

## درایو موتور DC بدون جاروبک با استفاده از سیستم هایبرید پنل خورشیدی - مبدل لنزمن - باتری

بابک اله وردی نژاد<sup>۱</sup>، رضا کاظمی گل خندان<sup>۲</sup>، حسین ترکمن<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، B.Allahverdi@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> دکتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، Reza.kazemi@birjand.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، H\_Torkaman@sbu.ac.ir

### چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای کنترل موتور DC بدون جاروبک در پمپ آبرسانی از طریق سیستم هایبرید پنل خورشیدی - مبدل لنزمن و باتری - مبدل دوطرفه ارائه شده است. انرژی لازم برای موتور از سلول خورشیدی و باتری پشتیبان تأمین می شود. مبدل لنزمن وظیفه ردیابی نقطه بیشینه توان در خروجی پنل خورشیدی و تثبیت مقدار ولتاژ لینک DC در ورودی اینورتر موتور DC بدون جاروبک را برعهده دارد. باتری به همراه مبدل دوطرفه، تأمین اختلاف بین توان تزریقی به لینک dc از سمت پنل خورشیدی و توان مورد نیاز موتور را برعهده دارد. با توجه به تغییرات تابش در طول شبانه روز، بکارگیری سیستم هایبرید پنل خورشیدی - مبدل لنزمن و باتری - مبدل دوطرفه امکان تأمین ولتاژ ثابت و همچنین توان مورد نیاز موتور پمپ آبرسانی را در شرایط مختلف جوی فراهم می سازد. در زمانی که تابش بیشتر از میزان مورد نیاز باشد، باتری انرژی اضافی تولیدی پنل خورشیدی را در خود ذخیره می کند و در شرایط سایه و نیم سایه با کاهش توان خروجی پنل، باتری دشارژ شده و اختلاف توان را تأمین می کند. شبیه سازی سیستم مورد نظر به منظور ارزیابی کارکرد آن در این مقاله انجام و نتایج آن بطور کامل مورد بررسی قرار گرفته اند.

### واژه های کلیدی

مبدل دوطرفه، درایو پمپ آبرسانی، سیستم پنل خورشیدی، مبدل لنزمن، موتور DC بدون جاروبک

### مقدمه

دستورالعمل امروزه یکی از موانع اصلی در توسعه مناطق روستایی، کمبود انرژی الکتریکی و هزینه های زیاد تأمین انرژی در این مناطق است. بعضی از این مناطق از شبکه سراسری دور هستند و انتقال انرژی الکتریکی به آنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در مناطق با پتانسیل انرژی خورشیدی مناسب با توجه به وجود روزهای خورشیدی زیاد در سال، راه اندازی سیستم های فتوولتائیک با استقبال خوبی مواجه شده است [۱]. یکی از مهمترین کاربردهای سیستم فتوولتائیک، تأمین انرژی الکتریکی پمپ های آبرسانی در مناطق دور از شبکه سراسری برق، با تعداد روزهای آفتابی زیاد در سال، است. با

توجه به استفاده پمپ های آبرسانی در زمین های کشاورزی در تمامی طول روز، تأمین انرژی مورد نیاز آنها صرفاً از انرژی خورشیدی امکان پذیر نیست. به همین دلیل منبع تأمین توان پشتیبان مورد نیاز است. استفاده از باتری به عنوان منبع تأمین انرژی مورد نیاز در زمان هایی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست و یا سطح پایینی دارد گزینه مناسبی برای این موضوع است.

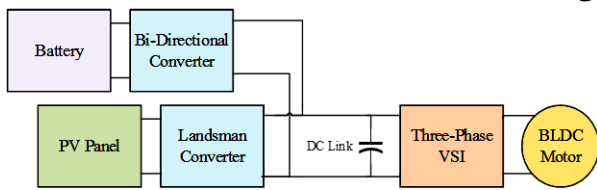
معمولاً موتورهای القایی سه فاز به علت بازده بالا، هزینه کم، استحکام، قابلیت دسترسی بهتر و هزینه پایین نگهداری به نسبت موتورهای DC، در کاربردهایی از قبیل پمپ های آبرسانی مورد استفاده قرار می گیرند [۲ و ۳]. با این وجود، استفاده از موتورهای القایی در کنار سلول های خورشیدی با مشکلاتی از جمله سختی کنترل و داغ کردن به علت سطح ولتاژ پایین همراه است [۴]. موتورهای DC بدون جاروبک علاوه بر بازده بیشتر، مزایایی از قبیل قابلیت اطمینان بالاتر، تداخل مغناطیسی کمتر، کنترل راحت تر، درایو ساده تر و قابلیت کار در ولتاژهای پایین تر را دارا می باشند [۵]. از این رو استفاده از موتور DC بدون جاروبک برای پمپ آبرسانی متصل به سلول خورشیدی، در مواردی که دسترسی به شبکه سراسری برق میسر نیست، گزینه بهتری نسبت به موتورهای القایی است.

به منظور استحصال بیشینه توان از سلول های خورشیدی ضروری است که مبدل هایی برای ردیابی نقطه بیشینه توان به کار گرفته شوند. روش های مختلفی برای ردیابی نقطه بیشینه توان وجود دارند [۶-۱۰]. اصلی ترین مزیت این روش ها قابلیت بکارگیری آنها هنگام شرایط خاص مانند تغییرات دینامیک سطح تابش و سایه اندازی نسبی است. البته نبایستی پیچیدگی، محاسبات و هزینه پیاده سازی زیاد این روش ها نادیده گرفته شوند [۱۱ و ۱۲]. در بین روش های مرسوم، در این مقاله روش آشفته و رعایت، P&O<sup>۱</sup>، برای ردیابی نقطه بیشینه توان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، بصورت ساده پیاده سازی می شود و دارای سرعت همگرایی بالایی در رسیدن به نقطه بیشینه توان است [۱۳].

مبدل های مختلفی که توانایی ردیابی نقطه بیشینه توان را بر عهده دارند به عنوان رابط بین پنل خورشیدی و اینورتر منبع ولتاژ مورد استفاده قرار می گیرند ولی می توان گفت مبدل های باک - بوست

<sup>1</sup> Perturb and observe

توان مورد نیاز در زمان هایی که انرژی خورشیدی به حد کافی نیست، می باشد.

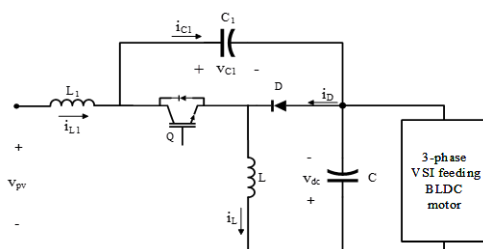


شکل ۱: شمای کلی طرح پیشنهادی

با توجه به اینکه هارمونیک های روی نیروی محرکه الکتریکی برگشتی<sup>۲</sup>، در گشتاور موتور خودشان را نشان می دهند و تولید رپیل گشتاور می کنند، تعبیه خازن لینک DC در جلوگیری از وقوع این رپیل موثر می باشد.

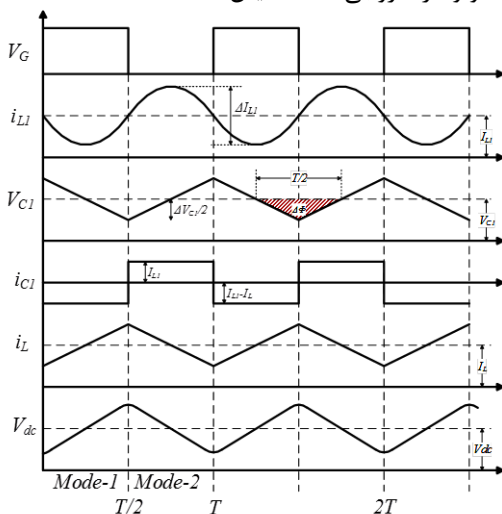
### عملکرد مبدل لنزمن

مبدل لنزمن در شکل ۲، به گونه ای طراحی شده است که همواره در ناحیه پیوسته هدایت کار کند. عملکرد مداری این مبدل با توجه به وضعیت کلید الکترونیک قدرت آن به دو حالت کلید روشن و کلید خاموش تقسیم می شود.



شکل ۲: مبدل لنزمن

در شکل ۳ به ترتیب ولتاژ اعمالی برای قطع و وصل کردن کلید مبدل با توجه به سیکل کاری در نظر گرفته شده برای آن، تغییرات جریان سلف  $L_1$ ، تغییرات ولتاژ خازن  $C_1$ ، تغییرات جریان خازن  $C_1$ ، جریان سلف  $L$  و ولتاژ خروجی  $V_{dc}$  نمایش داده شده اند.



شکل ۳: شکل موج های مبدل لنزمن

بهترین انتخاب برای این مورد هستند [۱۴ و ۱۵]. توپولوژی مبدل DC-DC باک-بوست قابلیت ردیابی نقطه بیشینه توان در سلول های فتوولتائیک را فارغ از دما، میزان تابش و بار متصل فراهم می کند اما جریان ورودی این مبدل بصورت ناپیوسته است. این ناپیوستگی بدلیل قرارگیری کلید الکترونیک قدرت به صورت سری با سلول های خورشیدی می باشد.

مبدل لنزمن، یکی از توپولوژی های مبدل DC-DC، می تواند محدودیت مبدل های باک-بوست را برطرف نماید [۱۶] و همچنین این قابلیت را دارد تا در سیستم های پمپاژ آب با تغذیه از سلول های خورشیدی بکار گرفته شود [۱۷]. از این رو در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

در سیستم ارائه شده برای درایو موتور DC بدون جاروبک در این مقاله، مبدل لنزمن به منظور ردیابی نقطه بیشینه توان و تثبیت مقدار ولتاژ لینک DC در ورودی اینورتر موتور DC بدون جاروبک بکار گرفته شده است. مبدل به گونه ای طراحی شده است که برای هر سطحی از تابش، در حالت پیوسته جریان کار کند. مجموعه باتری-مبدل دو طرفه که بصورت موازی با مبدل لنزمن قرار گرفته است اختلاف بین توان تزریقی به لینک dc از سمت پنل خورشیدی و توان دریافتی توسط موتور را تأمین می کند. در حالتی که توان تولیدی پنل خورشیدی بیشتر از توان مورد نیاز موتور باشد، باتری توسط مبدل دوطرفه شارژ می شود. در حالتی که توان تزریقی از طرف پنل خورشیدی کمتر از توان مورد نیاز باشد، باتری با دشارژ شدن تأمین کسری توان مورد نیاز را انجام می دهد. به منظور کنترل موتور DC بدون جاروبک در پمپ آبرسانی، از روش کنترل گشتاور موتور استفاده شده است.

در قسمت دوم این مقاله، طرح پیشنهادی به صورت کلی مطرح و شمای آن آورده شده است. در قسمت سوم، عملکرد مبدل لنزمن در حالت های مختلف کاری بررسی شده و روابط مربوطه استخراج شده اند. در بخش چهارم الگوریتم کنترلی سیستم ارائه شده در سه قسمت ردیابی نقطه بیشینه توان، کنترل مبدل دو طرفه و کنترل موتور DC بدون جاروبک مطرح و توضیح داده شده است. طراحی سیستم مورد بررسی جهت شبیه سازی در قسمت پنجم انجام شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی در قسمت ششم آورده شده اند. قسمت هفتم اختصاص به نتیجه گیری دارد.

### طرح پیشنهادی

شکل ۱ شمای کلی طرح پیشنهادی را نشان می دهد. این طرح شامل پنل خورشیدی، مبدل لنزمن، باتری، مبدل دوطرفه، اینورتر و موتور DC بدون جاروبک است. پنل خورشیدی به عنوان منبع تغذیه در سیستم مورد نظر می باشد. با کنترل اینورتر منبع ولتاژ، درایو موتور DC بدون جاروبک در سیستم مورد نظر انجام می شود. وجود خازن لینک DC به منظور تأمین ولتاژی ثابت در ورودی اینورتر منبع ولتاژ می باشد. باتری به همراه مبدل دوطرفه هم تکمیل کننده فرایند تأمین

<sup>2</sup> Back Electro motive force (Back- EMF)  
ICEMG 2020، ۱۳۹۸ اسفند ۷-۸

ریپل جریان در سلف  $L_1$

محاسبه ریپل جریان سلف ورودی،  $I_{L1}$ ، با توجه به شکل موج نشان داده شده برای  $I_{L1}$  در شکل ۳، انجام می شود. ناحیه سایه زده شده در شکل موج  $V_{C1}$ ، شار اضافی  $\Delta\Phi$  را نشان می دهد. مقدار پیک تا پیک ریپل جریان سلف  $L_1$  از طریق (۱) بدست می آید.

$$\Delta I_{L1} = \frac{\Delta\Phi}{L_1} = \frac{1}{L_1} \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{C1} T}{2} \quad (1)$$

زمانی که کلید خاموش است، جریان خازن  $C_1$ ،  $i_{C1}$ ، از طریق (۲) محاسبه می شود.

$$i_{C1} = I_{L1} = C_1 \frac{\Delta V_{C1}}{(1-D)T} \quad (2)$$

که  $D$  نشان دهنده سیکل کاری و  $T$  بیانگر دوره تناوب کلیدزنی در مبدل مورد بررسی است. ریپل ولتاژ  $C_1$ ،  $V_{C1}$ ، از طریق (۳) محاسبه می شود.

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_{L1}}{C_1} (1-D)T \quad (3)$$

با جایگذاری مقدار  $\Delta V_{C1}$  از (۳) در (۱)، (۴) بدست می آید.

$$\Delta I_{L1} = \frac{1}{L_1} \frac{1}{2} \frac{I_{L1}}{2C_1} (1-D)T \frac{T}{2} \quad (4)$$

با ساده سازی (۴)، (۵) بدست می آید.

$$\Delta I_{L1} = \frac{1}{8L_1C_1} \frac{I_{L1}(1-D)}{f_{sw}^2} \quad (5)$$

رابطه (۵) با جایگزینی مقدار دوره تناوب کلیدزنی با معکوس فرکانس کلید زنی،  $f_{sw}$ ، بدست می آید. ورودی و خروجی مبدل لنزمن مطابق (۶) به یکدیگر مرتبط می باشند [۱۸].

$$I_{L1} = \frac{D}{(1-D)} I_{dc} \quad (6)$$

$I_{dc}$  جریان خروجی مبدل لنزمن است که در سیستم مورد بررسی به عنوان ورودی اینورتر منبع ولتاژ می باشد. در نهایت با ادغام (۵) و (۶)، مقدار سلف مورد نیاز جهت دستیابی به جریان مدنظر در خروجی مبدل، با در نظر گرفتن مقدار مجاز ریپل جریان سلف، از طریق (۷) بدست می آید.

$$L_1 = \frac{DI_{dc}}{8\Delta L_1 C_1 f_{sw}^2} \quad (7)$$

ملاحظه می شود که مقدار سلف مورد نظر به صورت مستقیم با سیکل کاری و جریان خروجی مبدل لنزمن و بصورت معکوس با ریپل جریان سلف، مقدار خازن  $C_1$  و فرکانس کلیدزنی مبدل وابستگی دارد.

### الگوریتم کنترلی در سیستم مورد بررسی

الگوریتم کنترلی در سیستم مورد بررسی شامل دو بخش است. بخش اول مربوط به تثبیت ولتاژ لینک DC می شود. در بخش دوم، کنترل موتور DC بدون جاروبک صورت می پذیرد. برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC، از مبدل لنزمن استفاده شده است. مبدل لنزمن وظیفه ردیابی نقطه بیشینه توان را در شرایط مختلف جوی به عهده دارد و بسته به میزان تابش و دمای محیط، لینک DC را با ولتاژی ثابت تغذیه می کند. تأمین توان مورد نیاز موتور به صورت پایدار در شرایط مختلف آب و هوایی با کمک باتری - مبدل دوطرفه میسر

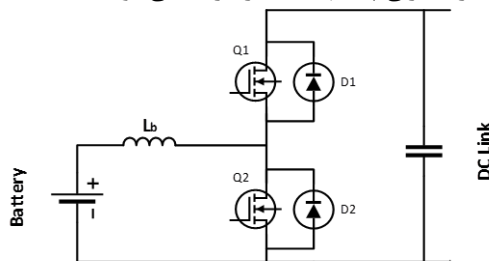
می شود. اختلاف توان تزریقی به لینک DC و توان دریافتی توسط موتور توسط باتری - مبدل دوطرفه تأمین می شود. در صورتیکه توان تزریقی بیشتر از توان دریافتی باشد، باتری شارژ می شود و در حالت عکس، با دشارژ باتری، کسری توان تولیدی پنل خورشیدی رفع می شود. در این کنترل، ولتاژ لینک dc به عنوان معیاری برای تعیین حالت شارژ یا دشارژ باتری پشتیبان در تأمین توان مورد نیاز موتور بکار گرفته می شود.

ردیابی نقطه بیشینه توان

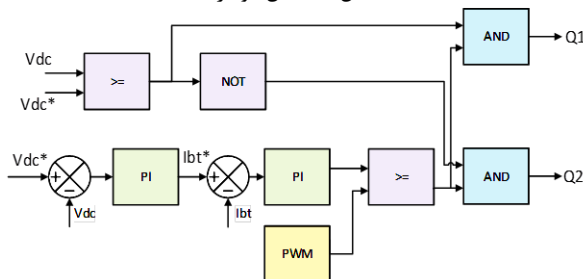
برای ردیابی نقطه بیشینه توان، روش آشفته و رعایت، P&O، بکار گرفته شده است. اساس روش آشفته و رعایت بر ایجاد آشفستگی بر ولتاژ و مشاهده توان خروجی است که در صورت افزایش توان، آشفستگی را در همان مسیر نگه می دارد و در صورت کاهش توان، آشفستگی بعدی را معکوس می کند. روش موفق آشفته و رعایت بدون نیاز به پارامترهای سلول خورشیدی، نقطه بیشینه توان را ردیابی می کند.

کنترل مبدل دوطرفه

شکل های ۴ و ۵ به ترتیب نمایش دهنده مبدل دوطرفه و مدار کنترلی آن می باشند. زمانی که ولتاژ لینک DC ( $V_{dc}$ ) از ولتاژ مرجع ( $V_{dc}^*$ ) بیشتر باشد، کلید  $Q_1$  فعال شده و مبدل دوطرفه در حالت کاهنده عمل می کند (حالت شارژ باتری). زمانی که ولتاژ لینک DC ( $V_{dc}$ ) از ولتاژ مرجع ( $V_{dc}^*$ ) کمتر باشد، کلید  $Q_2$  فعال شده و مبدل دوطرفه در حالت افزایش دهنده عمل می کند (حالت دشارژ باتری). دو کنترل کننده PI در مدار کنترلی پیشنهادی بکار گرفته می شوند.



شکل ۴: مبدل دوطرفه



شکل ۵: مدار کنترلی مبدل دوطرفه

کنترل موتور DC بدون جاروبک

شکل ۶ بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل موتور DC بدون جاروبک سه فاز را نشان می دهد. این بلوک دیاگرام معمولاً از یک اینورتر، یک جدول کلیدزنی و یک فیدبک از سرعت و موقعیت رتور تشکیل شده

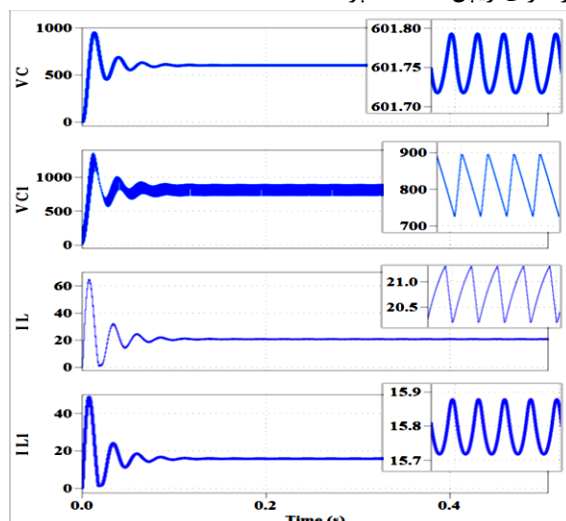
جدول ۲: مشخصات ماژول خورشیدی

| پارامتر           | مقدار  | پارامتر                | مقدار  |
|-------------------|--------|------------------------|--------|
| توان بیشینه       | 125 W  | ولتاژ نقطه بیشینه توان | 17.7 V |
| ولتاژ مدار باز    | 22 V   | جریان نقطه بیشینه توان | 7.07 A |
| جریان اتصال کوتاه | 7.78 A | تعداد سلول هر ماژول    | 36     |

آرایه خورشیدی مدنظر شامل ۲ رشته ۱۲ تایی از ماژول‌هایی با مشخصات جدول ۲ است.

### نتایج شبیه‌سازی

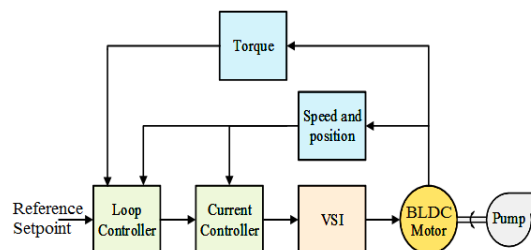
از نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی در این بخش آورده شده‌اند. در ابتدا، نتایج شبیه‌سازی مبدل لنزمن ارائه می‌شوند. شکل ۱۰، ولتاژ خازن‌ها و جریان سلف‌های مبدل لنزمن را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود ولتاژ خازن  $C_1$ ،  $V_{C1}$ ، حول مقدار  $601.76$  ولت دارای ریبیل  $0.3\%$  ولت می‌باشد در صورتی که ولتاژ خازن  $C$ ،  $V_C$ ، حول مقدار  $810$  ولت دارای ریبیل  $85$  ولت است. تغییرات جریان سلف  $L_1$ ،  $I_{L1}$  حول مقدار  $20.8$  آمپر دارای ریبیل  $0.7\%$  آمپر و تغییرات جریان سلف  $L$ ،  $I_L$  حول مقدار  $15.8$  آمپر دارای ریبیل  $0.8\%$  آمپر است.



شکل ۷: شکل موج ولتاژ خازن‌ها و جریان سلف‌های مبدل لنزمن

به منظور بررسی رفتار سیستم در شدت تابش‌های مختلف، فرض می‌شود که شدت تابش در بازه زمانی شبیه‌سازی دارای دو تغییر سطح باشد. در ثانیه  $0.3$  پس از شروع شبیه‌سازی، شدت تابش از مقدار  $600$  وات بر متر مربع به مقدار  $1000$  وات بر متر مربع افزایش می‌یابد. پس از آن در ثانیه  $0.6$  از زمان شبیه‌سازی، شدت تابش دچار کاهشی به میزان  $600$  وات بر متر مربع شده و مقدار آن به  $400$  وات بر متر مربع می‌رسد. شکل ۸ ولتاژ لینک DC را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با وجود کاهش و افزایش میزان تابش،

سیستم کنترل موتور DC بدون جاروبک در حلقه بیرونی کنترل، نقش محرک را ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، هدف از کنترل موتور DC بدون جاروبک عموماً تولید گشتاور مناسب برای حلقه بیرونی سیستم کنترل است.



شکل ۶: مدار کنترلی موتور DC بدون جاروبک

### طراحی سیستم پیشنهادی

قسمت‌های مختلف سیستم باید به گونه‌ای طراحی شوند که در برابر تغییرات پاسخ قابل قبولی ارائه دهند. در ادامه پارامترهای طراحی شده برای سیستم شرح داده می‌شوند.

#### طراحی مبدل لنزمن

مبدل لنزمن بایستی به گونه‌ای طراحی شود که همواره در حالت جریان پیوسته کار کند. مقادیر طراحی مبدل در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱: مقادیر المان‌های مبدل لنزمن

| پارامتر                      | مقدار       | پارامتر         | مقدار        |
|------------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| ولتاژ لینک DC قبل از اینورتر | 600 V       | $\Delta V_{C1}$ | 20%          |
| ولتاژ خروجی آرایه خورشیدی    | 212 V       | $\Delta V_C$    | 4%           |
| توان اینورتر                 | 3 KW        | $\Delta I_{L1}$ | 3%           |
| فرکانس کلیدزنی               | 20 KHZ      | $\Delta I_L$    | 3%           |
| سلف $L$                      | 7.2 mH      | سلف $L_1$       | 6.8 mH       |
| سیکل کاری                    | 73%         | خازن $C_1$      | 1.25 $\mu F$ |
| خازن $C$                     | 100 $\mu F$ |                 |              |

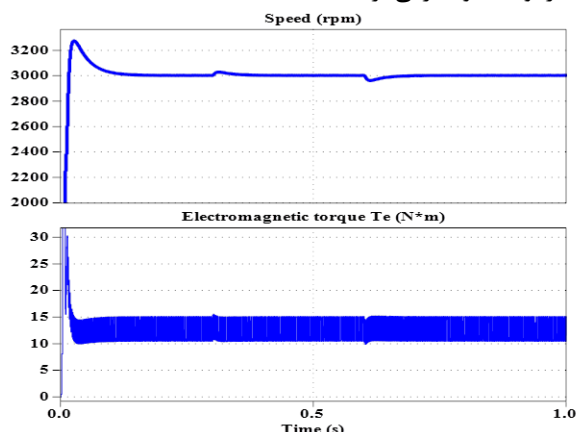
#### مشخصات باتری و مبدل دوطرفه

در سیستم مورد بررسی از یک باتری لیتیوم-یونی با ولتاژ نامی  $350$  ولت استفاده شده است. همچنین اندازه سلف مبدل دو طرفه نیز  $8$  میلی هانری است و فرکانس کلیدزنی مبدل  $20$  کیلوهرتز است.

#### مشخصات پنل خورشیدی

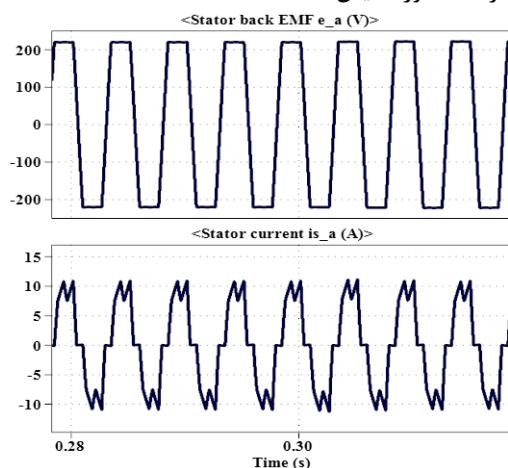
مقادیر پارامترهای هر یک از ماژول‌های خورشیدی بکار رفته در آرایه خورشیدی مورد استفاده، در جدول ۲ بیان شده‌اند.

۱۲/۵ نیوتون متر است. با توجه به تغییرات بوجود آمده در شدت تابش در ثانیه‌های ۰،۳ و ۰،۶، مقادیر سرعت و گشتاور دچار تغییراتی می‌شوند که با توجه به سیستم کنترل در نظر گرفته شده سریعاً به مقدار اولیه خود بازمی‌گردند.

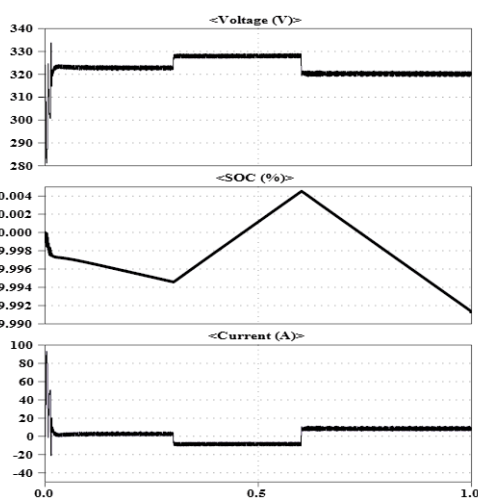


شکل ۱۰: سرعت و گشتاور موتور DC بدون جاروبک

در شکل ۱۱ به ترتیب نمودارهای نیروی محرکه الکتریکی برگشتی و جریان فاز a استاتور نمایش داده شده‌اند.



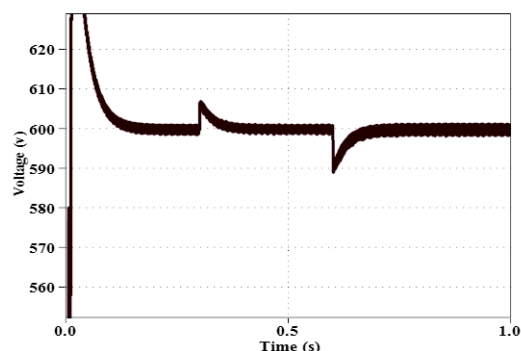
شکل ۱۱: نیروی محرکه الکتریکی برگشتی و جریان فاز a استاتور



شکل ۱۲: ولتاژ، میزان شارژ و جریان باتری در بازه زمانی شبیه‌سازی

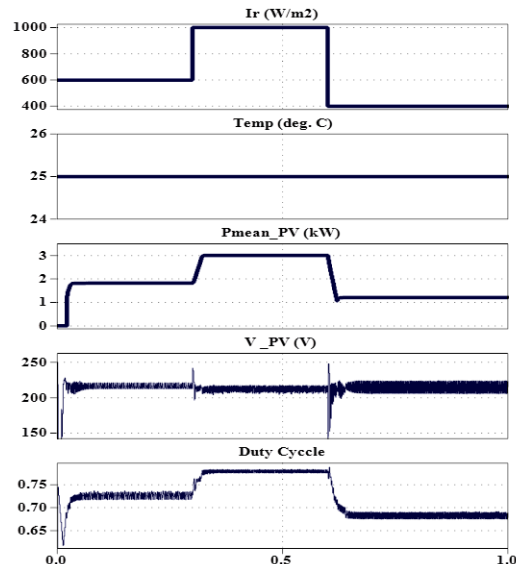
شکل ۱۲: ولتاژ، میزان شارژ و جریان باتری را در طول زمان شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، از زمان شروع

سیستم کنترلی توانسته است به خوبی ولتاژ لینک DC را در ۶۰۰ ولت ثابت نگه دارد.



شکل ۱۳: ولتاژ لینک DC

با توجه به شکل ۹ ملاحظه می‌شود که پس از اعمال تغییرات در شدت تابش، مبدل لنزمن با تغییر در سیکل کاری خود، به تغییرات ایجاد شده تابش پاسخ می‌دهد و به این ترتیب ولتاژ تقریباً ثابتی را در خروجی فراهم می‌کند. دما در شرایط کاری در سیستم مورد بررسی، ۲۵ درجه سلیسیوس در نظر گرفته شده است.



شکل ۹: خروجی‌های پنل خورشیدی

با توجه به شکل مربوط به سیکل کاری مشخص است که در ابتدای زمان شبیه‌سازی سیکل کاری دارای مقدار ۰،۷۳ است تا بتواند با تقویتی که در مبدل لنزمن به وقوع می‌پیوندد، ولتاژ خروجی آرایه خورشیدی را به سطح ولتاژ تحویل برای اینورتر منبع ولتاژ برساند. با تغییر اول در شدت تابش، مقدار سیکل کاری به ۰،۷۸ ارتقا می‌یابد و پس از تغییر دوم در شدت تابش، مقدار سیکل کاری به ۰،۶۸ تنزل می‌یابد.

شکل ۱۰ نمایش‌دهنده شکل موج‌های سرعت و گشتاور موتور DC بدون جاروبک در شرایط کاری در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۴ مشخص است که سرعت و گشتاور موتور در حین کارکرد، با وجود وقوع تغییرات در شدت تابش، مقادیر نامی خود را دنبال می‌کنند. سرعت بر روی ۳۰۰ دور در دقیقه ثابت شده است و گشتاور نیز

- [4] Singh, B., Sharma, U., Kumar, S., 2018. "Standalone Photovoltaic Water Pumping System Using Induction Motor Drive With Reduced Sensors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), pp.1-11.
- [5] Youssef, M. Z., 2015. "Design and performance of a cost-effective BLDC drive for water pump application". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2(5), pp. 3277-3284.
- [6] Renaudineau, H. et al., 2015. "A PSO-Based Global MPPT Technique for Distributed PV Power Generation". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), pp. 1047-1058.
- [7] Teshome, D. F., Lee, C. H., Lin, Y. W., Lian, K. L., 2017. "A Modified Firefly Algorithm for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control Under Partial Shading". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(2), pp. 661-671.
- [8] Seyedmahmoudian, M. et al., 2015. "Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), pp. 850-862.
- [9] Bendib, B., Belmili, H., Krim, F., 2015. "A survey of the most used MPPT methods: conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems". *Renewable and Sustainable Energy Review*, 45, pp. 637-648.
- [10] Mohanty, S., Subudhi, B., Ray, P. K., 2016. "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), pp. 181-188.
- [11] Ahmed, J., Salam, Z., 2015. "A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, pp. 933-953.
- [12] Ishaque, K., Salam, Z., 2013. "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 475-488.
- [13] Killi, M., Samanta, S., 2015. "Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), pp. 5549-5559.
- [14] Siouane, S., Jovanovic, S., Pore, P., 2019. "Open-Switch Fault-Tolerant Operation of a Two/Stage Buck/Buck-Boost Converter With Redundant Synchronous Switch for PV Systems". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), pp. 3938-3947.
- [15] Mishra, A. K., Singh, B., 2018. "Design of Solar-Powered Agriculture Pump Using New Configuration of Dual-Output Buck-Boost Converter". *IET Renewable Power Generation*, 12(14), pp. 1640-1650.
- [16] Singh, P. K., et al., 2018. "BLDC Motor Drive Based on Bridgeless Landsman PFC Converter With Single Sensor and Reduced Stress on Power Devices". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), pp. 625-635.
- [17] Singh, B., Kumar, R., 2016. "Solar Photovoltaic Array Fed Water Pump Driven by Brushless DC Motor Using Landsman Converter". *IET Renewable Power Generation*, 10(4), pp. 474-484.
- [18] Singh, P. K., Singh, B., Bist, V., 2016. "Brushless DC Motor Drive With Power Factor Regulation Using Landsman Converter". *IET Power Electronics*, 9(5), pp. 900-910.

شبیه‌سازی تا لحظه ۰/۳ ثانیه، با توجه به اینکه میزان تابش کافی نمی‌باشد، باتری در حال دشارژ شدن و تغذیه لینک DC است. بعد از لحظه ۰/۳ ثانیه تا لحظه ۰/۶ ثانیه، تابش خورشید به حد مطلوب می‌رسد و لذا توان تولیدی اضافی در باتری ذخیره می‌شود. منفی شدن جریان باتری در این بازه زمانی نشان‌دهنده شارژ شدن باتری است. بعد از لحظه ۰/۶ ثانیه، مجدداً میزان تابش کاهش می‌یابد. جریان باتری در این حالت مجدداً مثبت شده و با دشارژ شدن باتری، توان مورد نیاز تأمین می‌شود.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله درایو یک موتور DC بدون جاروبک در یک پمپ آبرسانی که لینک DC آن از طریق پنل خورشیدی و باتری پشتیبان تغذیه می‌شود، ارائه گردید. سیستم هابرید پنل خورشیدی - مبدل لنزمن و باتری - مبدل دوطرفه امکان تأمین ولتاژی ثابت در لینک DC ورودی اینورتر موتور را در شرایط مختلف جوی مهیا نمود به نحوی که با تغییر در شدت تابش، ولتاژ لینک DC در زمانی بسیار کوتاه و با کمترین تغییر به مقدار اولیه خود، یعنی ۶۰۱ ولت، رسید. همچنین، امکان تأمین توان مورد نیاز موتور پمپ آبرسانی در شرایط مختلف آب و هوایی با بکارگیری باتری پشتیبان میسر گردید. مبدل لنزمن، ولتاژ خروجی آرایه خورشیدی را که دارای مقدار ۲۱۲٫۴ ولت در نقطه بیشینه توان است افزایش داده و مقدار آنرا به ۶۰۱ ولت لازم برای تحویل به لینک DC اینورتر افزایش می‌دهد. ولتاژ تحویلی به لینک DC در زمان افزایش شدت تابش از ۶۰۰ به ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، در ثانیه ۰٫۳ شبیه‌سازی، دچار افزایشی به میزان ۸ ولت شد که با عملکرد سیستم کنترل طراحی شده پس از ۰٫۰۵ ثانیه به مقدار اولیه خود یعنی ۶۰۱ ولت بازگشت. به طور مشابه در ثانیه ۰٫۶ شبیه‌سازی، با کاهش شدت تابش از ۱۰۰۰ به ۴۰۰ وات بر متر مربع، ولتاژ تحویلی به لینک DC دچار کاهشی به میزان ۱۱ ولت شد که با عملکرد سیستم کنترل طراحی شده پس از ۰٫۰۷ ثانیه به مقدار اولیه خود یعنی ۶۰۱ ولت بازگشت.

### مراجع و منابع

- [1] Voglitsis, D., Papanikolaou, N. P., Baros, D. K., Gonos, I.F., 2017. "Sensitivity Analysis for the Power Quality Indices of Standalone PV systems". *IEEE Access*, 5, pp. 25913-25922.
- [2] Mapurunga Caracas, J. V., Carvalho Farias, G. D., Moreira Teixeira, L. F., de Souza Ribeiro, L. A., 2014. "Implementation of a High-Efficiency, High-Lifetime, and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System". *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 50(1), pp. 631-641.
- [3] Shukla, S., Singh, B., 2018. "Single-Stage PV Array Fed Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive for Water Pumping". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), pp. 3575-3585.