

Методика за определяне и следене на глобалния максимум на мощността на фотоволтаичен панел

Лидия Георгиева, Фахми Алкатири

Method for global maximum power point determination and tracking of PV panel: The paper discussed and made comparison of different techniques for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic arrays. It is suggested a new point of view for analytical description for MPPT and an algorithm for this purposes.

Key words: Method for determination, Power point tracking, MPPT, Algorithm.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години придобиват особено значение ограничения при използването на традиционните енергоизточници, което води до намиране и използване на нови алтернативни източници на енергия като слънчевата енергия. Фотоволтаичната (PV) техника намира най-голямо приложение в тази област. Фотоволтаичните модули все още имат относителна неефективност на преобразуване. Затова при проектирането на PV системи от голямо значение е управлението на модула с цел отдаване на максимална мощност (*Maximum Power Point Tracker - MPPT*). Тази мощност се изменя в зависимост от промяната на слънчевата радиация и температурата на модула, които са различни за отделните части на деня.

В голям брой публикации се разглеждат различни методи за MPPT техника. В зависимост от степента на сложност на задачата, те варират от простите алгоритми по смущение и наблюдение (*Perturb and Observe - P&O*) и *Hill-Climbing - HC* до по сложни като размита логика [14,18,12,13], невронни системи [15] и други.

Най-използван е методът на *P&O* поради неговата простота на изпълнение и относителна му ефективност. Този метод използва главно техника на *HC* и е ефективен при бавна промяна на слънчевата радиация [10,7,16,17]. При промяна на слънчевата радиация с голяма динамика методът обаче е неефективен. За да се избегне този проблем се прилага т.н. модифициран *P&O* (*MP&O*), който изолира колебанията в слънчевата радиация, причиняващи смущения в процеса на управлението [19, 9]. Това внася забавяне при следенето на MPP, но поддържа напрежението на модула постоянно, което се използва и в алгоритъма за Оценяване – смущение – смущение (*EP&P*) [11]. При него се извършва едно оценяване на всеки две смущения.

В [4] е предложен подобрен алгоритъм на метода *P&O* за намиране на MPPT, в който се прави опит за определяне на точката на максимума като се управлява директно мощността, пресметната от измерваните стойностите на тока и напрежението на модула като първоначална стойност.

В последните години размитата логика и размитите контролери намират приложение в процеса на следенето на MPPT [6,1,14,18,12,13]. Основното предимство при тях е, че при изпълнението на управлението не са необходими математически модели. В замяна на това е необходима значителна по обем информация от предварителни изследвания за определяне на функциите на принадлежност на лингвистичните термини, базата правила и други за постигане на висока точност. В [6, 1] при контролиране на периодичен режим на понижаващ инвертор с широко-импулсна модулация, авторът използва размит микроконтролер с висока точност, бързото следене на MPP, на който не се влияе от климатични условия.

В [3] се предлага адаптивна размита невронна система за заключения (*ANFIS*) при изчисляване на MPP, като се използва статистически анализ на данни от

експериментални изследвания, проведени при различни климатични условия. Качеството на решението зависи от метода на обучение на мрежата, нейната топология и други.

Разглеждат се и други методи за оптимизиране на произведената мощност от PV модул като невронни мрежи [2, 5] и метода Ripple Correlation Control [8].

От литературния анализ е ясно, че се използват разнообразни методи за следене на максималната работна точка с техните предимства и недостатъци. Прилагат се различни показатели за сравнението им, които много често не обхващат повечето от важните за приложението на методите характеристики. От направения съпоставителен анализ на 19 от използваните методи, авторите на настоящата публикация констатира, че 63% от тях са зависими от PV панела, 47% не достигат точно MPP, 10.5% са реализирани в аналогови устройства, а 58% изискват периодична настройка. Само малък брой от тях използват измерване на слънчевата радиация и температурата на панела, в останалите се използват напрежението и токът.

Много малко от разгледаните методи, отчитат наличието на множество от локални максимуми на мощността, получени в резултат на частично засенчване на PV панелите, което може да бъде реална пречка пред функционалната способност на MPPT. Когато се попадне и работи в локален максимум са налице значителни енергийни загуби, защото се следи локалния MPP вместо глобалния MPP. Все пак някои от методите изискват допълнителни начални етапи за избягване на това множество от локални максимуми и постигат близост до истинския MPP.

В настоящата работа се предлага методика и алгоритъм за намиране на точката на максимума, които се основават на обработка на текущата информация за измерваните величини и се използва динамично изменение на стъпката за достигането на тази точка с желана точност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Анализ и преобразуване на някои зависимости за точката на глобалния максимум на мощността

Един от начините за задаване на зависимостта на стойността за точката, в която се получава максималната мощност от PV модула (фотоволтаичен панел) е следната:

$$P_{mp} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot P_{mpref} \left[1 + \frac{d\eta}{dT} (T - T_{ref}) \right], \quad (1)$$

където P_{mpref} е максималната стойност на мощността при референтните условия на работа, G_{ref} и T_{ref} - референтните стойности на слънчевото излъчване и температурата на модула, T - текущата стойност на температурата на панела, G - текущата стойност за слънчевата радиация и $d\eta/dT$ - производната на ефективността по температурата на панела.

Референтните стойности за използвания панел са известни, но останалите величини са променливи. Стойностите за $P_{mp}(G)$ не лежат върху права линия, а това би опростило значително изчисленията. Кривата пресича оста на напрежението за $P_{mp} = 0$ или

$$P_{mp} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot P_{mpref} \left[1 + \frac{d\eta}{dT} (T - 25) \right] = 0. \quad (2)$$

Ефективността на панела най-често се определя с израза

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{G_{ref} \cdot A} \Big|_{T=25^{\circ}\text{C}}, \quad (3)$$

където P_{mp} е максималната мощност произвеждана от панела, G - слънчевата радиация, W/m^2 и A - площта на панела, m^2 .

От уравнение (2) се вижда как се изменя положението на точката върху абсисната ос или по-точно как се изменя производната на ефективността на панела $d\eta/dT$ за $P_{mp} = 0$. Тя се определя от температурата на панела:

$$d\eta/dT = 1/(T_{ref} - T) \quad (4)$$

като за стойност на $T = 25^{\circ}\text{C}$, кривата има прекъсване.

Производната на ефективността на панела за коя и да е стойност може да се определи от уравнение (3)

$$\frac{d\eta}{dT} = \frac{1}{G_{ref} \cdot A} \left[I_{mp} \frac{dU_{mp}}{dT} + U_{mp} \frac{dI_{mp}}{dT} \right]. \quad (5)$$

Ако горното уравнение се запише в диференчна форма могат да бъдат направени някои преобразувания.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\eta}{\Delta T} &= \frac{1}{G_{ref} \cdot A} \left[I_{mp} \frac{\Delta U_{mp}}{\Delta T} + U_{mp} \frac{\Delta I_{mp}}{\Delta T} \right] = \\ &= \frac{K_{\eta}}{\Delta T} \left[2P_{mp,i+1} - \frac{1}{K_{vi}^2} \cdot P_{mp,i+1} + P_{mp,i} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

където $K_{vi} = U_{mpi}/U_{mpi+1}$, а $K_{\eta} = 1/(G_{ref} \cdot A)$. С индекс i са означени стойностите на отделните величини при различни слънчеви радиации G_i . Отношението K_{vi} е винаги по-малко от 1, при което $K_{vi}^2 \ll 1$. Като се отчете, че стойностите за $P_{mp,i}$ и $P_{mp,i+1}$ са близки при малки изменения на слънчевата радиация и съответно на температурата на панела, то тогава

$$K_{vi}^2 \cdot P_{mp,i+1} \approx 0 \quad (7)$$

$$\text{или } \frac{\Delta\eta}{\Delta T} \approx \frac{K_{\eta}}{\Delta T} \left[2P_{mp,i+1} - \frac{1}{K_{vi}} \cdot P_{mp,i} \right] \quad (8)$$

Замества се така получената опростена зависимост за производната на ефективността на панела в израза за стойността на мощността в глобалния максимум на кривата $P_{mp}(U)$ – уравнение (1) при G_{i+1} , а K_G - с $K_G = \frac{P_{mp,ref}}{G_{ref}}$:

$$\begin{aligned} P_{mp,i+1} &= \frac{G_{i+1} \cdot P_{mp,ref}}{G_{ref}} \left[1 + \frac{d\eta}{dT} (T_{i+1} - 25) \right] \approx \\ &= K_G \cdot G_{i+1} \left[1 + (T_{i+1} - 25) \cdot \frac{K_{\eta}}{\Delta T} \left(2P_{mp,i+1} - \frac{1}{K_{vi}} P_{mp,i} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Тогава за $P_{mp,i+1}$ се получава

$$P_{mp,i+1} = \frac{K_G \cdot G_{i+1} \left[1 - (T_{i+1} - 25) \frac{K_{\eta}}{\Delta T \cdot K_{vi}} \cdot P_{mp,i} \right]}{\left[1 - 2 \frac{K_{\eta} \cdot K_G \cdot G_{i+1}}{\Delta T} (T_{i+1} - 25) \right]}. \quad (10)$$

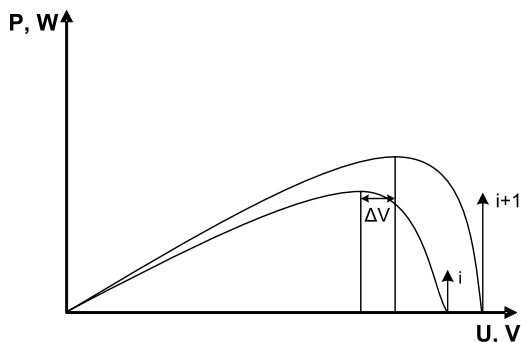
При $i = 0$, $P_{mp,0} = 0$ и $\Delta T = T_1 - T_0$ следва, че

$$P_{mp1} = \frac{K_G \cdot G_1 \cdot \Delta T}{\Delta T - 2K_\eta \cdot K_G \cdot G_1 (T_1 - 25)} \quad (11)$$

В уравнението са известни:

$$\Delta T = T_1 - T_o ; T_1 ; K_\eta = \frac{1}{G_{ref} \cdot A} ; K_G = \frac{P_{mp,ref}}{G_{ref}} ; G .$$

За всички останали случаи обаче участва дефинираният по-горе коефициент K_{vi} . По-долу е изведена зависимост, по която да бъде изчисляван.



Фиг. 1. Зависимост на $P(U)$ за различни радиации

$$K_{vi} = \frac{U_{mpi}}{U_{mpi+1}} = \frac{U_{mpi} \pm U_{mpi+1}}{U_{mpi+1}} = 1 - \frac{\Delta U_{mp}}{U_{mpi+1}} \quad (12)$$

Като се има предвид, че изменението на напрежението ΔU е малко за малки интервали от време (фиг.1), то тогава

$$\Delta U / U_{mpi+1} \approx 0, \quad (13)$$

при което $K_{vi} \approx 1$. Следователно

$$P_{mpi+1} \approx K_G \cdot G_{i+1} \left[1 + (T_{i+1} - 25) \frac{K_\eta}{\Delta T} (2P_{mpi+1} - P_{mpi}) \right] \quad (14)$$

или като се реши по отношение на P_{mpi+1} се получава

$$\begin{aligned} P_{mpi+1} &\approx \frac{K_G \cdot G_{i+1} \left[1 - (T_{i+1} - 25) \frac{K_\eta}{\Delta T} P_{mpi} \right] \cdot \Delta T}{\Delta T - 2K_\eta \cdot K_G \cdot G_{i+1} (T_{i+1} - 25)} = \\ &= \frac{K_G \cdot G_{i+1} [\Delta T - K_\eta (T_{i+1} - 25) \cdot P_{mpi}]}{\Delta T - 2K_\eta \cdot K_G \cdot G_{i+1} (T_{i+1} - 25)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Следователно всяка $(i+1)$ -ва стойност за $P_{mp,i+1}$ може да бъде определена от изчислената преди това стойност за $P_{mp,i}$ и новите стойности за величините T_{i+1} и

G_{i+1} . При използването на тази рекурентна зависимост за определяне на всяка следваща стойност за $P_{mp,i+1}$ трябва да са известни следните величини:

- изменението на температурата на панела ΔT за краен интервал от време;
- коефициентите K_G и K_η ;
- текущата стойност на слънчевата радиация.

Изменението на температурата на панела зависи линейно от температурата на околната среда и стойността на слънчевата радиация. Тази величина е по-инертна в сравнение с изменението на радиацията, което се отчита при съставянето на алгоритъма.

За точката на глобалния максимум на зависимостта $P(U)$ е известно, че

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(I \cdot U)}{dU} = I + U \cdot \frac{dI}{dU} = 0, \quad (16)$$

при което

$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{I_{mp}} = -\frac{I_{mp}}{U_{mp}}. \quad (17)$$

$$\text{Ако се премине в диференчна форма } \Delta I = -\Delta U \cdot \frac{I_{mp}}{U_{mp}}. \quad (18)$$

$$\text{Нека } \Delta U = \Delta U_{зад}, \text{ тогава } \Delta I_{зад} = -\Delta U_{зад} \cdot I_{mp} / U_{mp}, \quad (19)$$

където отношението I_{mp} / U_{mp} може да се определи при извършване на определени изчисления по аналитични изрази известни в литературата.

Ако $\Delta I_j = I_{1(j+1)} - I_{1j} \neq \Delta I_{зад}$, където с j и $j+1$ са означени стойностите за тока I върху една и съща крива $P(U)$ при определена слънчева радиация G_i и

$$\Delta U_{зад} = \Delta I_{зад} \cdot U_{mp} / I_{mp}, \quad (20)$$

тогава следва да се избере нова стойност за $\Delta U_{зад}$, която се определя от израза

$$\Delta U_{зад} = \Delta I_j \cdot U_{mp} / I_{mp} = (I_{1(j+1)} - I_{1j}) \cdot U_{mp} / I_{mp} \quad (21)$$

$$\text{или } \Delta U_{зад} = -\Delta I_j (P_{mp} - \varepsilon) / I_{mp}^2.$$

По този начин се задава промяната на напрежението за постигане на точката на глобалния максимум, обхождайки цялата крива $P(U)$.

Известно е, че при повреда на клетки от панела кривата променя вида си и са налице редица локални максимуми. Възможно е да се попадне в такъв и да се повтаря процедурата на промяна на напрежението около него. По тази причина при стартиране на процедурата за търсене на глобалния максимум за мощността на панела, може да се въведе стойност за $\Delta U = U_{mp}/2$, където U_{mp} се отнася за референтните условия на работа на панела. При това с две промени на U се постига точката на глобалния максимум при определени условия. Това от една страна отстранява посоченото неудобство и ускорява процеса на намиране на максимума. Но условията на работа на панела не са референтните и следователно няма да се постигне глобалния максимум при текущите условия на работа. По тази и други причини трябва да се знае приблизителната стойност на максимума и да се проверява дали текущата стойност на мощността е близка до предварително изчислената. Степента на близост предварително се задава. Тя може да се дефинира от референтната стойност за мощността на панела. Попадайки в посочения интервал е възможно да се задават други стъпки в изменението на U , което като принцип се използва и в други алгоритми. В случая размерът на стъпките

се редуцира в зависимост от отклонението на стойността на тока при две последователни измервания както е посочено в (20, 21).

2. Алгоритъм за намиране на точката на глобалния максимум на фотоволтаичен панел при промяна на напрежението.

Предлаганият по-долу алгоритъм използва направения в т.1 анализ и преобразуване на някои зависимости с оглед намирането на стойности за мощността близо до глобалния максимум при определена слънчева радиация и температура на панела.

1. Въвеждане на референтните стойности за $P_{mp\ ref}$, U_{ref} , I_{ref} , G_{ref} и A .
2. Задаване на време за квантуване Δt , min.
3. Задаване на коефициентът $K \in [0,1]$, такъв че да определя близостта на решението до глобалния максимум: $\varepsilon = K \cdot P_{mp\ ref}$.
4. Определяне на коефициентите: $K_G = P_{mp\ ref}$ и $K_\eta = 1/(G_{ref} \cdot A)$.
5. Избор на индекси - i за определяне на кривата $P(U)$ при зададена радиация G_i и j за измерваната или изчислявана величина при зададено i . При $i = 0$ се определя точката, за която мощността $P_{mp\ i} = 0$ лежи на кривата, описваща положението на всеки глобален максимум при зададена температура на панела T и слънчева радиация G .
6. Определяне при $i = i+1$ и $j = 1$ на T_{ij} , G_i , I_{ij} и U_{ij} .
7. Задаване на изменение на напрежението със стойност $\Delta U_{зад} = U_{mp}/2$.
8. След изтичане на времето на квантуване Δt се измерват новите стойности на величините T_{ij+1} , I_{ij+1} и U_{ij+1} . Изчисляват се изменението на температурата на панела ΔT , стойността на глобалния максимум $P_{mp\ i}$ като се използва вече известната стойност за $P_{mp\ i+1}$. Определя се P_{ij+1} , както и стойностите за ΔI_i и ΔU_i .
9. Проверка за принадлежността на стойността P_{ij+1} към интервала $P_{mp\ i} - \varepsilon$.
10. а) При изпълнение на условието се задава нова стойност за стъпката на изменение на $\Delta U_{зад} = \Delta I_i (U_{mp}/I_{mp})_{ref}$. Изпълняват се отново стъпки 6 до 9.
 б) Ако условието не е удовлетворено се определя знакът на отношението $\Delta U/\Delta I_i$, като при положителен знак се задава $\Delta U_{зад} = U_{mp}/2$, а при отрицателен - $\Delta U_{зад} = -\Delta I_i (U_{mp}/I_{mp})_{ref}$. Преминава се отново към стъпка 6 на алгоритъма.
 По посочения алгоритъм е разработена програма в Matlab.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение могат да бъдат посочени някои предимства на методиката и разработения по нея алгоритъм.

1. Текущите условия на работа на панела се отчитат като се измерват регулярно слънчевата радиация, температурата на панела, напрежението и токът му.
2. За всички изменения на слънчевата радиация и температурата на панела позволява изчисляване на стойността на мощността за глобалния максимум на базата на преди това определения максимум по рекурентна зависимост.
3. Достигането на максимума се постига при попадане в област близо до реалния максимум с предварително зададена точност.
4. Попадането в областта на максимума става с най-много две стъпки в изменението на напрежението.
5. Търсенето на максимума и приближаването до него става с определяне на размера на стъпката в намаляващ ред от стойности, определени от конкретните условия.
6. Позволява бърза корекция на постигнатото при промяна на външните условия – преминаване по нова крива на мощността.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Aït Cheikh, M. S., C. Larbes, G. F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10, No.3 (2007), pp: 387 – 395.
- [2] Aït Cheikh, M. S., M. Haddadi and A. Zerguerras. Design of a neural network control scheme for the maximum power point tracking (MPPT). *Revue des Energies Renouvelables* Vol.10, No.1 (2007) 109 – 118.
- [3] Aldobhani, A. M. S. and R. John. Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking. *IAENG International Conference on Control and Automation*, Hong Kong, March, 2008.
- [4] Azab, M. A. New maximum power point tracking for photovoltaic systems. *Proceedings of World Academy of Science, engineering and technology*, vol.44, august 2008, ISSN: 2070-3724, Venice, Italy.
- [5] Brunton, S. L., C. W. Rowley, S. R. Kulkarni and C. Clarkson. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking. *The 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, June 7-12, 2009, Philadelphia, Pennsylvania.
- [6] Daoud, A. and A. Midoun. A Fuzzy logic based photovoltaic maximum power tracker controller. *Proceeding of The 4th International Multi-conference on Computer Science and Information technology*, vol. 4, Amman, Jordan, 2006, pp: 1-3.
- [7] Eltamaly, A. M., P. N. Enjeti and H. H. El-Tamaly. An improved Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Energy Systems. *The 2nd Minia International Conference for Advanced Trends in Engineering, (MICATE'2002) El-minia, Egypt*, 16-18, March 2002.
- [8] Esum, T., J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control. *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 21, No.5, September 2006.
- [9] Jiang, J. A., T. L. Huang, Y. T. Hsiao and C. H. Chen. Maximum power tracking for photovoltaic power system. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 147-153 (2005).
- [10] Lim, Y. H. and D. C. Hamill. Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays. *Electronics Letters*, 25th May 2000. vol. 36, No. 11.
- [11] Liu C., B. Wu, and R. Cheung. Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems. *1st Canadian Solar Buildings Research Network Conference*, Montreal, Aug. 2006.
- [12] Masoum, M. A. S. and M. Sarvi. Design, simulation and construction of a new fuzzy – based maximum power point tracker for photovoltaic applications. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, 29th Sep to 2nd Oct, 2002.
- [13] Mellit, A., M. Benghanme, A. Hadj Arab and A. Guessoum. Control of stand-alone photovoltaic system using fuzzy-logic controller. *Energy Systems Laboratory*, 2004. <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/4632>
- [14] Nafeh, A. A., F. H. Fahmy and E. M. Abou El-Zahab. Maximum power operation of a stand-alone PV system using fuzzy logic control. *International Journal of Numerical Modeling*, Vol. 15, issue 4, 2002, pp: 385 – 398.
- [15] Paucar, B. C., J. L. Roel Ortiz, K. S. Collazos L., L. C. Leite, J. O. P Pinto. Power operation optimization of photovoltaic stand alone system with variable loads using fuzzy voltage estimator and neural network controller. *Proceeding of Power Tech 2007*, 1 - 5 July 2007, Lausanne, Switzerland.
- [16] Santos, J. L., F. L. Antunes. Maximum power point tracker for PV systems. *RIO 3 - World Climate & Energy Event*, Rio de Janeiro, Brazil, 2003.
- [17] Sera, D., T. Kerekes, R. Teodorescu and F. Blaabjerg. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions. *International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC*, 2006. Portoroz.

[18] Wilamowski, B. M. and X. Li. Fuzzy System Based Maximum Power Point Tracking for PV System. The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'2002), Vol. 4, 5-8 Nov. 2002 Page(s): 3280 – 3284.

[19] Yafaoui, A., B. Wu and R. Cheung. Implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems. The 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007.

За контакти:

Доц. д-р Лидия Христова Георгиева, Катедра “Компютърни системи и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 711, e-mail: lgeorgieva@ecs.ru.acad.bg

Маг.инж. Фахми Алкатири, докторант, Катедра “Компютърни системи и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”

Докладът е рецензиран.