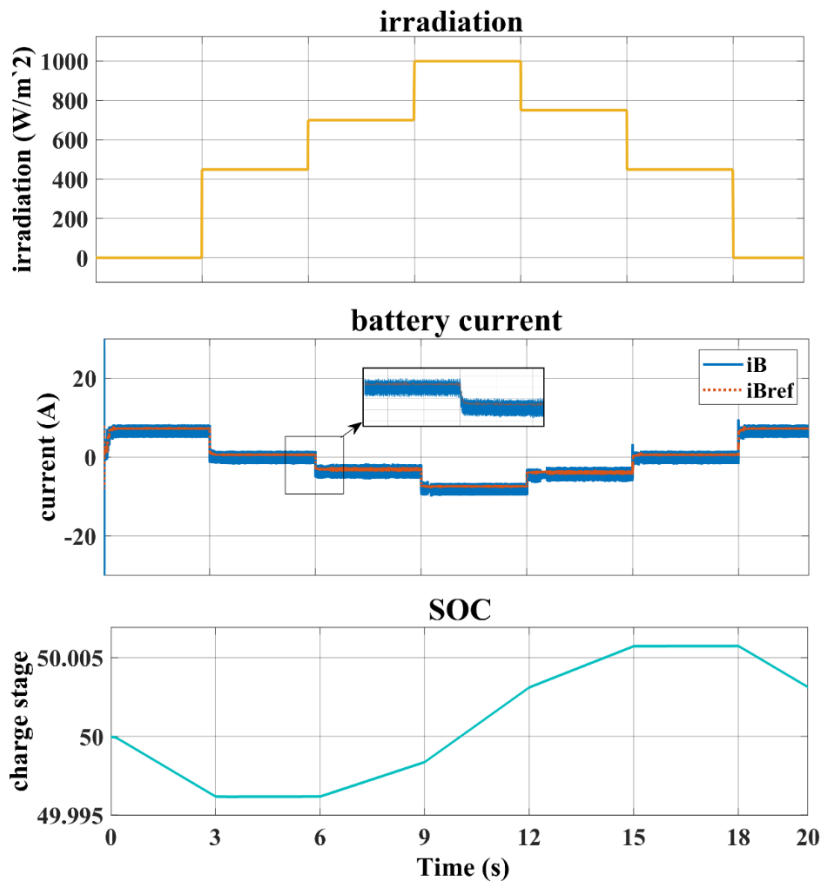
همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ولتاژ باس DC در طول زمان شبیه‌سازی و با وجود تغییرات تابش، در مقدار  $130V$  مرجع، حفظ می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که کنترل کننده باتری وظیفه تثبیت ولتاژ باس DC را در مقدار مرجع به خوبی انجام می‌دهد و در زمان تغییرات شرایط آب و هوا به خوبی می‌تواند با یک ریپل کوچک مقدار مورد نظر را دنبال کند.

در شکل ۱۴ نمودار جریان باتری و سطح شارژ باتری متناظر با تغییرات تابش خورشید نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود در ابتدا که تابش خورشید صفر است، باتری موتور را تغذیه می‌کند. در این حالت جریان باتری مثبت است که نشان می‌دهد که جریان از باتری کشیده می‌شود و باتری در حال دشارژ است؛ شیب منفی نمودار SOC نیز این موضوع را تایید می‌کند.

در گام بعدی، مقدار تابش خورشید به  $450 W/m^2$  افزایش می‌یابد. در این حالت مقدار انرژی تولیدی PV با مقدار انرژی مصرفی برابر است و جریان باتری به صفر می‌رسد و تخلیه باتری متوقف می‌شود. نمودار SOC نیز نشان می‌دهد که در ۳ ثانیه دوم از شبیه سازی سطح شارژ باتری ثابت می‌ماند.



شکل (۱۳): ولتاژ باس DC و باتری در زمان تغییرات سطح تابش خورشید

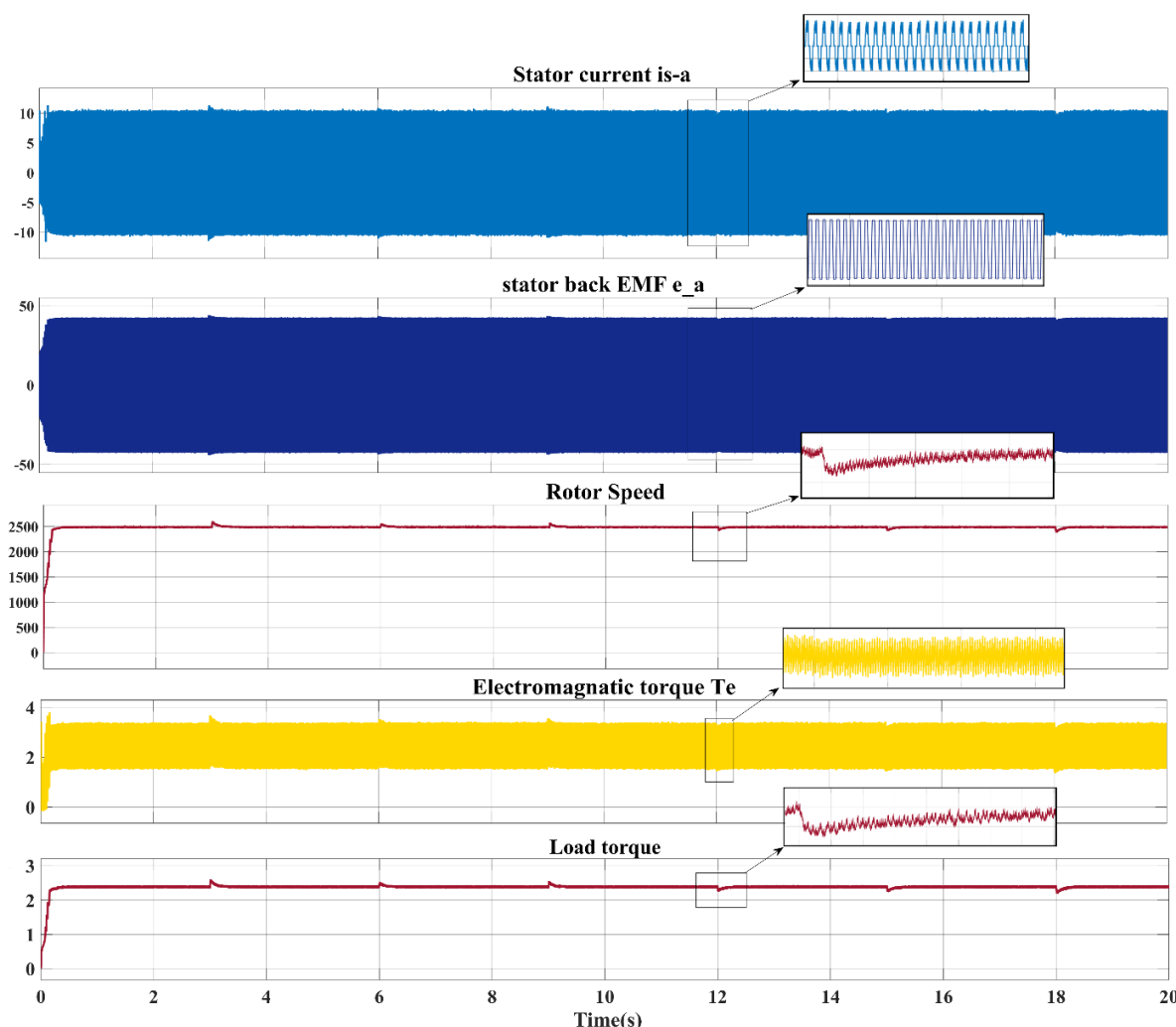


شکل (۱۴): پارامترهای مربوط به باتری در زمان تغییرات سطح تابش خورشید



در گام بعدی، تابش خورشیدی به  $700 W/m^2$  افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در این حالت مقدار توان  $PV$  از مقدار مورد نیاز موتور پمپ بیشتر است، مشاهده می‌شود جریان باتری از صفر به مقداری منفی می‌رسد که بیانگر آن است که باتری در حال شارژ شدن، شیب مثبت نمودار SOC نیز این امر را نشان می‌دهد؛ در گام بعدی سطح تابش به  $1000 W/m^2$  می‌رسد. در این حالت جریان باتری باتری بیشتر می‌شود و شیب نمودار SOC نیز تندتر می‌شود که به این معنی است که باتری با سرعت بیشتری شارژ می‌شود. در ادامه، با کاهش پله ای سطح تابش ابتدا سرعت شارژ باتری و مقدار جریان کاهش می‌یابد سپس، با کاهش بیشتر سطح تابش، جریان باتری صفر و شارژ باتری متوقف و در انتها با صفر شدن میزان تابش جریان باتری مثبت می‌شود و دوباره در حالت تخلیه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که کنترل کننده باتری در همه ی حالات افزایش و کاهش تابش خورشید، عملکرد مطلوبی دارد و کنترل کننده باتری به خوبی قادر به تنظیم ولتاژ باس DC در طول شبیه سازی و مدیریت توان است.

شکل ۱۵ پارامترهای مربوط به موتور BLDC را در زمان تغییرات سطح تابش خورشید نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود همه ی پارامترهای موتور مقادیر مجاز خود را حفظ کرده و تغییرات تابش خورشید منجر به اختلال در عملکرد موتور پمپ نشده است. سرعت موتور با وجود تغییرات تابش خورشید، در مقدار ۲۵۰۰ دور بر دقیقه کنترل شده است. بنابراین سیستم قادر به پمپاژ آب با حجم ثابت در همه ی شرایط، از حالت بدون نور خورشید گرفته تا بیشترین تابش ممکن است.



شکل (۱۵): پارامترهای مربوط به موتور BLDC در زمان تغییرات تابش خورشید

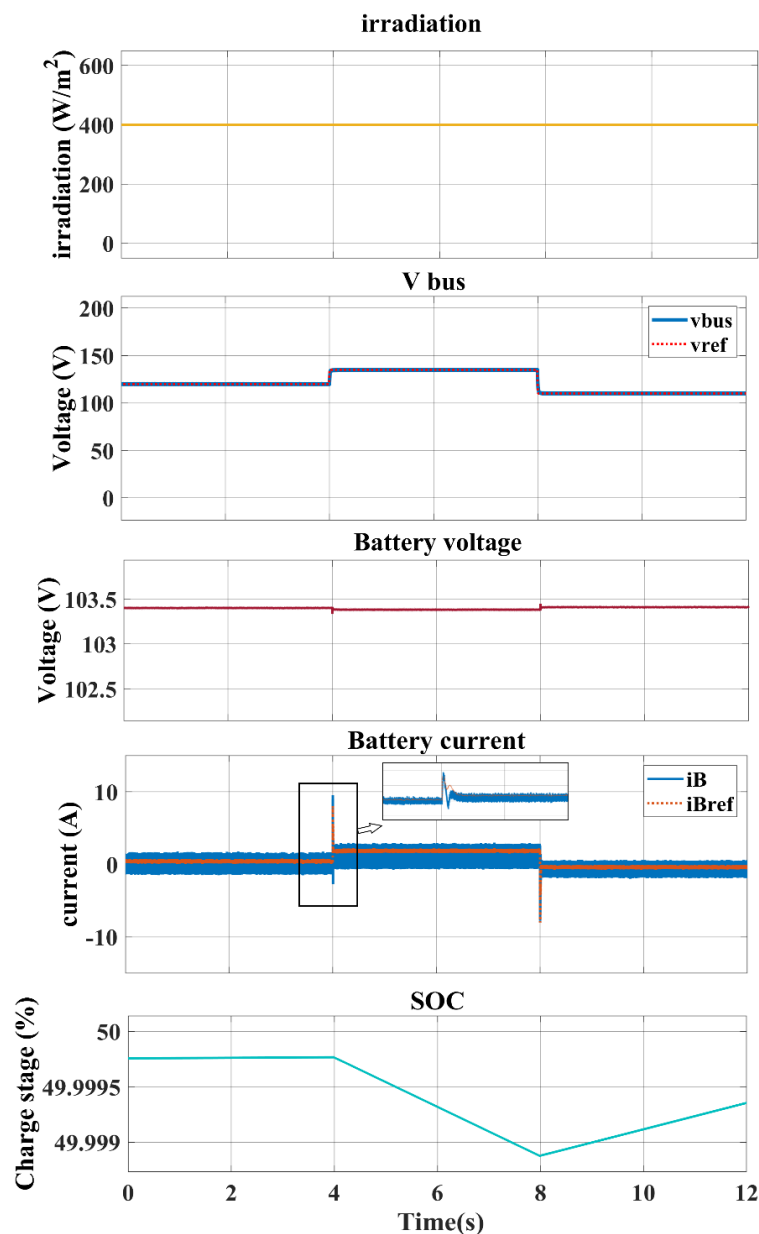
نتایج شبیه‌سازی در حالت دینامیک سیستم، نشان می‌دهد که همه ی اجزای سیستم، از جمله MPPT و کنترل کننده باتری و سرعت موتور، در زمان تغییرات سطح تابش قادر به حفظ عملکرد مطلوب سیستم پمپاژ هستند.



### ۳-۴- عملکرد سیستم در زمان تغییرات سرعت و گشتاور موتور پمپ

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم پمپاژ پیشنهادی در زمان تغییرات سرعت و گشتاور موتور پمپ، سرعت مرجع موتور، تغییر داده می‌شود. چون سرعت موتور از طریق ولتاژ باس DC کنترل می‌شود و همچنین میزان گشتاور پمپ وابسته به سرعت موتور است، انتظار می‌رود تغییر سرعت موتور، موجب تغییر گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار شود زیرا گشتاور پمپ متناسب با سرعت موتور و ضریب ثابت پمپ آب است.

برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم در این حالت، در مقدار تابش خورشید ثابت  $400 \text{ W/m}^2$ ، ابتدا سرعت را در  $2300 \text{ rpm}$  تنظیم می‌کنیم، سپس در ثانیه ۱۴ شبیه‌سازی، سرعت را به  $2500 \text{ rpm}$  افزایش می‌دهیم و در ثانیه ۸ آن را به  $2100 \text{ rpm}$  کاهش می‌دهیم. نمودارهای رفتار سیستم در این آزمایش در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، سطح تابش در طول شبیه‌سازی ثابت است و در دو گام مقدار ولتاژ مرجع تغییر داده می‌شود؛ با توجه به نمودار ولتاژ باس، مشاهده می‌شود که ولتاژ باس DC مقدار مرجع داده شده را به خوبی در هر دو حالت افزایش و کاهش دنبال می‌کند. در این حالت تغییرات ولتاژ باتری ناچیز است. نمودار جریان باتری نشان می‌دهد که در ابتدا جریان باتری صفر است و موتور فقط توسط PV تغذیه می‌شود.

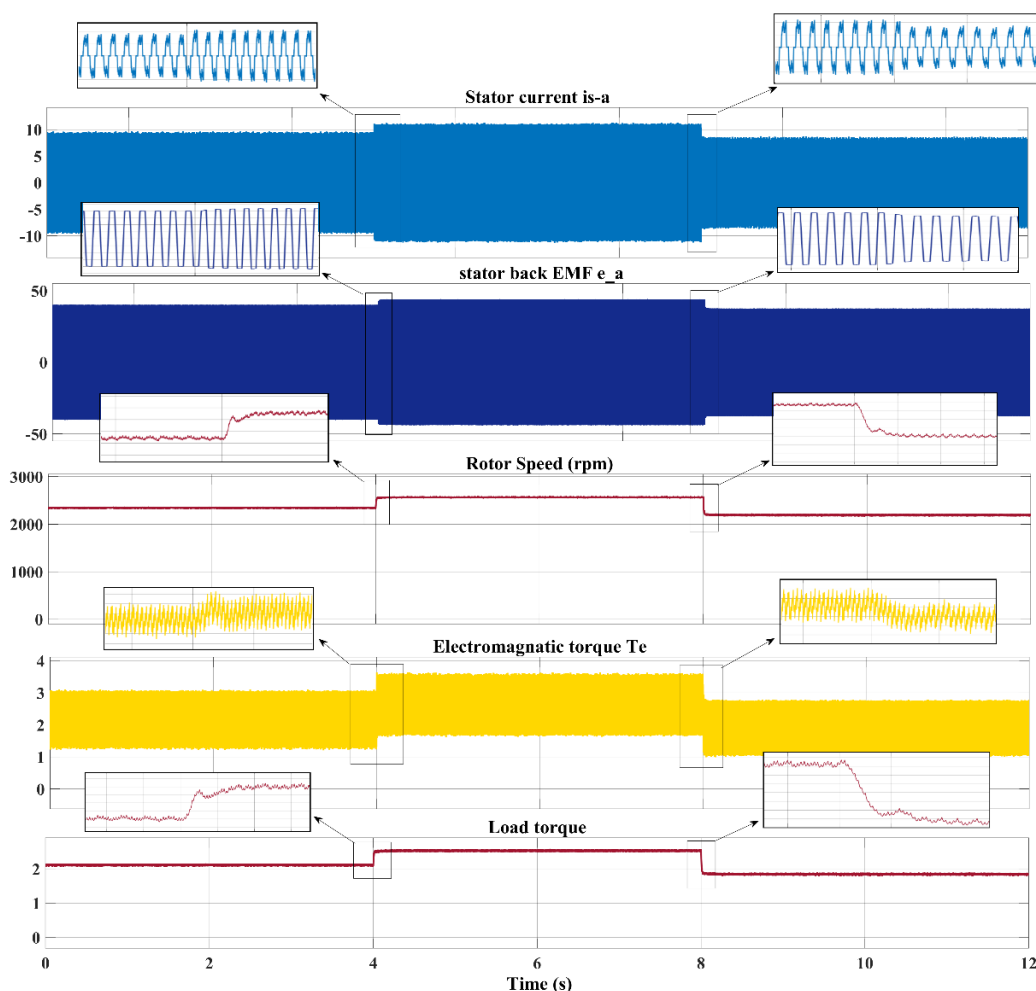


شکل (۱۶): ولتاژ باس DC و پارامترهای باتری در زمان تغییرات سرعت و گشتاور



در ثانیه ۱۴م، سرعت موتور افزایش می‌یابد و توان مصرفی نیز افزایش می‌یابد در این حالت جریان باتری تغییر می‌کند و مقدار آن مثبت می‌شود که به معنی حالت تخلیه باتری است؛ نمودار SOC نیز از سطح به شیب منفی تغییر می‌کند که تغییر مد کاری باتری را نشان می‌دهد. سپس در ثانیه ۱۸م، سرعت موتور کاهش می‌یابد و در نتیجه توان مصرفی نیز کمتر می‌شود؛ در این حالت مشاهده می‌شود که جریان باتری منفی می‌شود و شیب نمودار SOC هم به مثبت تغییر می‌کند که نشان دهنده تغییر حالت کاری باتری، از حالت دشارژ به شارژ است.

در شکل ۱۷ نمودار پارامترهای موتور پمپ در این حالت نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، موتور در هنگام افزایش سرعت عملکرد مناسبی دارد و در این حالت جریان استاتور و نیروی ضد محرکه استاتور با افزایش ولتاژ باس، افزایش می‌یابند. با افزایش سرعت، گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار نیز افزایش می‌یابند. در گام بعدی شبیه سازی در ثانیه ۱۸م، مشاهده می‌شود که با کاهش ولتاژ باس، مقدار پارامترهای موتور از جمله سرعت نیز کاهش می‌یابند و به نسبت گشتاور نیز کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سیستم پمپاژ در زمان تغییرات سرعت و گشتاور پمپ نیز مناسب است و سیستم کنترل کننده قادر است تغییرات سرعت را در هر دو حالت افزایش و کاهش به خوبی دنبال کند.



شکل (۱۷): پارامترهای مربوط به موتور BLDC در زمان تغییرات سرعت و گشتاور



## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم پمپاژ هیبرید خورشیدی با پشتیبانی باتری ارائه شد. در این سیستم، از موتور BLDC برای تغذیه پمپ استفاده شده است، برای کنترل سرعت موتور BLDC، از سیگنال سنسور های هال داخلی موتور برای تولید سیگنال های مورد نیاز برای کلیدزنی اینورتر، از طریق کموتاسیون الکترونیکی استفاده شده است.

ساختار سیستم پیشنهادی از نظر مراحل تبدیل توان، از نوع یک سطحی است و آرایه PV از طریق همان اینورتری که متصل به موتور پمپ است، به منظور دریافت بیشترین توان در دسترس، کنترل می شود و مبدل اضافی استفاده نشده است.

در این مقاله از باتری های لیتیوم یونی برای پشتیبانی سیستم و مدیریت انرژی استفاده شده است. نتایج شبیه سازی سیستم پمپاژ پیشنهادی نشان داد که سیستم قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به سیستم های پمپاژ مرسوم دارد. مدیریت انرژی در این سیستم به گونه ای است که در زمانی که میزان انرژی تولیدی PV از مقدار مورد نیاز برای پمپاژ پمپ بیشتر است، در باتری ذخیره می شود و در مواقعی که تابش آفتاب کاهش می یابد استفاده می شود و از اتلاف انرژی جلوگیری می شود. سیستم پیشنهادی، قادر است در هنگام کاهش نور خورشید در هوای ابری و در طی شب پمپاژ آب را به خوبی انجام دهد. عبور لحظه ای ابر ها نیز که باعث توقف مکرر در سیستم های بدون باتری می شود در عملکرد سیستم پیشنهادی اختلالی ایجاد نمی کند. همچنین سیستم قادر است در زمان تغییرات سرعت موتور و گشتاور بار، عملکرد مناسبی ارائه دهد که به معنی این است که با تغییر شرایط کاری سیستم پمپاژ مانند ارتفاع پمپاژ، سیستم عملکرد مناسبی دارد. یکی از مزایای مهم سیستم پیشنهادی کنترل سرعت موتور در مقدار مطلوب بدون توجه به تغییرات تابش خورشید است که امکان پمپاژ آب با حجم ثابت را فراهم می کند. همچنین سایه های گذرا ناشی از عبور برگ درختان و یا ناشی از عبور سریع ابر ها در عملکرد سیستم پیشنهادی اختلالی ایجاد نمی کند.

## مراجع

- [1] M. Aliyu, G. Hassan, S. A. Said, M. U. Siddiqui, A. T. Alawami, and I. M. Elamin, "A review of solar-powered water pumping systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 87, pp. 61-76, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.010.
- [2] A. Kiprono and A. I. Llarío, "Solar Pumping for Water Supply: Harnessing solar power in humanitarian and development," *Rugby, UK: Practical Action Publishing*, 2020, doi: 10.3362/9781780447810.
- [3] D. H. M. T. Khatib, "Introduction," in *Photovoltaic Water Pumping Systems*. USA: Academic Press, 2021, ch. Chapter 1, pp. 1-4.
- [4] M. Tvaronavičienė, J. Baublys, J. Raudeliūnienė, and D. Jatautaitė, "Global energy consumption peculiarities and energy sources: Role of renewables," in *Energy transformation towards sustainability*: Elsevier, 2020, pp. 1-49, doi: 10.1016/B978-0-12-817688-7.00001-X.
- [5] S. Angadi, U. R. Yaragatti, Y. Suresh, and A. B. Raju, "Comprehensive review on solar, wind and hybrid wind-PV water pumping systems-an electrical engineering perspective," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 1-19, 2021, doi: 10.24295/CPSS/PEA.2021.00001.
- [6] G. S. Chandrakant and S. Patil, "Designing of controller for BLDC driven solar water pump," in *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 2021, pp. 390-393, doi: 10.1109/ICICT50816.2021.9358629.
- [7] D. Mohanraj *et al.*, "A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 54833-54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [8] B. Singh and R. Kumar, "Solar photovoltaic array fed water pump driven by brushless DC motor using Landsman converter," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 474-484, 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0295.
- [9] R. Kumar and B. Singh, "BLDC motor-driven solar PV array-fed water pumping system employing zeta converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2315-2322, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2522943.



- [10] R. Kumar and B. Singh, "Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 1377-1385, 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2699918.
- [11] S. Sashidhar, V. G. P. Reddy, and B. Fernandes, "A single-stage sensorless control of a PV-based bore-well submersible BLDC motor," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 1173-1180, 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2810506
- [12] P. Jena, "A single stage solar PV Fed BLDC motor using ANN based MPPT for water pumping," in *2019 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)*, 2019: IEEE, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCECE44727.2019.9001901.
- [13] E. E. A. Zahab, A. M. Zaki, and M. M. El-sotouhy, "Design and control of a standalone PV water pumping system," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 322-337, 2017, doi: 10.1016/j.jesit.2016.03.003.
- [14] S. Anuphapparadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong, and N. Ketjoy, "Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application," *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 352-358, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.167.
- [15] L. da Silva Lima *et al.*, "Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101286, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101286.

زیر نویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Photovoltaics  
<sup>2</sup> Maximum power point tracking  
<sup>3</sup> Brushless direct current motor  
<sup>4</sup> Voltage source inverter  
<sup>5</sup> Artificial neural network  
<sup>6</sup> Perturb and observe  
<sup>7</sup> Roration per minute  
<sup>8</sup> Maximum power point  
<sup>9</sup> Pulse-width modulation  
<sup>10</sup> Proportional and Integral  
<sup>11</sup> State of charge

