مدلسازی و تحلیل حالت گذرای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در سیستمهای فتوولتائیک

رضا شریعتینسب'، دانشیار؛ بهزاد کرمانی'، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ حمیدرضا نجفی"، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران – shariatinasab@birjand.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران – h.r.najafi@birjand.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران – h.r.najafi@birjand.ac.ir

چکیده: با توجه به اینکه سیستمهای فتوولتائیک در محیط باز یا پشتبامها نصب میشوند، یکی از عوامل مهم که میتواند منجر به اخلال در عملکرد یا تخریب سیستمهای فتوولتائیک و تجهیزات آن شود، اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه است. لذا مدلسازی و مطالعه دقیق این تنشها جهت حفاظت مؤثر از سیستمهای فتوولتائیک ضروری به نظر می سد. مدار معادلی که تاکنون برای مدلسازی پنهای خورشیدی در حالتهای گذرا مرسوم می باشد، یک مدار صرفاً مقاومتی است که در آن اثر خازنهای پراکندگی موجود در پنل دیده نشده است؛ در حالی *ک*ه بهدلیل ماهیت فرکانس بالای تنشهای ولتاژی صاعقه، تأثیر خازنهای پراکندگی بر توزیع میدان و ولتاژ مهم می باشد. لذا در این مقاله یک مدل بهدلیل ماهیت فرکانس بالای تنشهای ولتاژی صاعقه، تأثیر خازنهای پراکندگی بر توزیع میدان و ولتاژ مهم می باشد. لذا در این مقاله یک مدل مدلهای مرسوم، تأثیر خازنهای پراکندگی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از تست واقعی پنل، دقت مدل پیشنهادی در مقایسه با مدلهای مرسوم، تأثیر خازنهای پراکندگی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از تست واقعی پنل، دقت مدل پیشنهادی در مقایسه با مدلهای مرسوم، تأثیر خازنهای پراکندگی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از تست واقعی پنل، دقت مدل پیشنهادی در مقایسه مدلهای مرسوم، تأثیر خازنهای پراکندگی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج به فر کانس ارائه شده برای ساختار مقاومتی مورد استفاده در ما مدلهای مانوم این این می دهد. در ادامه با شبیه سازی مدل وابسته به فر کانس ارائه شده برای ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک، اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به آن در محیط EMTP-RV شیه سازی شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت و است. مهمچنین روشی برای تعیین حداقل فاصله مناسب بین میله صاعقه گیر و پنل خورشیدی به منظور جلوگیری از آسی برای شده است.

واژههای کلیدی: سیستمهای فتوولتائیک، مدل گسترده، اضافه ولتاژهای صاعقه، EMTP-RV.

Modelling and Transient Analysis of the Photovoltaic Systems Under Direct and Indirect Lightning Strokes

R. Shariatinasab¹, Associate Professor; B. Kermani², MSc Student; H. R. Najafi³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: shariatinasab@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: kermani@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: h.r.najafi@birjand.ac.ir

Abstract: Since the photovoltaic systems are installed in outdoor or rooftops, transient overvoltages caused by lightning surges is one of the important factors that could lead to disruption in performance or failure of photovoltaic systems and equipment. Therefore, accurately modeling and study of these transients is necessary in order to effectively protect the photovoltaic systems. So far, the conventional model of solar panels that is used for lightning studies is purely resistive in which the stray capacitors are not considered; however, owing to the nature of high frequency being of lightning stresses, the effect of stray capacitances in voltage and electric field distribution is important. In this paper, an improved model to simulate the solar panels under transient conditions caused by lightning surges has been introduced so that in addition to the resistive structure used in conventional models, the effect of stray capacitances is also considered. Actual test results confirm the accuracy of the proposed model compared with conventional models. In the following, by simulating the frequency-dependent model for the overall structure of a photovoltaic system in EMTP-RV environment, the overvoltages caused by direct and indirect lightning strokes to photovoltaic panels have been analyzed. A method for determining the appropriate minimum distance between the lightning rod and solar panels to avoid damage to panels, if the lightning rod is struck by the lightning surges, is also provided.

Keywords: Photovoltaic systems, distributed model, lightning overvoltages, EMTP-RV.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۱۹۵۵/۱۱۹۵۵ و ۱۳۹۵/۵۷۸ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۳۱۵ و ۱۳۹۵/۵/۸۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۷/۱۱ نامنی نویسنده مسئول: ایران – بیرجند – بلوار شهید آوینی – دانشگاه بیرجند – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱ – مقدمه

افزایش هزینه سوختهای فسیلی، آلودگی زیستمحیطی نیروگاههای حرارتی و کاهش هزینههای منابع انرژی تجدیدپذیر از دلایل اصلی ورود و گسترش منابع تجدیدپذیر در تأمین بخشی از توان شبکههای قدرت شده است. ازاینرو استفاده از انرژیهای نو مانند انرژی باد، خورشیدی و غیره مورد توجه قرار گرفته است [۱].

از رایج ترین منابع انرژی در ریز شبکه ها، سیستم های فتوولتائیک می باشند. سیستم های فتوولتائیک که به دو صورت متصل یا جدا از شبکه قابل بهره برداری اند، نقش عمده ای در فن آوری های مرتبط با انرژی های تجدید پذیر دارند؛ چراکه سازگار با محیط زیست و غیر آلاینده بوده و منابعی با قابلیت اطمینان بالا به شمار می آیند [۲، ۳].

با توجه به نصب سیستمهای فتوولتائیک در محیط باز یا پشتبام، یکی از عوامل مهمی که میتواند منجر به اخلال در عملکرد یا خرابی سیستمهای فتوولتائیک و تجهیزات آن شود، اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه است. اضافه ولتاژهای صاعقه، تنشهایی هستند که نمیتوان بهطور کامل از به وجود آمدن آنها در سیستم جلوگیری نمود و موجب بروز مشکلاتی میشوند [۴].

هرچند نیروگاههای خورشیدی با خطرات ناشی از برخورد صاعقه هرچند نیروگاههای خورشیدی با خطرات ناشی از برخورد صاعقه روبهرو هستند، اما طراحی یک سیستم حفاظت صاعقه کمتر موردتوجه طراحان قرارگرفته است [۵]. پژوهشهای اخیار در رابطه با تخریب ماژولهای فتوولتائیک بیشتر با روی اشعه ماورا بنفش، رطوبت، تغییرات دما، نمک، گردوغبار و شرایط آب و هوایی مانند باد، برف و غیره متمرکز شده است [۸-۶]. در مقالات مختلف از لحاظ نظری (با استفاده از شبیه سازی) و تجربی (با آزمایش و اندازه گیری) عملکرد سیستمهای فتوولتائیک در برابر صاعقه مطالعه شده است [۹-۱۷].

در [۹] تأثیر اضافهولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به سیستمهای فتوولتائیک نصب شده بر روی پشتبامها با در نظر گرفتن نقطه برخورد صاعقه، مقدار جریان ماکزیمم، ارتفاع ساختمان و فاصله پناها تا میلههای صاعقه گیر مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر برخورد صاعقه بر روی توان خروجی سیستم فتوولتائیک در [۱۰] بررسی شده است. در [۱۱] یک شبکه مقاومتی برای پنل خورشیدی مطرح و میدان های مغناطیسی ناشی از برخورد صاعقه و اضافه ولتاژهای القایی به وجود آمده در پنل بررسی شده است. ولتاژ ترمینالهای خروجی آرایههای فتوولتائیک تحت تأثیر ولتاژهای القایی در [۱۲] اندازه گیری شده است. در [۱۳] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل های هندسی شبیهسازی شده، بررسی ولتاژهای القایی بر روی کابل کشی DC سیستم فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۴] با اعمال یک مـوج ضربه استاندارد بر روی یک ماژول خورشیدی، تغییرات مشخصههای جریان- ولتاژ ماژول در قبل و بعد از آزمایش باهم مقایسه شده است. در [۱۵] یک مدل برای تحلیل صاعقه در پنلهای خورشیدی با پایه بتنی ارائهشده که دقت آن با آزمایش مورد تأیید قرار گرفته است. مدل ارائهشده در این مقاله، برای مدلسازی شبکه توزیع DC در یک

سیستم فتوولتائیک کامل مورداستفاده قرار گرفته است. حد تحمل جریانی موردنیاز برای تجهیزات حفاظتی صاعقه نیز با استفاده از روش FDTD بهدست آمده است. خسارات و آسیبهای ناشی از برخورد صاعقه به پنل در [۱۶] بررسی شده است. در [۱۷] با استفاده از یک ژنراتور ضربه، جریان صاعقه تولید و به سیستم حفاظت اضافه ولتاژ DC یک نیروگاه خورشیدی اعمال شده و با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است.

علی رغم مواجهه با یک پدیده فرکانس بالا در حالتهای گذرای ناشی از صاعقه، تاکنون برای بررسی تأثیر صاعقه بر سیستمهای فتوولتائیک مدل مناسبی برای پنلهای خورشیدی که وابستگی به فرکانس را در نظر گرفته باشد پیشنهاد نشده است. در این مقاله ضمن ارائه یک مدل گسترده وابسته به فرکانس برای پنلهای خورشیدی، ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه به صورت وابسته به فرکانس مدل سازی شده و در EMTP-RV شبیه سازی می شود. سپس تنشهای ولتاژی ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به پنل خورشیدی به صورت جداگانه بررسی شده و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار می گیرد.

۲- مدلسازی سیستم فتوولتائیک

سیستمهای فتوولتائیک متصل به شبکه مطابق شکل ۱ شامل آرایه فتوولتائیک و مجموعه ادوات الکترونیک قدرت (مبدل بوست، اینورتر سهفاز و فیلتر AC) میباشند. برای مطالعه دقیق تأثیر برخورد صاعقه بر ساختار کلی سیستم فتوولتائیک، ارائه یک مدل وابسته به فرکانس برای هرکدام از بخشهای سیستم فتوولتائیک ضروری است که در ادامه به آن پرداخته میشود.



شکل ۱: دیاگرام تکخطی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

۲-۱- پنل خورشیدی

برای مدلسازی هر یک از بخشهای مختلف پنل خورشیدی که در برخوردهای مستقیم و غیرمستقیم صاعقه تحت تأثیر قرار میگیرند، مطابق شکل ۲، یک مدل کلی قابل تعریف است که در ادامه توضیح داده می شود.

۲-۱-۱- مدار معادل پنل خورشیدی

مدار معادل هر پنل که شامل تعدادی ماژول خورشیدی است مطابق شکل ۳ قابل نمایش است. در این مدار، مقاومت R مدل کننده تلفات پنل است که از اطلاعات سازنده قابل استخراج میباشد. از آنجاکه هر پنل از ترکیب سری-موازی چندین ماژول بهدست می آید، اندوکتانس هر پنل (*L*) را میتوان با توجه به نحوه اتصال ماژولهای PV به یکدیگر بهدست آورد. در این مقاله فرض شده که هر پنل شامل ۵ ستون موازی از ماژولهای خورشیدی است که در هر ستون ۳ ماژول بهصورت سری قرار گرفتهاند. بنابراین در هر پنل مجموعاً ۱۵ ماژول خورشیدی وجود دارد.

چون ماژول ها به یک دیگر توسط سیم هادی یا کابل متصل می شوند؛ با عبور جریان از هر سیم یا کابل در هر ستون و ستون مجاور یک اندوکتانس خودی و متقابل به وجود می آید. با فرض اتصال سری ۵ ستون که موازی یکدیگر قرار گرفتهاند، پیکربندی اتصال ماژول های فتوولتائیک در پنل موردنظر مطابق شکل ۴ خواهد بود. در شکل ۴ ولتاژ sV و vr به ترتیب ولتاژ ابتدا و انتهای هر ستون است که ولتاژ و جریان ستونهای موازی با اندیس ۱ تا ۵ مشخص شدهاند. در حالت کلی برای n مسیر موازی، اندیسها از ۱ تا n قابل تعریف خواهند بود.

با توجه به شکل ۴، رابطه بین ولتاژها و جریانهای پنل که شامل ۵ ستون موازی است بهصورت رابطه (۱) بوده و ماتریس اندوکتانس پنل نیز یک ماتریس ۵×۵ خواهد بود:



$$\begin{pmatrix} V_{s1} - V_{r1} \\ V_{s2} - V_{r2} \\ V_{s3} - V_{r3} \\ V_{s4} - V_{r4} \\ V_{s5} - V_{r5} \end{pmatrix} = j\theta \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I} \\ \overline{I}_{s3} \\ \overline{I}_{s4} \\ \overline{I}_{s5} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \overline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I} \end{bmatrix} \quad (1)$$



شکل ۳: مدل مداری وابسته به فرکانس یک ماژول خورشیدی



شکل ۴: پیکربندی پنل خورشیدی



شکل ۲: مدلسازی وابسته به فرکانس ساختار کلی پنل خورشیدی

در ماتریس اندوکتانس پنل خورشیدی (\overline{L})، عناصر قطری (*Li*i) انـدوکتانس خـودی هـر سـتون و عناصر غیرقطری (*Li*i) انـدوکتانس متقابل بین ستونهای موازی میباشند. اندوکتانس خودی هر ستون از پنل با توجه به شکل ۵ و روابط (۲) تا (۵) قابل محاسبه اسـت. مطـابق (شکل ۵، میدان مغناطیسی هر جزء طولی از ستونهای پنل خورشیدی در ستون مجاور که به فاصله *a* از آن قرارگرفته برابر است با:



شکل ۵: میدان مغناطیسی ناشی از هر ستون حامل جریان در ستون مجاور

$$dH = \int_{0}^{l} \frac{ady}{a^{2} + y - b^{2}} = \frac{l - b}{a\sqrt{a^{2} + l - b^{2}}} + \frac{b}{a\sqrt{a^{2} + b^{2}}}$$
(Y)

که در آن ا طول و ho شعاع سیم یا کابل ستونها است. با انتگرال گیری از رابطه (۲)، نیروی مغناطیسی ناشی از جزء دیفرانسیلی میدان برابـر است با:

$$dF_{m} = \frac{dx}{a} \int_{0}^{l} dH \, dy = \frac{2dx}{a} \sqrt{a^{2} + l^{2}} - a \tag{(7)}$$

درنتیجه نیروی الکترومغناطیسی هرکدام از ستونهای موازی در ۔ پنل خورشیدی با انتگرالگیری از (۳) برابر خواهد بود با:

$$F_{m} = 2 \int_{\rho}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{x^{2} + l^{2}}}{x} - 1 \right) dx$$
$$= 2 \left(\sqrt{x^{2} + l^{2}} - x - l \times \log \frac{l + \sqrt{x^{2} + l^{2}}}{x} \right)_{\rho}^{\infty}$$
$$= 2 \left(l \times \log \frac{l + \sqrt{\rho^{2} + l^{2}}}{\rho} - \sqrt{\rho^{2} + l^{2}} + \rho \right)$$
$$:$$
ectore in the set of the set

$$L_{ii} = F_m + \frac{l}{2} = 2\left(l \times \log \frac{l + \sqrt{\rho^2 + l^2}}{\rho} - \sqrt{\rho^2 + l^2} + \frac{l}{4} + \rho\right)$$
(δ)

اندوکتانس متقابل بین ستونهای موازی در یک پنل خورشیدی با در نظر گرفتن فاصله بین ستونها از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$L_{ij} = \int dy' \int_0^l \frac{dy}{\sqrt{d^2 + y - b^2}}$$

= $\int dy' \left(\log \frac{l - b + \sqrt{a^2 + l - b^2}}{\sqrt{a^2 + b^2} - b} \right)$
= $2 \left(l \times \log \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} - \sqrt{l^2 + d^2} + d \right)$ (6)

در حالت کلی برای n ماژول مقادیر اندوکتانس متقابل بین ستونها از رابطه (۶) و اندوکتانس خودی در مدل گسترده از رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$L_{ii} = 2 \times l \times \log \frac{l + \sqrt{\rho + n - 1^{2} + l^{2}}}{\rho}$$

$$-2 \times \sqrt{\rho + n - 1^{2} + l^{2}} + \frac{l}{2} + 2 \times \rho \quad n - 1$$
(V)

در مدل گسترده پنل خورشیدی، باید خازنهای پراکندگی موجود در پنل نیز در نظر گرفته شوند. این خازنها در حالت کار عادی مهم نبوده ولی در فرکانسهای بالا در توزیع میدان و ولتاژ نقش داشته و بایستی در نظر گرفته شوند. لـذا بـهمنظور افـزایش دقت در مـدل ارائهشده در این مقاله، مطابق شکل ۲-الف، خازنهای پراکندگی می توان از نظر گرفته شدهاند. برای محاسبه دقیق خازنهای پراکندگی می توان از روشهای عددی مانند المان محدود استفاده کرد. در ایـن مقالـه بـرای محاسبه این خازنها از روش تقریبی ارائه شـده در [۱۸ و ۱۹] اسـتفاده شده است. مقادیر عددی محاسبه شده برای خازنهای پراکنـدگی در جدول ۱ نشان داده است.

جدول ۱: مقادیر عددی خازنهای پراکندگی موجود در ساختار پنل

مقدار عددی	توضيحات	پارامتر
۱/۶ μF	خازنهای پراکندگی بین ماژولهای موازی	Смм
۳۰۰ pF	خازنهای پراکندگی بین هر ماژول و زمین	C_{LG}
۴nF	خازنهای پراکندگی بین ماژولهای سری	C_{LL}
۱۵۰ pF	خازن پراکندگی بین صفحه فلزی پایه و زمین	C_{PG}

۲-۱-۲- پایه سازه

در حالتهای گذرا، پایه سازه پنل را می توان به صورت یک امپدانس مدل کرد. با توجه به استوانه ای شکل بودن پایه، مقدار امپدانس مشخصه از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

$$Z = 60 \ln \cot \left(0.5 t g^{-1} \left(\frac{r_{sr}}{H_{sr}} \right) \right)$$
 (A)

که در آن H_{str} ارتفاع پایه و r_{str} شعاع پایه میباشد. برای افزایش دقت میتوان پایه را مانند مدل چندطبقه دکل خط انتقال به چندین قسمت یکسان با امپدانس توزیعشده تقسیم کرد (در این مقاله ۱۰ قسمت در نظر گرفته شده است).

۲-۱-۲- سیستم کابل کشی به اتاق کنترل

برای سیستم کابل کشی از پنل خورشیدی به اینورتر موجود در اتاق کنترل از کابل کواکسیال استفاده می گردد که از بالای پایه پنل تا پایین آن به سمت اتاق کنترل نصب می گردد. با توجه به DC بودن خروجی پنل خورشیدی، مطابق شکل ۲-ج، برای مدلسازی سیستم کنترل و برقرسانی پنل میتوان از دو کابل که یکی به پایانه مثبت و دیگری به پایانه منفی اینورتر متصل است استفاده نمود؛ که خازن های پراکندگی بین این دو کابل نیز بایستی مدلسازی شوند.

در مدلسازی کابل کواکسیال علاوه بر مقاومت و اندوکتانس هادی و لایه شیلد کابل، خازنهای بین هادی و لایه شیلد نیز باید در نظر گرفته شود. اندوکتانس بین هادی و شیلد (L) و خازن پراکندگی بین شیلد و هادی کابل (C23) از روابط زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{D_{12}}{0.7788 \times r} \right) \ (H \ / \ m) \tag{9}$$

$$C_{23} = \frac{0.002413\varepsilon}{\log_{10} \frac{D}{r}} (\mu F / km)$$
(\.)

که در آن D₁ فاصله بین هادی و شیلد، r شعاع هادی و D شعاع بیرونی عایق است. چون پایه سازه به ۱۰ قسمت تقسیم شده، کابل کواکسیال نیز مانند پایه به ۱۰ قسمت یکسان تقسیم می گردد. خازنهای پراکندگی بین هر قسمت پایه و زمین (C0) و خازن پراکندگی بین هر قسمت پایه و شیلد کابل (C1) برابر خواهد بود با [11]:

$$C_{0} = \frac{2\pi \mathcal{E}H_{str}}{\ln\left(\frac{2H_{str}}{r_{str}}\right)}$$
(11)

$$C_{12} = \frac{2\pi}{\cosh^{-1}\left(\frac{r_{str}^2 + r_{cable}^2 - D_{23}^2}{2r_{str}r_{cable}}\right)}$$
(17)

در روابط فوق Hstr ارتفاع پایه تا زمین و D23 فاصله کابل تا دیواره سازه پایه است. مقادیر عددی بهدستآمده برای هرکدام از پارامترهای مـدل وابسته به فرکانس سیستم کابلکشی در پنلهای خورشیدی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مقادیر کمیتهای وابسته به فرکانس مدار سیستم کابلکشی

L(mH)	C ₂₃ (pF)	C ₀ (µF)	C12(nF)
۶/۵۸	•/• 101	۴/۲۸	۱۲/۸۰

۲-۲- تجهيزات الكترونيك قدرت

برای مدل وابسته به فرکانس اینورتر AC از مدل اولیه ارائه شده در [۲۲] با انجام اصلاحاتی استفاده شده است. مدل اصلاح شده در شکل ۶ نشان داده شده است. مبدل DC-DC سیستم فتوولتائیک با یک خازن Cdc که ورودی DC اینورتر است مدل می شود. Rc مدل کننده

تلفات اهمی و Lac اندوکتانس سیم پیچهای مبدل میباشد. Zs امپدانس مشخصه ادوات الکترونیک قدرت است که به صورت موازی با خازن پراکندگی بین کلیدهای قدرت و زمین (Cog) قرار گرفته است. Cod نیز خازن پراکندگی بین مبدل بوست و اینورتر میباشد. جدول ۳ مقادیر پارامترهای مدل مداری تجهیزات الکترونیک قدرت را نشان می دهد.



شکل ۶: مدل وابسته به فرکانس اینور تر و مبدل DC-DC

DC-DC	و مىدا	اينور تر	معادا	، مدار	كمىتھاء	مقادر	:۳	حدوا
00000	وسبسار	יידג ד		ن مسر	ميتعاو	<u></u>	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	

$R_C(\Omega)$	Lac(mH)	$Z_{S}(\Omega)$	C _{og} (nF)	$C_{od}(nF)$	$C_{dc}(\mu F)$
•/\	٣	۲۵۰	•/1	١	74

اینورتر مورداستفاده در شبیهسازی از نوع Sunny Tripower 15000TL است که در نیروگاه خورشیدی دانشگاه بیرجند برای اتصال به ۵ پنل خورشیدی نصب شده است. مشخصات اینورتر در جدول ۴ و نحوه اتصال آن به پنلها در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات اینور تر Sunny Tripower 15000TL

ورودی DC				
ماكزيمم ولتاژ (V)	ماکزیمم جریان (A)	ماکزیمم توان (kW)		
٣۶٠	٣٣	1574.		
خروجی AC				
ماكزيمم ولتاژ (V)	ماکزیمم توان ظاهری (kVA)	ماکزیمم توان (kW)		
78.16	10	10		



شکل ۷: نحوه اتصال اینور تر به پنلهای خورشیدی

AC مدلسازی فیلتر

بهمنظور بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش بازده سیستم فتوولتائیک از یک فیلتر پایین گذر LC استفاده میشود. مدل مداری فیلتر AC در شکل ۸ و مقادیر عددی پارامترهای به کاررفته در این مدل در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: مقادیر کمیتهای مدار معادل وابسته به فرکانس

فيلتر AC				
L (H)	R (Ω)	C (µF)		
١	78/0	۱۰۰		



شکل A: مدل مداری فیلتر AC

۲-۴- مدلسازی سیستم زمین

برای سازه سیستم فتوولتائیک، زمین مشترک بهصورت شبکه مربعی افقی مطابق شکل ۹-ب است که مدل وابسته به فرکانس آن در شکل ۹-ج نمایش داده شده است. در این مدل، الکترودهای زمین به چند بخش تقسیم میشوند که مقاومت، خازن و سلف هر قسمت از روابط زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

$$R_{i} = \frac{\rho \times N}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad \Omega$$

$$C_{i} = \frac{2\pi \varepsilon l}{N \times \ln \left(\frac{4l}{a} - 1 \right)} \quad F$$

$$L_{i} = \frac{\mu_{0}}{2\pi l \times N} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad H$$
(17)

که در آنها ρ مقاومت ویژه خاک و l طول هر الکترود، L_T طول کل الکترودهای شبکه زمین، a شعاع الکترود و b عمق دفن الکترودهای افقی برحسب متر هستند. A مساحت کل شبکه زمین برحسب مترمربع، \mathcal{F} قابلیت گذردهی خاک و μ_0 پرمیتیویته خاک است. مقادیر عددی پارامترهای استفاده شده در مدل سازی سیستم زمین در جدول \mathcal{F} نشان داده شده است.



شکل ۹: سیستم زمین پنل خورشیدی

جدول ۶: مقادیر کمیتهای مدار معادل وابسته به فرکانس

ىين

زه	سيستم	
	,	

$Ln(\mu H)$	$\operatorname{Rn}\left(\Omega ight)$	Cn (nF)	مقاومت ویژه (Ωm)
1/462.	۵۵۴/۴۹۰۸	٠/٠٣١٩	۲۰۰

۳- شبیهسازی و نتایج

در این بخش به محاسبه اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به سیستم موردمطالعه در دانشگاه بیرجند پرداخته میشود که مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آن در شکل ۱۰ و مشخصات الکتریکی و مقادیر تلفات انرژی و توان مربوط به بخشهای مختلف سیستم فتوولتائیک در جدول ۷ نشان داده شده است. اضافه ولتاژها در دو حالت برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به پنل بهدست آمدهاند. پس از تأیید دقت مدل پیشنهادی، اضافه ولتاژ نقاط مختلف سیستم با استفاده از مدل پیشنهادی در این مقاله و مدلهای مرسوم، بهدست آمده و با یکدیگر مقایسه شدهاند.

با داشــتن تــوان ورودی و تلفـات هر کــدام از بخــشهـای پنـل خورشیدی، بازده پنل خورشیدی از (۱۴) بهدست میآید [۲۳].

$$\eta_{panel} = \frac{E_{in} - E_{IL} + E_T + E_{MQ} + E_{MM} + E_{OW}}{E_{in}} \times 100 =$$

$$P_{max} \to 100$$
(14)

$$\frac{1}{E^{sw} \times A_c} \times 100$$

که کلیه پارامترهای رابطـه فـوق در جـدول ۲ تعریـف شـده و معلـوم میباشند.



با داشتن تلفات انرژی اینورتر بهصورت درصدی از انرژی ورودی، طبق جدول ۸، ماکزیمم بازده اینورتر مطابق (۱۵) محاسبه میشود [۲۳]. کلیه پارامترهای رابطه (۱۵) در جدول ۸ تعریف شدهاند.

$$\eta_{inverter} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{E_{in} - E_o + E_{inv.power} + E_{pt} + E_{inv.voltage} + E_{vt}}{E_{in}}$$
(10)

جدول ۷: مشخصات الکتریکی ماژول های خور شیدی نیروگاه [۲۲]

[11]	
توضيحات	پارامتر
ماكزيمم توان	P _{max}
ماكزيمم جريان	I _{max}
ماكزيمم ولتاژ	V_{max}
جريان اتصالكوتاه	Isc
ولتاژ مدارباز	V_{oc}
ماكزيمم ولتاژ سيستم	Vref _{max}
انرژی ورودی سیستم	\mathbf{E}_{in}
تلفات انرژى سطح تابش فتوولتائيك	EIL
تلفات انرژى درجه حرارت فتوولتائيك	ET
تلفات انرژی کیفیت ماژول خورشیدی	E _{MQ}
Module array mismatch loss	Емм
تلفات انرژی اهمی سیستم کابلکشی	Eow
شدت تابش	E^{sw}
مساحت كلكتورهاى ماژول خورشيدى	A _C
درجه حرارت سلول	tc
	توضیحات ماکزیمم توان ماکزیمم ولتاژ ماکزیمم ولتاژ مریان اتصال کوتاه ولتاژ مدارباز ولتاژ مدارباز انرژی ورودی سیستم انرژی ورودی سیستم تلفات انرژی درجه حرارت فتوولتائیک تلفات انرژی درجه حرارت فتوولتائیک تلفات انرژی درجه حرارت فتوولتائیک تلفات انرژی درجه حرارت فتوولتائیک مساحت کلکتورهای ماژول خورشیدی مساحت کلکتورهای ماژول خورشیدی

جدول ۸: تلفات انرژی اینور تر [۲۴]

مقدار عددی	توضيحات	پارامتر
ፕለፕፕለ kWh	انرژی ورودی اینورتر	Ein
'. − ۶ /Ψ E _{in}	تلفات انرژی در حین عملکرد اینورتر	E_0
'/. •/• E _{in}	تلفات انرژی بیشتر از توان اسمی	Einv.power
' • / \ E _{in}	تلفات انرژی با توجه به آستانه توان	E_{pt}
'∕. •/•E _{in}	تلفات انرژی بیشتر از ولتاژ اسمی	Einv.voltage
'/. •/•E _{in}	تلفات انرژی با توجه به آستانه ولتاژ	E_{vt}

برای محاسبه بازده مبدل بوست، داشتن تلفات توان مربوط به بخشهای مختلف آن ضروری است. این تلفات شامل تلفات کلیدزنی (Pswitch)، تلفات دیودهای مدل مداری اسنابر (Pdiode) و تلفات اندوکتانس القایی مدل مداری مبدل بوست (Pinductor) میباشد که طبق رابطه (۱۶) محاسبه میشوند [۲۵].

$$P_{switch} = R \times D \times \left(\frac{I_{out}}{1-D}\right)^2, \qquad P_{inductor} = R_L \times \left(\frac{I_{out}}{1-D}\right)^2 \qquad (15)$$

$$P_{r,L} = V_r \qquad (15)$$

$$P_{diode} = V_{Forward.Drop} \times I_{out} + R_{diode} \times I_{out}$$

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \tag{1V}$$

سایر پارامترهای رابطه (۱۶) در جدول ۹ توضیح داده شده است. ازآنجاکه تلفات توان مبدل بوست درصـدی از تـوان ورودی مبـدل

میباشد (در مجموع حدود ۰/۰۲ توان ورودی)، بازده مبـدل بوسـت از (۱۸) محاسبه میشود [۲۵].

$$\eta_{Boost} = \frac{P_{in} - P_{switch} + P_{inductor} + P_{diode}}{P_{in}} \times 100$$
 (1A)

جدول ۹: پارامترهای استفاده شده در روابط محاسبه تلفات تمان میدا. بوست [۲۴]

مقدار عددی	توضيحات	پارامتر		
$\lambda \cdot / \nabla \lambda mA$	جريان خروجي مبدل بوست	Iout		
۱/۸۱ اهم	مقاومت درونى كليد مبدل بوست	R		
تقريباً برابر صفر	افت ولتاژ ديود	$V_{\text{forward.drop}}$		
۲/۲۴ اهم	مقاومت بار سلفي مبدل بوست	R_{L}		
٨V	ولتاژ خروجي مبدل بوست	\mathbf{V}_{out}		
۲۱V	ولتاژ ورودى مبدل بوست	\mathbf{V}_{in}		
۱/۶۸۸ وات	${ m V_{in}}*{ m I_{in}}$ توان ورودی=	\mathbf{P}_{in}		
۲ اهم	مقاومت دروني ديود	$\mathbf{R}_{\text{diode}}$		

بازده کل نیروگاههای خورشیدی معمولاً بین ۱۴ تـا ۲۳ درصـد است که طبق (۱۹) قابل محاسبه است.

$$\eta_{Total} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}} \times 100 \tag{19}$$

که در آن *E*in انرژی ورودی و *Eout* انرژی خروجی میباشد. در نیروگاه خورشـیدی دانشـگاه بیرجنـد، انـرژی ورودی ۳۳۳۶۱ kWh و انـرژی خروجی ۲۶۴۴۲ kWh میباشد؛ لذا بازده کـل نیروگاه برابـر ۲۰/۷۳٪ است.

جدول ۱۰ مقادیر عددی بازده بخشهای مختلف سیستم و بازده کل نیروگاه خورشیدی را نشان میدهد.

مختلف نيروگا	بخشهای	۱۰: بازده	يدول
--------------	--------	-----------	------

نام تجهيز	بازده (درصد)
پنل خورشیدی	13/88
اينورتر	۹۳/۶
مبدل بوست	۹ • /۴۶
بازدہ کل نیروگاہ	۲ • /۷۳

۳-۱- حالت اول- برخورد مستقيم صاعقه

در این حالت فرض شده که مطابق شکل ۱۱ صاعقه مستقیماً به پنلی که فاقد سیستم حفاظتی است برخورد کند. درنتیجـه جریـان صـاعقه مطابق شکل در دو مسیر *I* و *I* جـاری مـیشـود. بـرای بررسـی ایـن حالت، سیستم موردمطالعه با استفاده از مدل پیشنهادی (شـکل ۲) در صاعقه (EMTP-RV شبیهسازی شده و اضافهولتاژ نقاط مختلف با اعمـال مـوج صاعقه (۵ مـ ۲/۱ مـ ۲/۱ مـ ۱۰ به پنل خورشیدی بهدست آمـده است. ماعقه (۲ مـاکزیمم اضـافهولتـاژ ایجادشـده در پنـل ناشـی از برخـورد مستقیم صاعقه را نشان میدهد که با مقادیر بهدست آمده از مدل هـای مرسوم قبلی و مقدار واقعی بهدست آمـده از اندازه گیری در مرجع [۲۶] مقایسه شده است. مقدار ماکزیمم بهدست آمـده بـرای اضـافهولتاژهـای مقایسه شده است. مقدار ماکزیمم بهدست آمـده بـرای اضـافهولتاژهـای مقایسه شده است. مقدار ماکزیمم بهدست آمـده بـرای اضـافهولتاژهـای مقایسه شده است. مقدار ماکزیمم بهدست آمـده بـرای اضـافهولتاژهـای مقدار اضـافهولتـاژ در سـایر بخـشهـای مقاومتی مرسوم نشان میدهد. مقدار اضـافهولتـاژ در سـایر بخـشهـای سیسـتم فتوولتائیـک نیـز در













نتایج شبیه سازی نشان می دهد که اضافه ولتاژهای محاسبه شده با استفاده از مدل وابسته به فرکانس با مقادیر به دست آمده از مدل های مرسوم پیشین تفاوت دارد. طبق نتایج، در مدل پیشنهادی ماکزیمم تنش ولتاژ بر روی مبدل بوست ۸/۸٪، تنش وارده بر اینورتر ۱۳/۳٪ تنش وارده بر کابل ها ۱۸/۶۸٪ و ولتاژ ایجاد شده در سیستم زمین ۲۲/۲٪ نسبت به مدل های مرسوم افزایش می یابد. بنابراین بیش ترین اختلاف در تنش ولتاژی سیستم زمین می باشد که در صورت عدم ییش بینی درست و حفاظت نامناسب، احتمال تخریب دستگاه های مختلف موجود در ساختار کلی سیستم فتوولتائیک افزایش می یابد؛ ومین، احتمال برگشت موج ضربه صاعقه به سایر قسمتهای سازه از طریق سیستم زمین مشترک سیستم فتوولتائیک وجود داشته و خساراتی را به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۲: اضافهولتاژ ایجادشده در پنل خورشیدی (ماکزیمم اضافهولتاژ واقعی ناشی از برخورد صاعقه به پنل ۱۲۹۵۰ ولت است [۲۶])







همان طور که در شکل های ۱۲ تا ۱۶ نشان داده شده، حداکثر دامنه اضافه ولتاژ انتقالی از پنل خورشیدی ناشی از اصابت صاعقه به کابل های زمینی برابر ۷ ۲۰۵۹/۳۷، ورودی اینورتر سهفاز (مبدل بوست) ۸ ۸۶۴/۴۷ و خروجی اینورتر ۷ ۲۳۵/۶۶ میباشد؛ که با توجه به اینکه ولتاژ قابل تحمل تجهیزات الکترونیک قدرت، تجهیزات فشارضعیف و کابل ها ۷ است، احتمال سوختن و از بین رفتن کابل ها و وسایل اندازه گیری بسیار زیاد میباشد.

۲-۳- حالت دوم- برخورد غيرمستقيم صاعقه

برای بررسی برخورد غیرمستقیم صاعقه دو حالت مطابق شکل ۱۷ در نظر گرفته میشود: ۱- برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر جدا از پنل خورشیدی ۲- برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر متصل به پنل. بهطورکلی ولتاژ القایی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه Uip برابر است با [۲۷]:

$$U_{ip} = K_c \times L_M \times \frac{di}{dt}$$
 (Y ·)

که در آن *K* ثابتی است که به تعداد پایههای سازه پنا خورشیدی وابسته است. اگر سازه پنل دارای یک پایه باشد (= *K* ، برای دو پایه (۵/۲۰ – *K* و برای سه پایه و بیشتر *Kc* =۰/۴ میباشد. *di/dt* نرخ افزایش جریان است که برای ولتاژ القاشده در هر حلقه باز بر روی پنال افزایش (kA/µs) ۱۰ در نظر گرفته میشود. *LM* نیز اندوکتانس القایی است که در ادامه توضیح داده میشود.



شکل ۱۷: حالتهای مختلف برخورد غیرمستقیم صاعقه به پنل

۲-۲-۲ - برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر جدا از ینل

در صورت برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر، احتمال القای ولتاژ در قسمتهای مختلف پنل وجود دارد. بنابراین میتوان هر حلقه باز مانند ABCD در شکل ۱۷ را در نظر گرفت که ولتاژ القاشده در این حلقه به اندوکتانس القایی بین میله صاعقه گیر و پنل (*L*M) بستگی دارد. اندوکتانس هر حلقه باز مانند ABCD به طول و عرض حلقه و فاصله آن از کابلکشی هادی در کنارههای پنل بستگی دارد:

$$L_{M} = 0.2 \times (e+d) \times \sin \alpha \times \ln \frac{f+b+L}{f+b}$$
(71)

که در آن *a* زاویه بین صفحات پنل و پایه سازه است. *f* نیـز از رابطـه (۲۲) محاسبه می شود [۲۸].

$$f = \frac{K_i}{K_m} \times K_c \times H_{str} \tag{(YY)}$$

که در آن *K_m و K*i ثابتهایی هستند که به ترتیب به جنس ماده عـایق میله صاعقهگیر و به کلاس تجهیز حفاظتی انتخابشده بستگی دارند.

مشکلی که توسط میله صاعقه گیر ایجاد می شود، آسیب رسیدن به دیودهای بای پس در سلول های خورشیدی (دیود شکل ۳) ناشی از القای ولتاژ می باشد. برای بررسی تأثیر صاعقه روی دیودهای بای پس از مدل مداری شکل ۱۸ استفاده می شود که در آن فرض می شود دیودهای بای پس و بایاس مستقیم سلول خورشیدی در جهت جریان صاعقه می باشند.



شکل ۱۸: مدل مداری برای بررسی تأثیر صاعقه بر روی دیودهای بایپس

جریان دیودهای بای پس با حل مدار شکل ۱۸ در حوزه لاپـلاس و تبدیل جریان از حوزه لاپلاس به زمان برابر خواهد بود با:

$$\begin{split} \dot{I}_{D}(\mathbf{t}) &= \frac{L_{M} \cdot I_{p}}{L_{L}} \left[\frac{\sigma_{1} \cdot e^{-\sigma_{1}t}}{(\sigma_{1} - \sigma_{3})} + \frac{\sigma_{2} \cdot e^{-\sigma_{2}t}}{(\sigma_{3} - \sigma_{2})} + \frac{\sigma_{3} \cdot (\sigma_{1} - \sigma_{2}) \cdot e^{-\sigma_{3}t}}{(\sigma_{1} - \sigma_{3})(\sigma_{3} - \sigma_{2})} \right] \\ &- \frac{V_{tot}(1 - e^{-\sigma_{3}t})}{L_{t} \cdot \sigma_{3}} \end{split}$$
(YY)

که σ_3 و V_{tot} از روابط زیر بهدست میآیند:

$$\sigma_3 = \frac{R_{tot}}{L_L} \tag{14}$$

$$V_{tot} = n_c V_{CF} + V_{BF} \tag{(4)}$$

پارامترهای مدل ریاضی فوق برای دیودهای بای پس و مقادیر عددی آنها در جدول ۱۱ آمده است.

مقدار عددی	توضيحات	نام پارامتر
۱/۲ µs	زمان پیشانی موج صاعقه	$\sigma_{_1}$
۵· µs	زمان دنباله پشت موج صاعقه	$\sigma_{_2}$
١٠ kA	ماكزيمم جريان صاعقه	I_p
۱۱V	ولتاژ شکست دیودهای بای پس	V_{BF}
۱۱V	ولتاژ شکست سلول خورشیدی	V_{CF}
۱۰ µH	اندوکتانس حلقه دیود بایپس در ماژول	L_L
۱۰ mΩ	مقاومت داخلی هر سلول خورشیدی	R _{CF}
۱۱ mΩ	مقاومت داخلی دیودهای بای پس	R_{BF}
۱۲ m Ω	مقاومت معادل مدار معادل	$\mathbf{R}_{\mathrm{tot}}$
٧٢	تعداد سلولهاي خورشيدي	n _c

جدول ۱۱: پارامترهای مدل ریاضی جریان دیودهای بایپس [۲۳]

تغییر اندوکتانس القایی بین پنل و میله صاعقه گیر (*L*_M) متناسب با تغییر فاصله میله از پنل از رابطه (۱۵) بهدست میآید. جریان دیود فاصله میله و پنل) نیز با استفاده از (۱۷) قابل محاسبه است. شکل ۱۹ تأثیر مقدار اندوکتانس القایی بر جریان دیود بایپس را نشان میدهد. مطابق شکل، اندوکتانس القایی یا به عبارتی فاصله میله صاعقه گیر از پنل نقش زیادی در کاهش اثر مخرب صاعقه روی دیودهای بایپس دارد. طبق نتایج شکل ۱۹، درصورتیکه اندوکتانس القایی کوچکتر از جریان نامی مجاز پنل طبق جدول ۷ که ۹ ۹/۹ است کمتر خواهد بود. لذا اصابت صاعقه به میله ماعقه گیر و پنل بایستی از ۲۰۳۲ درنتیجه حداقل فاصله بین میله صاعقه گیر و پنل بایستی از ۲۰۳۷ متر بیش تر باشد تا در صورت اصابت ماعقه ین بنی نخواهد د



شکل ۱۹: تأثیر مقدار اندوکتانس القایی بر جریان دیودهای بای پس

۲-۲-۳ برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر متصل به پنل

در این بخش فرض می شود که میله صاعقه گیر به پنل خورشیدی متصل بوده و ضربه صاعقه به آن برخورد می کند. شکل ۲۰ مدار تست واقعی در آزمایشگاه عایق و فشارقوی دانشگاه بیرجند را نشان می دهد. در صورت برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر، جریان صاعقه از طریق هادی متصل به میله صاعقه گیر، هادی آبی رنگ شکل ۲۱، به سمت زمین جاری می شود؛ به دلیل هم جواری این هادی با کابل کشی سلول های پنل خورشیدی (هادی های قرمزرنگ شکل ۲۱)، در پنل

حلقههایی تشکیل می شود که درنتیجه القای ولتاژ، یک جریان القایی نیز از این حلقهها عبور می کند. مدار معادل این حالت در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

میلهی صاعقه کیر متصل به ماژول خورشیدی



شکل ۲۰: مدار تست موج ضربه ماژول خورشیدی در دانشگاه بیرجند

در مــدل مــداری شــکل ۲۲، Rconductor1 مقاومــت هـادی استفادهشده در میله صاعقه گیر است که یک کابل تک هسـته با قطر ۱۶ میلیمترمربع (Ω/km ۵/۱۵) میباشد؛ Rconductor2 مقاومت کابل زمین تجهیزات است که یک کابل تک هسته با قطر ۲۵ میلیمترمربع Rground1 میباشد، (۰/۷۲۷ Ω/km) مقاومت زمین پنل و Rground2 مقاومت سیستم زمین تجهیزات مجاور پنل خورشیدی میباشد.

در این حالت اندوکتانس القایی را می توان از رابطـه زیـر محاسـبه نمود:

$$L_{M} = 0.2 \times L \times \ln \frac{d+e+r}{d+r}$$
 (19)

 $e \ d$ معادل میله صاعقه گیر متصل به پنل است. پارامترهای $e \ d$ و L و L روی شکل ۱۷ مشخص شدهاند. اضافه ولتاژهای القایی که در این حالت در نقاط مختلف مدل گسترده پنل خورشیدی و سیستم فتوولتائیک به وجود آمده در جدول ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۱: نحوه کابلکشی پنل خورشیدی و جاری شدن جریان صاعقه از میله صاعقهگیر



شکل ۲۲: مدل مداری شکل ۲۰

جدول ۱۲: مقادیر عددی اضافهولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به مىله صاعقهگىر متصل به ينل خورشىدی

مقدار عددی	توضيحات	نام پارامتر
۴/۱۷۵ kV	ولتاژ ميله صاعقهگير	V_1
۴/۱۵۷ kV	ولتاژ نقطه پنل خورشیدی و زمین	V_2
۳/۸۴ kV	ولتاژ القايى پنل خورشيدى	U_{ip}

ولتاژ قابل تحمل تجهیزات فشارضعیف و کابلها ۷ kV است. لذا بر اساس مقادیر بهدستآمده کاملاً مشخص است که در اثر برخورد صاعقه، ولتاژ بسیار زیادی تولید میشود که باعث آسیب رساندن به ماژولهای خورشیدی خواهد شد. همچنین در اثر برخورد صاعقه و اختلاف پتانسیل که در سیستم زمین به وجود میآید، احتمال آسیب به اینورتر و دستگاههای اندازه گیری نیز بسیار زیاد خواهد بود.

مقایسه بین حالتهای مختلف برخورد صاعقه در جدول ۱۳ نشان داده شده است. طبق نتایج، در صورت اصابت مستقیم صاعقه به پنل بیشترین تنش ولتاژی بر روی خود پنل اتفاق میافتد که با استفاده از میله صاعقهگیر میتوان تنش ولتاژی ناشی از صاعقه بر روی پنل را بهطور قابل ملاحظهای کاهش داد. با این حال، میله صاعقهگیر بر روی اضافهولتاژهای ایجادشده بر روی سیستم زمین تأثیر زیادی نخواه د داشت.

جدول ١٣: مقايسه حالات مختلف برخورد صاعقه

برخورد مستقيم صاعقه					
كابلها	اينورتر	سيستم زمين	پنل	نام تجهيز	
۲/•۵۹	•/884	۶/۷۲ ۱	17/298	ماكزيمم اضافهولتاژ (kV)	
برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر					

ميله صاعقه گير	سيستم زمين	پنل	نام تجهيز
۴/۱۷۵	4/107	۳/۸۴	ماكزيمم اضافهولتاژ (kV)

۴- نتیجهگیری

برای حفاظت مؤثر پنلهای خورشیدی در برابـر تـنشهای صـاعقه، پیشبینی دقیق این اضافهولتاژها ضـروری اسـت. تـاکنون مـدلهـای مرسوم برای مدلسازی پنـلهـای خورشـیدی در شـرایط گـذرا صـرفاً

مقاومتی هستند که اثر خازن های پراکندگی را در نظر نمی گیرند. درحالی که با توجه به ماهیت فرکانس بالای صاعقه، اثر خازن های پراکندگی بر توزیع میدان و تنشهای ولتاژی مهم میباشد. به این منظور در این مقاله برای مدل سازی پنل های خورشیدی در حالت گذرا، یک مدل گسترده وابسته به فرکانس ارائه شده است که برخلاف مدل های صرفاً مقاومتی مرسوم، اثر خازن های پراکندگی را نیز در نظر می گیرد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی و مدل های مرسوم با نتایج اندازه گیری، دقت مدل پیشنهادی را تأیید می کند.

پس از تأیید دقت مدل پیشنهادی، نحوه مدلسازی و حالتهای مختلف برخورد صاعقه به پنل نیز مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، در صورت برخورد مستقیم صاعقه به پنل، کابلهای زیرزمینی و تجهیزات اندازه گیری متصل به زمین در معرض بیش ترین تنشهای ناشی از صاعقه قرار دارند که باید از نظر حفاظت در برابر صاعقه مورد توجه قرار گیرند.

نتایج همچنین نشان داد که در صورت استفاده از میله صاعقه گیر نیز بهدلیل القای ولتاژ صاعقه برخوردی به میله بر روی پنل، احتمال آسیب دیدگی دیودهای بای پس وجود دارد. از آنجاکه مقدار ولتاژ القایی به اندوکتانس القایی بین میله و پنل یا به عبارتی به فاصله بین ایـن دو بستگی دارد؛ وجود یک حداقل فاصله بـین میلـه صاعقه گیـر و پنـل خورشیدی ضروری است. حداقل فاصله مابین میله و پنل با اسـتفاده از روش معرفی شده در مقالـه و مشخصات نامی پنـل خورشـیدی قابـل محاسبه است. طبق نتایج حاصله، حـداقل فاصله لازم بـرای پنـل با

طبق نتایج بهدست آمده در سیستم حفاظت شامل میله صاعقه گیر متصل به پنل خورشیدی نیز بهدلیل مجاورت کابل کشی هادی مورداستفاده در میله صاعقه گیر و کابل کشی آرایه های پنل، اضافه ولتاژ القایی بزرگی مخصوصاً در نقطه مشترک زمین و پنل خورشیدی به وجود خواهد آمد. لذا احتمال آسیب اینورتر و دستگاه های اندازه گیری افزایش خواهد یافت که در این حالت با افزایش طول میله صاعقه گیر به منظور مستهلک کردن ضربه صاعقه و نصب برق گیرهای DC می توان از این آسیب ها جلوگیری نمود.

مراجع

 [۱] حسین شکری و سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴.

- [2] N. Papanikolaou, C. Christodoulou and M. Loupis, "Introducing an improved bidirectional charger concept for modern residential standalone PV systems," *Energy Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 21–41, 2015.
- [3] H. Shareef, A. H. Mutlag and A. Mohamed, "A novel approach for fuzzy logic PV inverter controller optimization using lightning search algorithm," *Neurocomputing*, vol. 168, pp. 435–453, 2015.

consideration," in proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1091–1094, 2014.

- [16] M. Belik, "PV panels under lightning conditions," in proc. 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), pp. 367–370, 2014.
- [17] Y. Mendez Hernandez, D. Ioannidis, G. Ferlas, T. Tsovilis, Z. Politis and K. Samaras, "An experimental approach of the transient effects of lightning currents on the overvoltage protection system in MW- class photovoltaic plants," *in proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1972–1977, 2014.
- [18] H. Singer, H. Steinbigler and P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 93, no. 5, pp. 1660–1668, 1974.
- [19] P. Maruvada and N. Cavallius, "Capacitance calculation for some basic high voltage electrode configurations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 5, pp. 1708-1713, 1975.
- [20] L. Greev and S. Greev, "On HF circuit models of horizontal grounding electrodes," *IEEE Transactions on Electromagen. Compat.*, vol. 51, no.3, pp. 873-875, 2009.
- [21] J. L Jiang, H. C. Chang, H. C. Kuo and C. K. Huang, "Analysis of transient energy affection for wind farm under lightning" *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 292-297, 2012.
- [22] P. Ledesma and J. Usaola, "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis," *IEEE Transactions On Energy Convers*, vol. 20, no. 2, pp. 388– 397, 2005.
- [23] M. M. Emin and F. Dinçer, "A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2176-2184, 2011.

علمی-اجرایی نیروگاه، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۲.

- [25] E. Travis, "Boost converter efficiency through accurate calculations," *Power Electronics*, 2008.
- [26] P. Nattapong, "Model and experiment for study and analysis of Photovoltaic lightning Effects," *International Conference IEEE on Power System Technology* (POWERCON), 2010.
- [27] E. Pons and R. Tommasini, "Lightning protection of PV systems," 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), pp. 1-5, 2013.
- [28] C. Charalambous, N. D. Kokkinos, and N. Christofides, "External lightning protection and grounding in largescale photovoltaic applications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, pp. 427-434, 2014.

[۴] رضا شریعتینسب و علیاکبر سالاری، «بررسی تزریق لایه ریزدانههای اکسید روی در پوشش عایقی برق گیر و طراحی بهینه ابعاد آن با هدف توزیع یکنواخت میدان»، *مجله مهندسی* برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴.

- [5] S. Ittarat, S. Hiranvarodom and B. Plangklang, "A computer program for evaluating the risk of lightning impact and for designing the installation of lightning rod protection for photovoltaic system," *Energy Procedia*, *10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium*, vol. 34, pp. 318–325, 2013.
- [6] C. Ferrara and D. Philipp, "Why do PV modules fail?" *Energy Procedia*, vol. 15, pp. 379-387, 2012.
- [7] G. J. Jorgensen and T. J. McMahon, "Accelerated and outdoor aging effects on photovoltaic module interfacial adhesion properties," *Progress in Photovoltaics*, *Research and Applications*, vol. 16, pp. 519-527, 2008.
- [8] C. G. Zimmermann, "Time dependent degradation of photovoltaic modules by ultraviolet light," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 24, 2008.
- [9] N. Fallah, C. Gomes, M. Zainal, A. Ab Kadir, G. Nourirad, M. Baojahmadi and R. Ahmed, "Lightning protection techniques for roof-top pv systems," *in proc. 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2013)*, Langkawi, Malaysia, 2013.
- [10] T. Jiang and S. Grzybowski, "Influence of lightning impulse voltages on power output characteristics of Photovoltaic modules," *in proc. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2014.
- [11] Z. Benesova, R. Haller and J. Birkl, "Overvoltages in photovoltaic systems induced by lightning strikes," *in proc. International Conference on Lightning Protection* (*ICLP*), pp. 1-6, 2012.
- [12] P. Vangala, M. Ropp, K. Haggerty, K. Lynn and W. Wilson, "Field measurements of lightning-induced voltage transients in PV arrays," *in proc. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC '08)*, pp. 1–4, 2008.
- [13] C. A. Charalambous, N. Christofides, N. Kokkinos, M. Z. A. Ab Kadir and C. Gomes, "A simulation tool to assess the lightning induced over-voltages on dc cables of photovoltaic installations," *in proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1571– 1576, 2014.
- [14] T. Jiang and S. Grzybowski, "Impact of lightning impulse voltage on polycrystalline silicon photovoltaic modules," *in proc. International Symposium on Lightning Protection* (XII SIPDA), pp. 287–290, 2013.
- [15] K. Yonezawa, S. Mochizuki, Y. Takahashi, T. Idogawa and N. Morii, "Evaluation of SPDs for a PV system using the FDTD method taking concrete foundations into