

Изследване температурата на фотоволтаични модули при най-голямо годишно електропроизводство

Красимир Мартев, Константин Коев

An Investigation of the photovoltaic modules' temperature at the highest annual energy yield: A photovoltaic non-tracking installed system on the roof of a manufacture building, on an unpopulated place, is investigated. The total system power pick value is 117.24 kWp by 852 modules. The influence of the photovoltaic modules' temperature on the energy yield at the constant solar irradiances is analyzed for the highest monthly energy yield per 2013 year. The regression models of these functions are suggested. The accuracy of these regression models is closely depended of the dynamic changing of the solar irradiance. The changing of the modules' temperature causes the varying of the energy yield.

Key words: photovoltaic modules, solar irradiance, energy yield, photovoltaic modules' temperature.

ВЪВЕДЕНИЕ

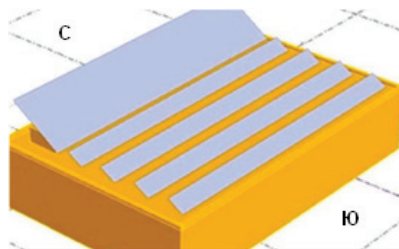
Фотоволтаичните клетки и панели широко се използват за преобразуване слънчевата радиация в електрическа енергия. Наличието на практически неограничени количества безплатен енергиен ресурс (слънчевата радиация) и липсата на вредни отпадъци са основните предимства, които определят приложението на тези изделия. Основен недостатък на фотоволтаичните модули е влиянието на температурата върху коефициента на полезно действие (к.п.д.), чиято стойност непрекъснато намалява в процеса на експлоатация [3,4].

Характеристиките на фотоволтаичните модули зависят от температурата им, съответно и от температурата на прегряването им [1,2,4]. Предлаганите модели на тези зависимости са от значение за изследване и прогнозиране продължителността и ефективността на експлоатацията на фотоволтаичните модули [3].

Целта на изследването е да се анализират измененията на произведената електрическа енергия, в зависимост от температурата на модулите на фотоволтаичните модули.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на изследването



Фиг. 1. Разположение на модулите върху покривната конструкция: С – север; Ю - юг.

Разглежданата фотоволтаична система е с обща изходна максимална мощност 117,24 kWp. Системата е разположена на терен с надморска височина 76 m, върху покрив на производствена сграда, в промишлен район, извън населено място.

Всичките 852 броя фотоволтаични модули са ориентирани в посока юг, стационарно монтирани под наклон от 30° спрямо земната повърхност. Една част от модулите – 528 бр., са с максимална мощност - 130 Wp. Те са разположени в 4 реда, с по 3 секции (фиг.1), като във всяка секция са монтирани по 44 модула.

Останалите 324 броя модула са с максимална мощност 150 Wp, разположени в северната част на покрива (фиг.1). Тези модули са разпределени в 6 секции, всяка от които съдържа 54 модула, подредени в 2 реда.

Произведената електрическа енергия се преобразува от инвертори, монтирани към всяка секция фотоволтаични модули. Общият брой на инверторите е 18.

Методика и средства за изследването

Слънчевата радиация и температурата на модулите са основните фактори, определящи производството на електрическа енергия [3,4]. Първият фактор е определяещ, защото той влияе върху температурата на модулите.

Интензитетът на слънчевата радиация се измерва чрез вграден измервателен преобразувател в специализирана метеорологична станция Sunny Sensor Box, производство на SMA (Germany). Преобразувателят работи с точност $\pm 8 \%$, при обхват на измерване $(0 \dots 1500) \text{ W/m}^2$ и разрешителна способност 1 W/m^2 [5].

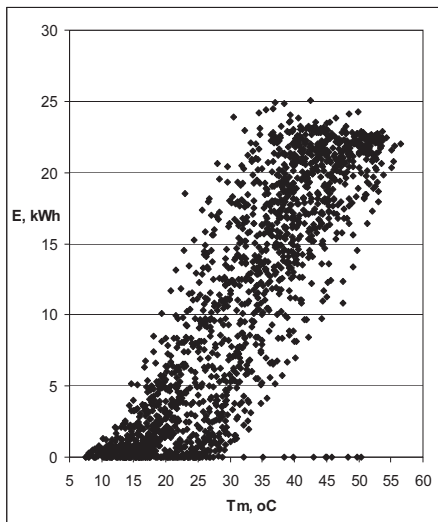
Температурата на модулите и околната среда се измерва чрез съпротивителни преобразуватели тип Pt100, с обхват $(-40 \dots +125)^\circ\text{C}$ и точност $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и разрешителна способност $0,1^\circ\text{C}$ [5].

Стойностите на интензитета на слънчевата радиация и температурите на модулите и на околната среда се измерват и записват на всеки 15 min. На същия интервал от време системата автоматично определя и записва произведените количества електрическа енергия.

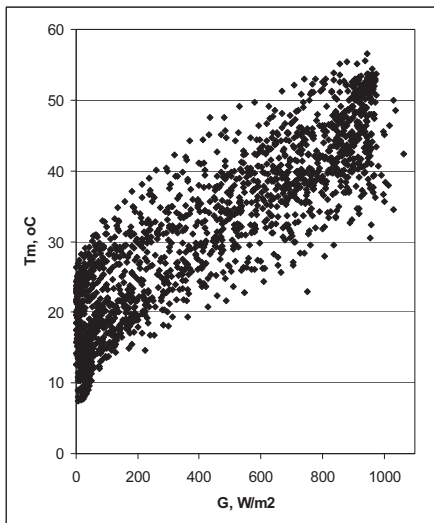
Резултати от изследването

Разглежданите данни за интензитета на слънчевата радиация G , температурата на модулите T_m и електрическа енергия E (фиг.2,3) са за месец май, 2013 г. Този месец се характеризира с изменение на интензитета на слънчевата радиация в широк диапазон, а количеството произведена електрическа енергия е най-голямо за годината.

Данните за интензитета на слънчевата радиация и произведената електрическа енергия се характеризират с незначителни пропуски – липсват данни за първия ден от месеца и за някои часове от 16-я ден. Причините са оперативни прекъсвания.



Фиг.2. Графика на зависимостта $E = f(T_m)$.



Фиг.3 Графика на зависимостта $T_m = f(G)$.

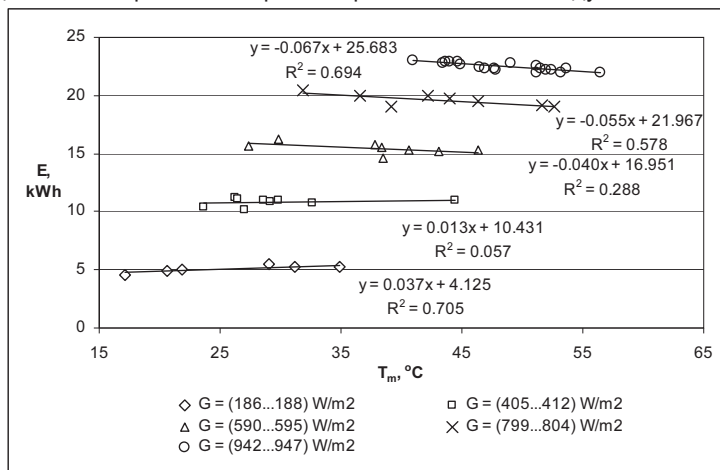
Анализът на фиг.2 показва, че произведената електрическа енергия E много силно зависи от температурата на фотоволтаичните модули T_m . Наблюдава се голямо разсейване на стойностите, дължащо се на различните работни условия – интензитет на слънчевата радиация и температура на околната среда. На графиката

се виждат точки, при които няма производство на електрическа енергия. Причината са оперативни прекъсвания в работата на системата.

Анализът на на фиг.3 показва, че температурата на фотоволтаичните модули T_m зависи силно от интензитета на слънчевата радиация G , с голямо разсейване на стойностите. Причината е в различните условия на охлаждане на модулите.

Представените графики (фиг.2,3) затрудняват изследването на функционална зависимост между трите величини – T_m , E и G . Анализът показва, че по-подходящо изменението на произведената енергия E е да се представи в зависимост от температурата T_m , при определени постоянни стойности на интензитета на слънчевата радиация [2]. На фиг.4 са показани такива зависимости за няколко стойности на интензитета на слънчевата радиация, които са близки до стандартните за анализ на характеристиките на модулите [4] - 200, 400, 600, 800 и 1000 W/m^2 . Съществуват разлики между тези стойности на слънчевата радиация и използваните в изследването. Това се дължи на няколко причини. Величините се измерват на всеки 15 min и почти е невъзможно да се регистрират точни съвпадения между използваните и стандартните стойности на интензитета на слънчевата радиация. Ако такива съвпадения съществуват, те са много малко на брой и не могат да се използват за анализ. Повече съвпадения може да се очаква да се получат при повече данни. В случая се анализират записите на измервателните уреди за един месец, които са повече от 1700 броя. Поради изброените причини и като се вземе под внимание точността на измервателните уреди, са подбрани стойности на интензитета на слънчевата радиация с малко разсейване и близки до стандартните.

На фиг.4 са представени графики и регресионни модели на изменението на произведената електрическа енергия от фотоволтаичните модули E в зависимост от



Фиг.4. Изменение на произведената електрическа енергия от фотоволтаичните модули E , kWh, в зависимост от температурата им T_m , °C, при определени стойности на интензитета на слънчевата радиация G .

температурата им T_m , при определени стойности на интензитета на слънчевата радиация G . Анализът показва, че при по-малките стойности на радиацията – до 412 W/m^2 , при нарастването на температурата T_m , произведената електрическа енергия E се увеличава. Коефициентите на наклона на правите, представящи регресионните модели на функционалната зависимост $E = f(T_m)$, са 0,037 при $G=(186...188) W/m^2$ и 0,013 при $G=(405...412) W/m^2$. Сравняването на тези коефициенти показват, че функционалната зависимост е по-силно изразена при по-малкия интензитет на

слънчевата радиация, отколкото при по-големия интензитет. Сравняването на двата регресионни модела показва, че уравнението при по-малкия интензитет на слънчевата радиация по-добре описва експерименталните данни, отколкото уравнението при по-големия интензитет. Това се определя от корелационния коефициент R^2 , чиито стойности съответно са 0,705 и 0,057.

Причината за разликите в корелационните коефициенти е по-голямото разсейване на измерените стойности на величините. То може да се дължи на избрания интервал на изменение на интензитета на слънчевата радиация и на скоростта, с която се изменя този интензитет между два съседни момента на измерване (интервалът е 15 min). Допълнителни изследвания с ограничаване интервала на интензитета до (409...412) W/m^2 , при което се реализират само 4 стойности, показват, че корелационният коефициент е $R^2 = 0,417$ единици. В този случай, коефициентът на наклона на правата на модела е 0,020, а свободният член – 10,162. Тези стойности малко се различават от представените на фиг.4 за $G = (405...412) W/m^2$. Моделите и в двата случая – при (409...412) W/m^2 и (405...412) W/m^2 , не описват адекватно измерените стойности, защото $R^2 < 0,75$ [1]. Това е предпоставка за анализ на по-голям обем данни за разглежданите интензитети на слънчевата радиация, с цел получаване на по-точен модел.

Повишаването на интензитета от $G = (405...412) W/m^2$ до $G = (942...947) W/m^2$ предизвиква промяна в наклона на правите, представящи линейните регресионни модели. Следователно, може да се предположи, че при интензитет на слънчевата радиация $G = (412...590) W/m^2$ се променя наклонът на правите на линейния регресионен модел на зависимостта $E = f(T_m)$. Причината е влиянието на температурата T_m върху електрическите характеристики на модулите [4].

Отрицателният коефициент на наклона на правите, показва, че увеличаването на температурата на фотоволтаичните модули T_m , за разлика от случая при интензитет $G \leq (405...412) W/m^2$, води до намаляване производството на електрическа енергия E , т.е. намалява к.п.д. Най-голям корелационен коефициент и най-голям наклон на правите за трите модела се получава при интензитет на радиацията $G = (942...947) W/m^2$.

Всички графики (фиг.4) се характеризират с разсейване, което е малко при регресионните модели с голям корелационен коефициент. Това разсейване може да се обясни с динамиката, с която се изменя интензитетът G между два съседни момента на измерване и с условията на охлаждането на фотоволтаичните модули.

Допълнителни изследвания са проведени, при които се изключват стойности, съответстващи на по-динамични изменения на интензитета на слънчевата радиация за два съседни момента на измерването \dot{y} . Получените резултати, с изключение на коментираните по-горе за $G = (405...412) W/m^2$, са представени в табл. 1.

Таблица 1
Регресионни модели на зависимостта $E = f(T_m)$, при различни интензитети на слънчевата радиация G

| модел | $G, W/m^2$ | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|
| | (186...188) | (590...595) | (799...804) | (942...947) |
| $E = 0,032 \cdot T_m + 4,190$ | $E = -0,063 \cdot T_m + 18,020$ | $E = -0,065 \cdot T_m + 22,516$ | $E = -0,067 \cdot T_m + 25,693$ | |
| R^2 | 0,856 | 0,812 | 0,971 | 0,746 |

Анализът на данните от табл.1 показва, че разглежданите модели се характеризират с по-големи стойности на R^2 , в сравнение с моделите от фиг.4. Това потвърждава предположението за силното влияние на динамиката на изменение на интензитета на слънчевата радиация върху точността на регресионните модели.

Най-точен е моделът при $G = (799...804) W/m^2$, поради най-голяма стойност на R^2 . Зависимостта $E = f(T_m)$ най-силно е изразена при $G = (942...947) W/m^2$, поради най-голям коефициент на наклона на правата на модела - -0,067.

Влиянието на температурата на модулите T_m върху електропроизводството им E е подходящо да се анализира и чрез измененията на двете величини, за всеки изследван интензитет на слънчевата радиация (фиг.4). Получените резултати са показани в табл. 2.

Таблица 2
Изменения на произведената електрическа енергия ΔE , при промяна на температурата на фотоволтаичните модули ΔT_m , за различни интензитети на слънчевата радиация G

| | $G, W/m^2$ | | | | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | (186...188) | (405...412) | (590...595) | (799...804) | (942...947) |
| $\Delta E, kWh$ | 0,636 | 0,584 | - 0,265 | - 1,415 | - 1,011 |
| $\Delta T_m, ^\circ C$ | 17,7 | 20,7 | 19,0 | 20,8 | 15,5 |

Анализът на резултатите от табл.2 показват, че при интензитет на радиацията $G = (799..804) W/m^2$ и промяна на температурата $\Delta T_m = 20,8^\circ C$, размахът на електрическата енергия е най-голям - $-1,415 kWh$. В този случай отношението $\Delta E/\Delta T_m$ е най-голямо - $-0,068 kWh/^\circ C$. Най-малка промяна в електроенергията – с $-0,265 kWh$, се наблюдава при $G = (590..595) W/m^2$ и $\Delta T_m=19,0^\circ C$. Стойностите на радиацията в интервала $G=(412...590) W/m^2$ са критични, защото разделят изменението на ΔE на положително – при $G \leq (405...412) W/m^2$ и отрицателно – при $G \geq (590...595) W/m^2$, при колебание на изменението на температурата ΔT_m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на проведените изследвания на зависимостта $E = f(T_m)$, при $G = \text{const}$, за месец май, когато електропроизводството е най-голямо за 2013 г., могат да се направят следните изводи:

1. Динамиката на изменение на интензитета на слънчевата радиация силно влияе върху точността на регресионните модели, описващи зависимостта $E = f(T_m)$, при $G = \text{const}$.
2. При интензитет на слънчевата радиация $G \leq (405..412) W/m^2$, с нарастване температурата на фотоволтаичните модули T_m , техният коефициент на полезно действие нараства.
3. При интензитет на слънчевата радиация $G \geq (590..595) W/m^2$, с нарастване температурата на модулите T_m , техният коефициент на полезно действие намалява.
4. С нарастване температурата на фотоволтаичните модули T_m , произведената от тях електрическа енергия E се изменя в широк диапазон.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коев, К. Моделиране влиянието на някои фактори върху температурата на фотоволтаични модули.// Енергетика, 2011, брой 3, стр. 41-46.
- [2] Koev, K., Kr. Martev. Results from a study on the temperature of solar modules. 2013, Agricultural Engineering, Scientific Journal, Belgrade (in press).
- [3] Köhl, M. 2011. *From Climate Data to Accelerated Test Conditions*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, presented at the PVMRW, Golden (Colorado, USA), WEB: http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw_2011_05_plen_kohl.pdf.
- [4] Tiwari, G. N., S. Dubey. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*, RSC Publisher, London, 2010, 402 pp.
- [5] www.sma.de.

За контакти:

Доц. д-р инж. Красимир Мартев, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 281,301,749, e-mail: kmartev@uni-ruse.bg
Доц. д-р инж. Константин Коев, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 201, 661, e-mail: kkoev@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.