

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИТЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ МОДУЛИ

**Любомир Секулов, Георги Павлов, Мартина Томчева,
Петър Бодуров, Васил Тодоров**

res_start@abv.bg, g_pavlov61@abv.bg, martito_666@abv.bg

***Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
гр. София, ул. „Гео Милев” 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ***

Ключови думи: фотоволтаични панели, соларни панели, соларни модули, фотоволтаични модули, фотоволтаичен стринг, слънчева енергия, ефективност на фотоволтаици, слънчева радиация

Резюме: Фотоволтаичните (PV) клетки могат да се използват по същия начин, както всеки друг източник на енергия. Всяка от тях е проектирана да поддържа определено количество ток при дадено напрежение. Въпреки това, за разлика от конвенционалните захранващи източници на електрическа енергия, мощността на PV зависи от светлинния поток и неговата енергия. Освен това не всички клетки, респективно модули или стрингове, осигуряват една и съща мощност при едни и същи условия на осветяване, дори ако елементите са с еднакъв размер и дизайн, еднакви производители и еднакви модели. Отклоненията в технологичните режими могат да доведат до забележими разлики в изходните токове на елементите от една и съща партида. Тези фактори трябва да се вземат предвид при проектирането и производството на конструкциите на PV модулите. Ако е необходимо да се извлече максимална ефективност от PV модулите или стринговете, трябва да се проверят всички техни елементи. За да е ясно кои параметри трябва да бъдат проверени трябва да са известни характеристиките на PV модула, както и начините за техните измервания.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години проблемът за оползотворяването на слънчевата енергия привлича все повече вниманието на учените и инженерите. Повишеният интерес към този проблем се дължи на неговите перспективи. Има основания да се надяваме, че енергийната индустрия, поне в слънчевите райони на земното кълбо, ще може да се развие до голяма степен чрез пряко преобразуване на слънчевата енергия в други видове енергия. В областта на соларната енергетика е прието да се разграничават три основни показателя, поток или енергия за даден интервал от време; слънчева радиация (СР) мощност на светлинния поток или интензивност; продължителност на слънчевото греене за даден интервал от време. СР е практически неизчерпаем източник на възобновяема енергия, който многократно превишава ресурсите на всички останали енергийни източници.

ПАРАМЕТРИ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ МОДУЛИ

Енергията на СР зависи от дължината на вълната $E_f = hY$, където h е константата на Планк, $h = 6,62617610^{-34} Js.$, а Y е честотата на електромагнитните вълни.

Определена е соларна константа [2, 6]:

$$(1) \quad e_0 = \int_0^{\infty} e_{\lambda}(\lambda) dx = const, \frac{W}{m^2},$$

Съгласно международното споразумение от 1981 г. се препоръчва при изчисленията да се приема $e_0 = 1370, \frac{W}{m^2}$. От друга страна, самият спектър на СР може да бъде разделен по дължина на електромагнитната вълна на три основни области или зони, което е много важно при оценката на ефективността на конкретни соларни енергетични установки:

- в ултравиолетовата област на СР при $0 < \lambda < 0,4 \mu m$, заемайки около 9% от общия e_0 ;
- в областта на видимия спектър СР при $0,4 < \lambda < 0,7 \mu m$, заемайки около 45% от цялата e_0 ;
- областта на инфрачервеното топлинно излъчване при $\lambda > 0,7 \mu m$ заемаща около 46% от общия e_0 .

В същото време фракцията СР за $\lambda > 2,5 \mu m$ е практически много малка. Счита се, че зоната на e_0 , която обикновено се използва в слънчевата енергия, е ограничена от дължината на вълната λ до $2,4 \mu m$ (95 % от e_0).

В момента се обръща специално внимание на работата върху фотоволтаичните клетки. Още през 1953 г. се е смятало, че максималната ефективност на фотоволтаичните клетки, от които се изгражда модула не може да бъде повече от 0,6 %. Още през 1955 г. е произведена слънчев модул, чиято ефективност на отделните клетки достига 10 %. Понастоящем се произвеждат серийно фотоволтаични модули чиято ефективност надвишава 22 %. Това означава, че при интензитет на слънчевата светлина от $1000 W$ ще бъде възможно да се получи $220 W$ електроенергия от $1 m^2$ осветена повърхност. На практика обаче ефективността на фотоволтаичния модул зависи от редица условия свързани с годишното слънцестоене, околната температура, надморската височина, въздушната среда, ъгълът на ориентация на модула спрямо земната повърхност, азимутът, технологията на производство на модула и др.

Тези факти показват, че задачата за директно преобразуване на слънчевата енергия в електрическа става реалистична за изграждането на електроцентрали с общо предназначение, като най-важен фактор е ефективността на фотоволтаичния модул.

Определящо за производството на електроенергия, респективно ефективността от фотоволтаични модули е географската ширина. За България най-северната точка е устието на Тимок ($44^{\circ}12'45''$ с. ш. $22^{\circ}39'57''$ и. д.), а най-южната връх Вейката ($41^{\circ}14'05''$ с. ш. $25^{\circ}17'18''$ и. д.), област Кърджали.

За да се определят идеалните волт-амперни характеристики на фотоволтаичен модул при осветяване, математическите резултати от уравнението на идеалния диод се комбинират с характеристиките при осветяване на PV клетката. Токът на идеалния диод I_D се изразява чрез следното уравнение [5, 7]:

$$(2) \quad I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right), A$$

където I_0 , обратния ток на насищане на PN прехода и се определя от формулата:

$$(3) \quad I_0 = A \left(\frac{qD_E n_i^2}{L_E N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right), A$$

където:

N_A - концентрацията на акцептора в p-областта;

N_D - концентрацията на донора в n-областта;

n_i - вътрешна концентрация на носителя;
 D_h - коефициент на дифузия на акцептора;
 D_E - коефициент на дифузия на електроните;
 L_E - дължина на дифузия (колко навътре в материала се разпространяват електроните) на електроните;

L_h - дължина на дифузия на акцептора;

A - площта на напречното сечение на диода;

q - големината на електронния заряд $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

k_B - константата на Болцман, $1,38 \cdot 10^{-23}$.

За PV модули се прави предположението, че скоростта на генериране на двойки електрон- акцептора от светлината (g_{op}) е постоянна за целия модул. Типичните диодни уравнения за определяне на излишъка на носители включват допълнителен член, свързан с g_{op} , както следва:

За PV клетка е валидна зависимостта [5, 7]:

$$(4) \quad I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right) - I_L, A$$

Където I_L е токът породен от фотоефекта.

$$(5) \quad I_L = qAg_{op}(L_h + L_e + W), A$$

където:

W е широчината на PN прехода;

g_{op} е константа зависеща от структурата на клетката.

Обикновено за характеризирание на мощността на PV клетки се използват три основни параметъра: ток на късо съединение (I_{SC}), напрежение на отворена верига (V_{OC} напрежение без товар) и коефициент на запълване (FF) [5, 7].

Напрежението на отворена верига се изчислява по формулата:

$$(6) \quad V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right), V$$

Това уравнение илюстрира взаимозависимостта на I_{sc} и V_{oc} . Коефициентът на запълване FF използва I_{sc} и V_{oc} , както и максималните точки на тока и напрежението (V_{mp} и I_{mp}) в следния израз [5]:

$$(7) \quad FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{OC} I_{SC}}$$

Често използван емпиричен израз е следният:

$$(8) \quad FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}$$

където v_{oc} е реалното напрежение, определено като

$$(9) \quad v_{oc} = \frac{V_{OC} q}{k_B T}, V$$

Ефективността на преобразуване на енергията за PV клетки се изчислява по следното уравнение [5]:

$$(10) \quad \eta = \frac{V_{mp} I_{mp} FF}{P_{in}}$$

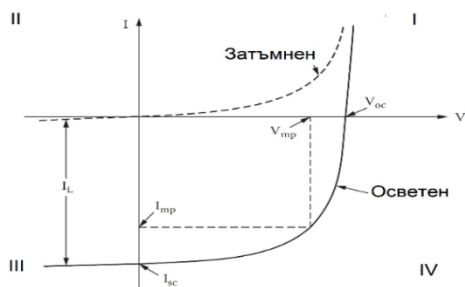
където P_{in} е общата мощност на светлината, падаща върху клетката.

Това уравнение показва зависимостта на изчисленията на ефективността от коефициента на запълване. На фигура 1 е графичната V-A характеристика на фотоволтаична клетка и зависимостите V_{OC} , I_{SC} , V_{mp} и I_{mp}

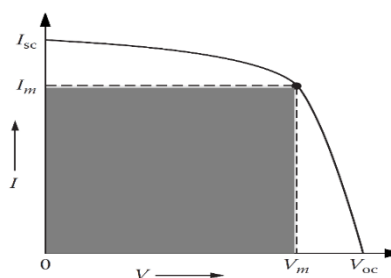
Показана е и разликата между тока при осветеност и тока при затъмнение.

Коефициентът на запълване се определя, като се раздели квадратната площ на графиката от фигура 1 на по-голямата външна квадратна област, образувана от пресечната точка на V_{OC} и I_{SC} . На фигура 1 резултатите от осветяването са в област в четвъртия квадрант, което показва къде може да се извлече електрическа енергия от

модула. Когато върху клетката не пада светлина, PV клетка е еквивалентна на диод или полупроводников токоизправител. Концентрацията на носители в осветената клетка превишава тази на стойностите при липса на осветеност. Когато не пада светлина върху носителите се връщат към равновесните си стойности чрез рекомбинация. Стандартни методи за представяне на V-A характеристика за PV клетка, е да се включи само четвъртият квадрант и да се „обърне“ в първия квадрант, както е показано на фигура 2. Затъмненият правоъгълник илюстрира максималната мощност. Коефициентът на запълване се изчислява като отношение на правоъгълника на максималната мощност



Фиг. 1. Волт-амперна характеристика на фотоволтаична клетка



Фиг. 2. Мощност на фотоволтаична клетка

към правоъгълника образуван от V_{OC} и I_{SC} [5].

Основните параметри, които влияят върху ефективността на PV клетки, освен пространственото ориентиране, са широчина на прехода на полупроводника, работната температура, светлинния поток, видът и чистотата на материала, паразитните съпротивления и капацитети.

Построяването на волт-амперната характеристика (V-A) е от решаващо значение за оценяване на ефективността на PV модули.

Както е показано в предишните уравнения, I_o трябва да бъде възможно най-малък за постигане на максимален V_{OC} . На общоприетата оценка на минималната стойност на тока на насищане е I_o [5, 7]:

$$(11) \quad I_o = 1,5 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right), A$$

С увеличаването на E_g I_o намалява, а V_{OC} се увеличава. Максималната стойност на V_{OC} се увеличава с увеличаване на широчината на прехода. Впоследствие V_{OC} оказва влияние върху V_{mp} , което от своя страна влияе на ефективността. Това е една от причините, поради които GaAs клетките с широчина на прехода 1,4 са по-ефективни от Si клетки с широчина на прехода 1,12. Друга причина, поради която GaAs клетките са по-ефективни се дължи на техните характеристики, свързани с поглъщането на светлина. При материалите със симетрична широчина на прехода като GaAs, светлината се поглъща бързо и рискът тя да премине зад кристала намалява. Повечето PV клетки са изградени от силиций, който е материал с несиметричен преход, което означава, че излъчването или поглъщането на фотон е необходимо и за енергии на фотона близки до тези на широчината на прехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За да се определят параметрите на PV модула е необходимо да се направят измервания при различни товари и различни температурни режими на модула.

В доклада са описани основните параметри, които могат да бъдат измерени и получените резултати да се използват за анализ на характеристиките на PV модула, к.п.д. на модула, товарни характеристики на модула и да се установят налични неизправности.

Независимо, че всеки производител дава основните параметри V_{OC} и I_{SC} на практика те биха могли да бъдат променени при транспорт, монтаж и експлоатация.

За да се поддържа по-висока ефективност на PV модулите трябва периодично да се измерват техните основни параметри.

Тези измервания могат да се осъществят с уреди – волтметри, амперметри и променлив активен товар, като получените резултати от тях могат да се анализират както отделно, така и в комбинация.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Иванов П., Чернева Г. Моделиране на фотоволтаични панели. VI научна конференция с международно участие KEIT 2022, Научно списание “Механика, Транспорт, Комуникации”, ISSN 1312-3823, бр. 3, 2022 стр.X-7-X-13 <https://mtc-aj.com/library/2267.pdf>
- [2] Пачаманов А. Електроснабдяване и осветителна техника, 2004, ISBN 954-438-253-4
- [3] Чернева Г., Спиридонова Хр. Определяне параметрите на работната точка на фотоволтаичен панел при различен интензитет на слънчево греене. Сборник доклади VII научна конференция с международно участие TechCo 2023, ISSN 2535-079X, стр.71-74. <https://www.tugab.bg/images/tk-lovech/Techco-Lovech-23-web.pdf>
- [4] Cherneva G., Petrakieva-Filipova S. Modeling and analysis of an autonomous photovoltaic system for laboratory research. Proceedings of 14th Electrical Engineering Faculty Conference, BulEF 2022, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55320895700>
- [5] Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota “Solar Energy: renewable Energy and the Environment” ISBN 978-1-4200-7566-3
- [6] Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. -ЛР № 020528 от 05.06.97
- [7] http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_electronics.php

PARAMETERS ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Lyubomir Sekulov, Georgi Pavlov, Martina Tomcheva, Petar Bodurov, Vasil Todorov
res_start@abv.bg, g_pavlov61@abv.bg, martito_666@abv.bg

***Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA***

Key words: *photovoltaic panels, solar panels, solar modules, photovoltaic modules, photovoltaic string, solar energy, photovoltaic efficiency, solar radiation*

Abstract: *Abstract: Photovoltaic (PV) cells can be used in the same way as any other energy source. Each is designed to maintain a certain amount of current at a given voltage. However, unlike conventional power sources, the power output of PV depends on the light flux and its energy. Furthermore, not all cells, respectively modules or strings, provide the same power under the same lighting conditions, even if the cells are the same size and design. Variations in process modes can lead to noticeable differences in the output currents of cells from the same batch. These factors must be taken into account in the design and manufacture of PV module structures. If it is necessary to extract maximum efficiency from PV modules or strings, all their elements should be checked. In order to be clear which parameters need to be checked, the characteristics of the PV module as well as the ways to measure them need to be known.*