

شبیه سازی نیروگاه فتوولتائیک با استفاده از سلول خورشیدی نانو ساختار حساس به رنگ به عنوان یک منبع جدید تولید پراکنده

محمد رضا یعقوبی نیا<sup>۱</sup>، هادی ثقفی<sup>۲</sup>، محمود زنده دل<sup>۳</sup>، مرضیه یعقوبی نیا<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی رشته مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران Herro1974@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده شیمی، دانشگاه اصفهان

<sup>۴</sup> دانشجوی رشته مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، ایران

چکیده - در این مقاله به بررسی اجمالی ساختار سیستمهای خورشیدی و نیروگاه های فتوولتائیک، بررسی کلی نسل سلول های خورشیدی نانو ساختار حساس به رنگ به عنوان یک منبع تولید پراکنده و یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده با بازده ای بیشتر و هزینه تولید بسیار کمتر نسبت به نسل سیلیکونی سلول های خورشیدی پرداخته می شود. در این مقاله یک مدل سازی یک نیروگاه فتوولتائیک با این سلول های نسل جدید، متصل به شبکهها استفاده از روش کنترلی *MPPT* در نرم افزار *psim* شبیه سازی شده و نتایج آن آورده شده است. *MPPT* یا دنبال کننده حداکثر توان روشی برای قرار دادن نقطه کار پنل خورشیدی در نقطه پیک توان است. در این مدل برای بالا بردن ولتاژ به سطح مورد نظر از مبدل *DC-DC* از نوع *Boost* و یک اینورتر *PMW* جهت اتصال به شبکه استفاده شده است. همچنین شرح کامل روش کنترلی *MPPT* در متن مقاله آورده شده است.

کلید واژه - انرژی خورشید، نیروگاه فتوولتائیک، سلول نانو ساختار حساس به رنگ، نیروگاه فتوولتائیک، *MPPT* (دنبال کننده حداکثر توان)

های های یک نیروگاه فتوولتائیکدر قالب یک منبع تولید پراکنده مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- نیروگاههای فتوولتائیک

### ۲-۱ انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی (فتوولتائیک) تبدیل نور خورشید به الکتریسیته از طریق یک سلول فتوولتائیک می‌باشد، که بطور معمول یک سلول خورشیدی نامیده می‌شود.

در عصر حاضر از انرژی خورشیدی توسط سیستم‌های مختلف استفاده می‌شود که عبارت‌اند از:

۱-۱-۲ استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی.

۲-۱-۲ تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته بوسیله تجهیزاتی به نام فتوولتائیک.

### ۲-۲ نیروگاههای فتوولتائیک

۱-۲-۲ سیستمهای متصل به شبکه سراسری (Gridconnected) در این روش، انرژی الکتریکی حاصل از سیستم فتوولتائیک (با استفاده از تجهیزات الکتریکی مبدل جریان مستقیم به جریان متناوب، همچون اینورترهای متصل به شبکه و...) مطابق با مشخصات سطح ولتاژ، اختلاف فاز، فرکانس شبکه سراسری به شبکه سراسری برق تزریق می‌گردد.

### ۲-۲-۲ سیستمهای مستقل از شبکه (Stand Alone)

این نوع کاربرد، بدون نیاز به وجود شبکه سراسری برق قادر به تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده می‌باشد. در این روش انرژی الکتریکی مورد نیاز با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک، سیستمهای ذخیره و کنترل، بعنوان یک واحد نیروگاهی با طول عمر مناسب ۳۰ سال می‌تواند با قابلیت اطمینان بالا قابل نصب و راه اندازی می‌باشد.

عدم نیاز به سوخت، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری بویژه عمر مناسب و جمله مزایای این سیستمهاست.

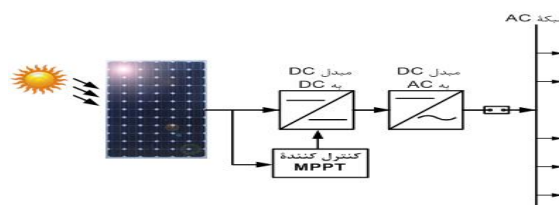
در اواخر قرن ۲۰ میلادی تحول بزرگی در دنیای استفاده از انرژی خورشیدی صورت گرفت، که بر اساس آن امکان استفاده و تولید وسایلی بر پایه ترکیبات مولکولی که در مقیاس بالا، قابلیت تولید انرژی الکتریکی را از نور خورشید دارا می‌باشند، بوجود آمد. نخستین مقاله علمی در این زمینه در سال ۱۹۹۱ توسط O'Regan و Gratzel به دنیا عرضه شد. با تولید این گونه از سلول‌های خورشیدی که امکان استفاده از مواد شیمیایی در ابعاد نانومتری و در فاز جامد را دارا می‌باشند، چالش عظیمی در استفاده از سلول‌های فتوولتائیکی قبلی بوجود آمد. شاید بتوان مهمترین مزیت این سلول‌های خورشیدی نانو ساختار حساس به رنگ را در مقایسه با نسل موجود سیلیکونی، بسیار کمتر بودن هزینه تولید آنها دانست. هزینه سلول‌های سیلیکونی حد ۰.۷۵ دلار به ازای هر وات توان و در مورد این سلول‌ها حدود ۰.۰۵ دلار به ازای هر وات می‌باشد. همچنین از دیگر مزایای این نسل از سلول‌های خورشیدی قابلیت انعطاف پذیری بالای محصولات و ارائه در شکل و رنگ‌های مختلف می‌باشد. بازده تولید الکتریسیته از نور خورشید در مورد این نسل از سلول‌های خورشیدی در حال حاضر حدود ۱۳٪ می‌باشد که همچنان این عدد در حال افزایش می‌باشد. همچنین تست‌های پایداری این سلول‌ها بازدهی حدود ۱۰٪ را در بیش از ۱۰۰۰ ساعت تابش و در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد از خود نشان داده‌اند.

بر اساس آمار در سال ۲۰۰۰ نیاز بشر به انرژی حدود ۱۳ تریلیون وات بوده است که با محاسبه سرعت رشد جمعیت این نیاز در سال ۲۰۵۰ به ۲۸ تریلیون وات خواهد رسید و همچنین به دلیل اتمام سوخت‌های فسیلی تا آن زمان، چالش بزرگی ایجاد خواهد شد. از سوی دیگر میزان انرژی که در یک سال از خورشید به زمین میرسد حدود  $10^{17}$  تریلیون وات می‌باشد که از این میزان می‌توان حدود ۶۰۰ تریلیون وات را به صورت بالقوه مورد استفاده قرار داد. با داشتن این نوع سلول‌های خورشیدی با بازده ۱۰٪ می‌توان بیش از ۶۰ تریلیون وات در سال تولید کرد که این میزان انرژی حتی مازاد بشر بر مصرف در سال ۲۰۵۰ نیز خواهد بود.

با ساخت نمونه‌هایی از این نوع سلول‌ها در ابعاد بزرگتر با قابلیت‌های ذکر شده به عنوان پنل‌های نسل جدید و تولید صنعتی به همراه بازده بیشتر، این سلول‌ها می‌توانند به عنوان پنل

### 3-2 معرفی سیستم فتوولتائیک

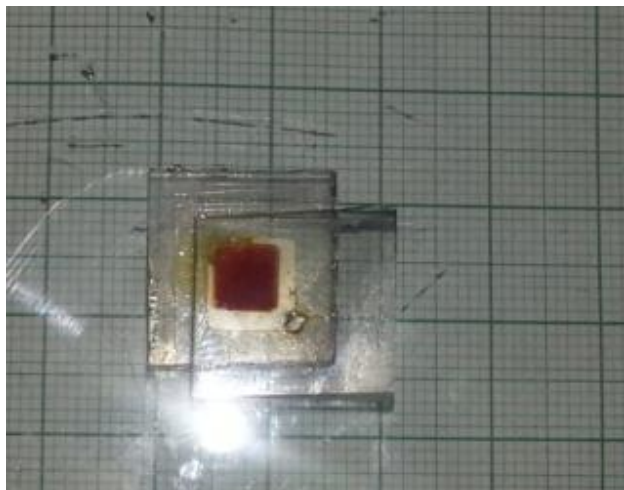
برای پیاده سازی سیستمی که توانایی ردیابی نقطه توان بیشینه را داشته باشد، لازم است که سیستم دارای اجزایی شامل آرایه PV، مبدل DC به DC، بار و یک کنترلر قابل برنامه ریزی جهت اعمال الگوریتم های MPPT باشد. ساختار کلی یک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم تغذیه فتوولتائیک متصل به شبکه

### ۴- نمونه آزمایشگاهی ساخته شده

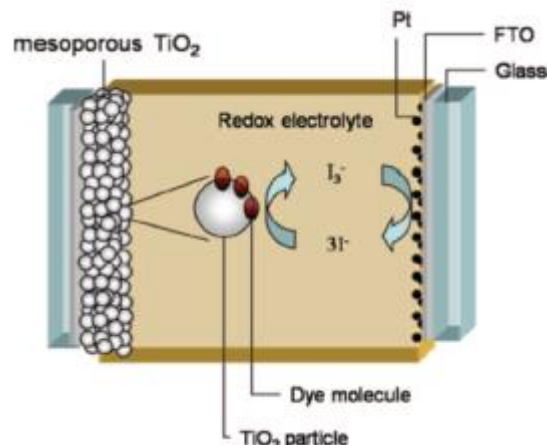
این نمونه ها در آزمایشگاه دانشگاه اصفهان ایران ساخته شده است. شکل شماره ۹ : نشان دهنده دو سلول ساخته شده با ابعاد ۱,۵\*۱,۵ و ۲,۵\*۲,۵ سانتی متر است .



شکل ۳: نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه

### ۳- سلول های خورشیدی نانو ساختار حساس به رنگ

۳-۱ در این سلول ها که در اصل یک سیستم الکتروشیمیایی در ابعاد نانومتری می باشد سه جز عمده وجود دارد (شکل ۲):  
 ۱- فوتو آند؛ که در آن فرایند جدایی الکترون-حفره انجام می پذیرد و الکترون در اثر جذب نور در ناحیه مرئی توسط مولکول رنگینه وارد نوار رسانش نیمه رسانا می گردد.  
 ۲- فوتوکاتد؛ که نقش خنثی کردن حفره و بستن چرخه تولید الکترون را بر عهده دارد.  
 ۳- یک سیستم الکترولیت؛ که نقش آن انتقال حفره از فوتو آند به فوتو کاتد می باشد.



شکل ۲: نمای شماتیک یک سلول خورشیدی نانو ساختار حساس به رنگ

### ۵- نمودار ولتاژ-چگالی جریان سلول

شکل شماره ۴ : نشان دهنده نمودار ولتاژ-چگالی جریان سلول است که با استفاده از پارامتر های دستگاه آنالیزر که بصورت جدول excel و نرم افزار سیگما پلات رسم شده است. منحنی جریان-ولتاژ سلول حساس شده با رنگ که نشان شامل ولتاژ مدار باز (Voc)، چگالی جریان مدار کوتاه (Jsc)، فاکتور انباشتگی (FF) و بازده کلی سلول (PCE) به ترتیب برابر با مقادیر ۱/۰۸ ولت، ۱۲/۹ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، ۰/۵۱۴ و ۷/۱۶ درصد ثبت گردیدند.

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}}$$

$$FF = P_{max} / (J_{sc} V_{oc})$$



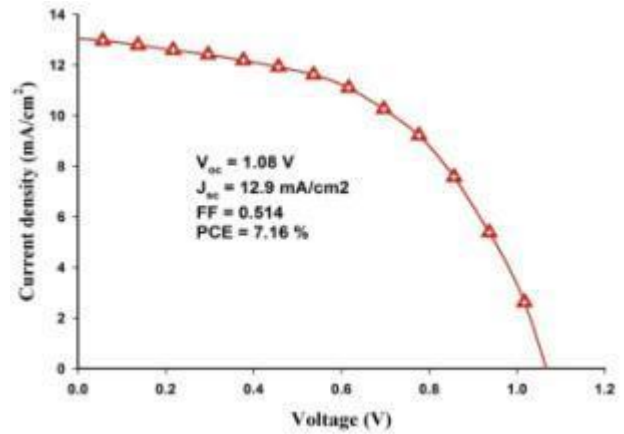
شکل ۶: نمونه ساندویچی با اتصال داخلی Z



شکل ۷: نمونه ساندویچی جمع کننده جریان با ابعاد  $36 \times 36$  cm<sup>2</sup>



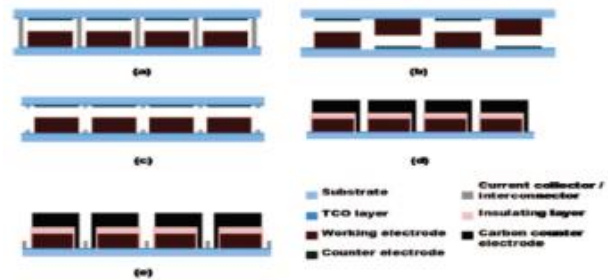
شکل ۸: نمونه یکپارچه با اتصال سری



شکل ۴: نمودار جریان-ولتاژ سلول

### ۶- نمونه‌های سلول‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ

ساخت، قابلیت اعتماد به کارایی و پایداری سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه در مقیاس‌های وسیع موارد بسیار پیچیده‌ای هستند که به راحتی قابل مقایسه با نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی نیستند. روش‌های فراوانی برای ساختن این سلول‌ها در مقیاس صنعتی گزارش شده‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



شکل ۵: شمای شماتیک پنج نوع نمونه مقیاس وسیع سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه، (a) نمونه‌های ساندویچی با اتصال داخلی Z شکل، (b) نمونه‌های ساندویچی با اتصال داخلی W شکل، (c) نمونه‌های ساندویچی جوع کننده جریان، (d) نمونه‌های یکپارچه با اتصال سری و (e) نمونه‌های یکپارچه جمع کننده جریان.

### ۷- دنبال کننده حد اکثر توان

یک دنبال کننده حد اکثر توان (MPPT) وظیفه تغییر بار معادل آرایه و در نتیجه تغییر نقطه کار آن را به عهده دارد به طوری که با تغییرات دما و تابش همواره نقطه کار در پیک توان آرایه قرار گیرد

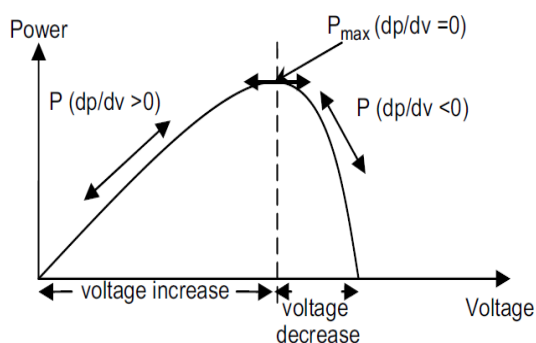
در نتیجه داریم و

$$R_{MPP} \begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \text{left side of MPP} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \text{at MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \text{right side of MPP} \end{cases}$$

$$\frac{dI}{dV} > -I/V \Rightarrow \text{left side of MPP}$$

$$\frac{dI}{dV} = -I/V \Rightarrow \text{at MPP}$$

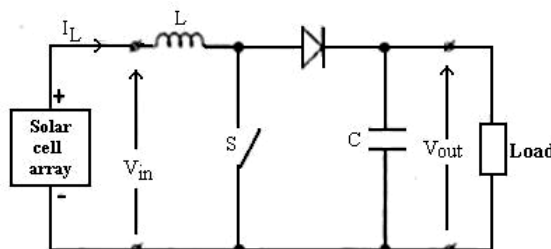
$$\frac{dI}{dV} < -I/V \Rightarrow \text{right side of MPP}$$



شکل ۱۰: مشخصه P-V سلول PV

امپدانس می توان حداکثر توان حاصل می شود از تقسیم ولتاژ  $V_{MPP}$  بر جریان  $I_{MPP}$  نقطه کار حداکثر توان به دست می آید.

در روشهای مختلف MPPT مبدل به گونه ای کنترل میشود که امپدانس ورودی مبدل با  $R_{MPP}$  برابر شود. یکی از مبدلهای مرسوم در MPPT مبدل بوست است که در شکل (۹) می بینید



شکل ۹: مدار مبدل بوست

مبدل بوست، مقاومت بار  $R_L$  را با رابطه زیر تبدیل میکند :

$$R_{eq} = (1 - D)^2 \cdot R_L$$

که در این رابطه  $D$  دوره کاری مبدل است. بنابراین با تغییر دوره کاری می توان نقطه کار آرایه فتوولتائیک را تغییر داد. برای داشتن حداکثر توان، باید دوره کاری به نحوی تغییر کند که مقدار  $R_{eq}$  با  $R_{MPP}$  برابر شود.

از انواع روش های کنترلی به دو روش زیر می توان اشاره کرد :

- روش صعود به تپه
- کنترلر فازی

به طور معمول دونوع استفاده از روش اول وجود دارد:

- ۱- روش انحراف و مشاهده
- ۲- روش هدایت افزایشی

انحراف و مشاهده یک روش کاربردی وسیع میباشد. مبنای این روش بر اساس امتحان یک ولتاژ بیشتر یا کمتر است. روش هدایت افزایشی مطابق شکل 12 بر این اصل استوار است که شیب منحنی توان در نقطه ماکزیمم، صفر، در سمت راست آن منفی و در سمت چپ آن مثبت است بطوریکه می توان نوشت :

<sup>1</sup> Maximum power point tracker



تولید شده در پنل فوتوولتائیک توسط یک مبدل به ولتاژ متناوب تبدیل شود که بسته به کاربرد سیستم می تواند تک فاز یا سه فاز باشد. مدار الکترونیکی که کار تبدیل ولتاژ DC به AC را انجام می دهد اینورتر می نامند. ولتاژ DC ورودی به اینورتر یک نیروگاه فوتوولتائیک میتواند از خروجی سلولها یا از خروجی باتری های ذخیره کننده، به اینورتر متصل شده باشد.

## ۸- طراحی سیستم های فوتوولتائیک

### مراحل اصلی طراحی

۸-۱ بر اساس مدل ماژول و توان سیستم انتخاب شده تعداد ماژول های مورد نیاز محاسبه میشود

۸-۲ در مرحله بعد بخش واسطه و مشخصات تجهیزات مورد نیاز براساس اولویت بار و نوع کاربرد طراحی و تعیین شده و طبق نظر طراح سیستم، طراحی و مشخصات آن تهیه و تدوین می گردد.

با توجه به نمودار جریان-ولتاژ پنل، توان این پنل با مساحت فعال  $1497\text{cm}^2$  برابر با  $2.245 \times 6.01 = 13.49$  وات است. در شکل زیر یک نیروگاه با توان ورودی 640 وات متشکل از 48 عدد پنل حساس شده به رنگینه نشان داده شده است.

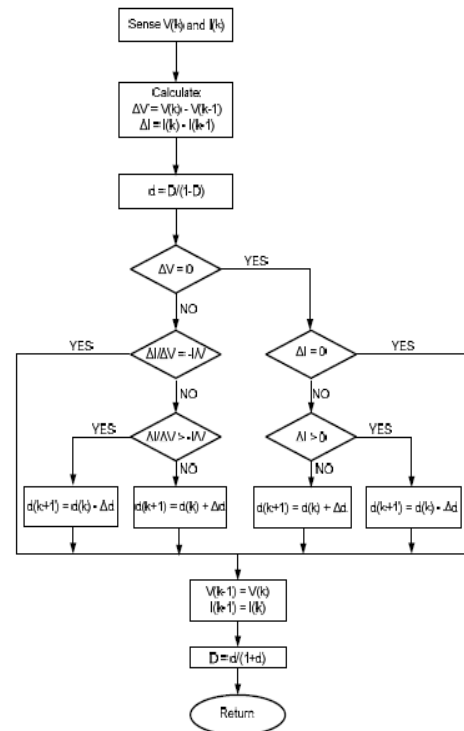


شکل ۱۳: نمایی از پنل ها با توان مجموع 640 وات

این پنل ها به صورت مدارات موازی و سری بطوری بسته می شوند که خروجی 48 ولت با توان 640 وات را داشته باشند. مبدل بوست این ولتاژ را به 350 ولت مستقیم برده و اینورتر آن را 220 ولت متناوب تبدیل کرده است.

پارامترهای استفاده شده در طراحی مبدل بوست مطابق جدول ۱ میباشد. در طراحی شبکه از مقاومت 200 اهم و سلف با اندوکتانس 900 میلی هانری و خازن با ظرفیت 200 میکرو فاراد و منبع سه فاز با ولتاژ خط-خط 110 ولت و فرکانس 60 هرتز استفاده شده است.

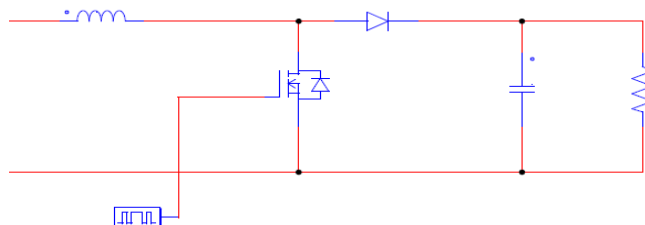
جدول ۱: پارامترهای مبدل CDC-D



شکل ۱۱: فلوجارت روش هدایت افزایشی MPPT

## تنظیم کننده ولتاژ خروجی :

با توجه به این موضوع که ولتاژ خروجی MPPT و نیز باتری ها ( ثابت در صورت استفاده از آنها به عنوان ذخیره کننده انرژی ) ثابت نمی ماند و همچنین سطح ولتاژ مورد نیاز در مصرف کننده ها بالا است، معمولا یک مبدل ولتاژ DC به DC به منظور بالا بردن سطح ولتاژ و تثبیت آن در یک ولتاژ مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. از انواع مبدلها به مبدل بوست می توان اشاره کرد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مصرف کننده ها بالا است، معمولا یک مبدل ولتاژ DC به DC به منظور بالا بردن سطح ولتاژ و تثبیت آن در یک ولتاژ مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. از انواع مبدلها به مبدل بوست می توان اشاره کرد که در شکل زیر نشان داده شده است.

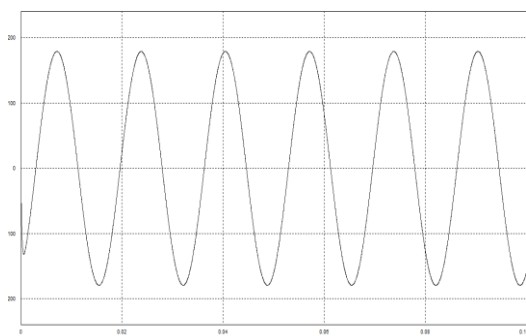


شکل ۱۲: مبدل بوست

## ۷- اینورتر ولتاژ

اگر مصرف کننده های سیستم فوتوولتائیک از نوع مصرف کننده های با جریان متناوب باشند، لازم است که ولتاژ خروجی DC

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد صغمان (خوراسگان)

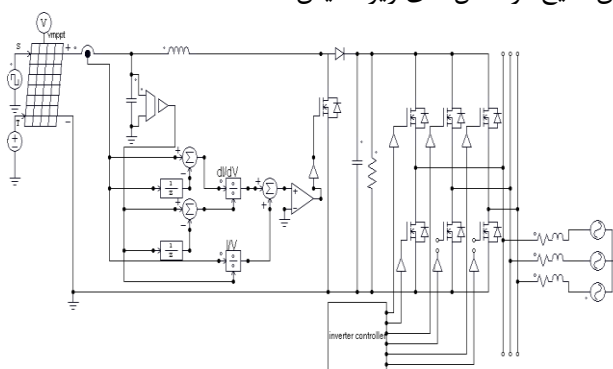


شکل ۱۷: جریان شبکه

اندوکتانس L	میلی هانری ۹۰۰
ظرفیت C	۲۰۰ میکرو فاراد
مقاومت بار	۲۰۰ اهم

### ۹- نتایج شبیه سازی

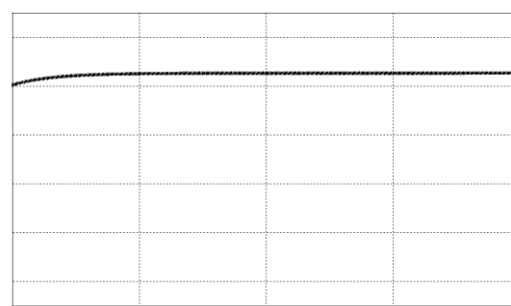
این نتایج در شکل های زیر نمایش داده شده اند.



شکل ۱۴: شماتیک مدار طراحی شده

### ۱۰- نتیجه گیری

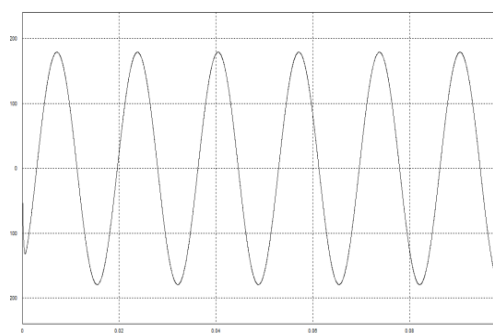
در این مقاله نیروگاه های خورشیدی و مزایای استفاده از آنها، ساختار سیستمهای فتوولتائیک و روش های اتصال به شبکه بررسی شد. همچنین باسنتر ماکول های جدید عامل حفره درون الکترولیت و تست آنها باعث ارتقاء قابل ملاحظه ای در رکورد بازده تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته شده است. کم هزینه بودن تولید آنها، قابلیت صنعتی کردن این سلول های جدید جهت استفاده در صنایع بزرگ کشور با توجه به ظرفیت بالای ایران در دارا بودن میزان زیاد تابش نور خورشید در سال، به عنوان یک منبع پاک انرژی و تجدیدپذیر، وجود دارد. یک سیستم کنترلی از نوع دنبال کننده حداکثر توان مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مدلسازی یک نیروگاه فتوولتائیک متصل به شبکه همراه با استفاده از مبدل بوست و روش MPPT و اینورتر برای اتصال به شبکه دیده شد. در انتها نتایج مربوط به شبیه سازی این نیروگاه (ولتاژ و جریان) با توان ۶۴۰ وات که با استفاده از یک مبدل بوست، ولتاژ در نطقه حداکثر ۴۸ ولت و با ولتاژ ۲۲۰ متناوب و جریان ۲٫۹ آمپر به شبکه متصل میشود، در نرم افزار psim ارائه گردیده است.



شکل ۱۵: ولتاژ خروجی بوست

### ۱۱- منابع

- [1] محمد رضایقوبی نیا، محمود زنده دل، هادی ثقفی، معرفی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی سلول نانو ساختار حساس به رنگ، سومین کنفرانس ایده های نو ۱۳۹۳
- [2] Arakawa, H.; Yamaguchi, T.; Sutou, T.; Koishi, Y.; Tobe, N.; Matsumoto, D.; Nagai, T. Curr. Appl. Phys. 2010, 10, S157



شکل ۱۶: ولتاژ شبکه

[3] Songyuan Dai, Kongjia Wang, Jian Weng, Yifeng Sui, Yang Huang, Shangfeng Xiao, Shuanghong Chen, Linhua Hu,

[4] Takeda, Y.; Kato, N.; Higuchi, K.; Takeichi, A.; Motohiro, T.; Fukumoto, S.; Sano, T.; Toyoda, T. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2009, 93808

[5] Kato, N.; Takeda, Y.; Higuchi, K.; Takeichi, A.; Sudo, E.; Tanaka, H.; Motohiro, T.; Sano, T.; Toyoda, T. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2009, 93, 893

[6] Dai, S.; Weng, J.; Sui, Y.; Chen, S.; Xiao, S.; Huang, Y.; Kong, F.; Pan, X.; Hu, L.; Zhang, C.; Wang, K. Inorg. Chim. Acta 2008, 361, 786

[7] Arakawa, H.; Yamaguchi, T.; Sutou, T.; Koishi, Y.; Tobe, N.; Matsumoto, D.; Nagai, T. Curr. Appl. Phys. 2010, 10, S157

[8] فاطمه جنتی، مهدی نیرومند، اندیشه قمی، مدلسازی و طراحی یک نیروگاه فتوولتائیک ۵۰ کیلو وات ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، کنفرانس مهندسی برق مجلسی / شهر جدید مجلسی / مرداد ۱۳۹۰

[9] مسعود سهیلی، مهدی نیرومند و محمد شرکت العباسیه، استفاده از روش کنترل مد جریان در بهبود پاسخ گذرای ردیاب کننده های توان بیشینه مبتنی بر روش فازی در سیستم های فتوولتائیک، کنفرانس مهندسی برق مجلسی / شهر جدید مجلسی / مرداد ۱۳۹۰