

MODELING AND SIMULATION OF MPPT FOR THE GRID-CONNECTED PV SYSTEM

G.H. Kirakosyan, V.V. Margaryan, V.S. Melkonyan, L.G. Kirakosyan

National Polytechnic University of Armenia

The grid-connected PV system must be designed to operate at its maximum power point (MPP) at any temperature or solar radiation. Generally if the load is not directly coupled with the PV panel, the operating point and MPP do not coincide. The direct connection of the load to the PV panel may result in the over sizing of the PV panel and thus increases the cost of the entire grid-connected PV system. The solution to this problem is to use the DC/AC converter (inverter) with an automatic trigger angle control which is usually inserted between the PV panel and the load. The current control method is used for modeling and simulating the MPP tracker for regulating the power flow originated from the PV panel-based on the grid-connected DC/AC converter (inverter). Current- based maximum power point tracker (MPPT) is investigated as a means for controlling the trigger angle of the grid-connected inverter. The maximum efficiency is the main issue presented in this article. A strategy for tracking the MPP for several solar radiation intensities has been used in this article. The control loop circuit, the grid-connected DC/AC converter, operating as an inverter, is modeled to verify the proposed control strategy performance. This article shows that the maximum power supplied by the PV panel is reached at any solar radiation intensity when the PV panel current is directly proportional to photocurrent. This important property of the PV panel means that at the MPP the ratio of the output voltage to the output current for the PV panel is a constant, forming an adaptive matching of the panel to the load. Since the current-voltage characteristic of a PV panel depends on the solar cell temperature, the solar radiation, and the load, it is very difficult to achieve an optimum matching at all solar radiation intensities and at all temperature variations. It should be emphasized that this article, in addition to tracking the MPP efficiently, presents analytical solutions of the transcendental equation.

Keywords: maximum power point (MPP), PI controller, PV panel, solar radiation, grid-connected, trigger angle.

Introduction. The use of new efficient photovoltaic solar cells has emerged as an important solution in energy conservation and demand-side management during the last decades. Owing to their initial high costs, PV solar cells have not yet been an attractive alternative for electricity users who are able to buy cheaper electrical energy from the utility grid. However, they have been used extensively in grid-connected PV systems. Although solar cell prices have decreased considerably during the last years due to new developments in the film technology and manufacturing process [1], PV panels are still considered rather expensive compared with the utility fossil fuel gener-

ated electricity prices. After building such an expensive grid-connected PV system, the user naturally wants to operate the PV panel at its highest conversion efficiency by continuously utilizing the maximum available output power of the panel.

Owing to changes in the solar radiation energy and the cell operating temperature, the output power of a PV panel is not constant at all times. Consequently, a maximum power point tracking controller is always needed in any scheme with PV panels [2-4] to ensure maximum utilization. Therefore, works to solve the problem on maximum power point tracker (MPPT) have always been a hot topic for PV panel utilization systems. It is known that MPPT on the basis of DC/DC converter is mainly used for standalone PV system [5-7]. Since grid-connected PV systems are now much more popular than standalone PV systems, it becomes necessary to develop MPPT for them.

The aim of this article is the modelling and simulation of the MPPT on the basis of a DC/AC converter (inverter) for a grid-connected PV system. The MPPT uses the current control method to seek the MPP to allow the power converter circuit to extract the maximum power from the PV panel.

1. Basic device model of MPPT. This current control maximum power point tracker is implemented based on the idea that the current of the PV panel, for which the power is maximum, is directly proportional to photocurrent if the temperature variation is neglected [8].

The power circuit (thyristor bridge), is designed in such a way that the I ripple is low. Tracking of the maximum power point is achieved by varying the dc reference voltage as the function of the insolation level as shown in Fig. 1. The proposed system transfer function is derived and the method of the current control is discussed. The regulation of the output current from the PV panel to get maximum power transfer is realized by controlling the voltage variation across the inductive reactance. According to the convention depicted in Fig. 1 if the dc voltage variation ΔV_D at the output of the thyristor bridge exceeds the voltage variation ΔV generated by the PV panel, the voltage variation across the inductive reactance is negative thus decreasing the I current. Conversely, if ΔV_D is smaller than ΔV , by decreasing the trigger angle while the insolation remains unchanged, the I current is increased.

2. Modeling of the PV panel. For the current-voltage characteristic of a PV panel, the voltage is approximately constant until it reaches a region called the knee of the characteristic curve [9]. From this region, the voltage falls quickly. Therefore, until the knee, the power is directly proportional to the current. Therefore, in controlling the power, the current is controlled too.

Likewise, the PV panel current and, consequently, the power vary with the cells' operation temperature.

lution will be found analytically making I or V appear on only one side of the equation. The desired analytical solution for the generalized PV panel equation was found in terms of Lambert function [10, 11], by using symbolic MATLAB. Besides, the parameters I_L , I_S , R_S , and R_{sh} are not easy to find.

The parameters of easy experimental determination, usually supplied by the manufacturers are, basically, the open circuit voltage, V_{OC} the short circuit current, I_{SC} and the voltage and current on maximum power point V_m , I_m , respectively.

From (3), we obtain for the open-circuit voltage ($I = 0$):

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_S} \right). \quad (4)$$

I_S may be written in terms of the open circuit voltage as:

$$I_S = I_{SC} e^{-\frac{qV_{OC}}{kT}}. \quad (5)$$

From (5) and (2), the $I - V$ characteristic can be written as:

$$I = I_{SC} \left(1 - e^{-\frac{q(V - IR_S - V_{OC})}{kT}} \right). \quad (6)$$

Combining (5) and (3) yields:

$$V = V_{OC} + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \right] + IR_S. \quad (7)$$

The panel consists of 182 cells in series, 3 parallel strings. $I_{SC} = 14.4 A$, $I_{MP} = 13.2 A$, $V_{MP} = 85 V$, $V_{OC} = 110 V$, totaling a power of 1122 W .

(8) is an explicit solution of (2):

$$I = I_L + I_S + \frac{kT}{qR_S} \text{LamW} \left(-\frac{qR_S I_S}{kT} e^{\left(\frac{q(V - R_S(I_L + I_S))}{kT} \right)} \right), \quad (8)$$

where $\text{LamW}(z)$ is the Lambert function defined from the following implicit equation $\text{LamW}(z)e^{\text{LamW}(z)} = z$. This result was obtained by using MATLAB's symbolic toolbox. The condition for maximum power point can be obtained when

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(VI)}{dI} = 0. \quad (9)$$

Substitution of (3) into (9) gives

$$\ln \left(\frac{I_L - I_m + I_S}{I_S} \right) - \frac{I_m}{I_L - I_m + I_S} - 2 \frac{qI_m R_S}{kT} = 0, \quad (10)$$

where $I_S = I_L e^{-qV_{OC}/kT}$. The PV panel photocurrent can be obtained from (10):

$$I_L = 0.002 e^{\left(\text{LamW}(500I_m e^{(-0.08I_m)}) \right) + 0.08I_m - 0.002}. \quad (11)$$

This curve is a linear approach. That is, I_m is directly proportional to I_L , where the proportionality constant is 0.9. Figure 3 shows the current-voltage characteristic of a solar cell, which is calculated by the formula (8).

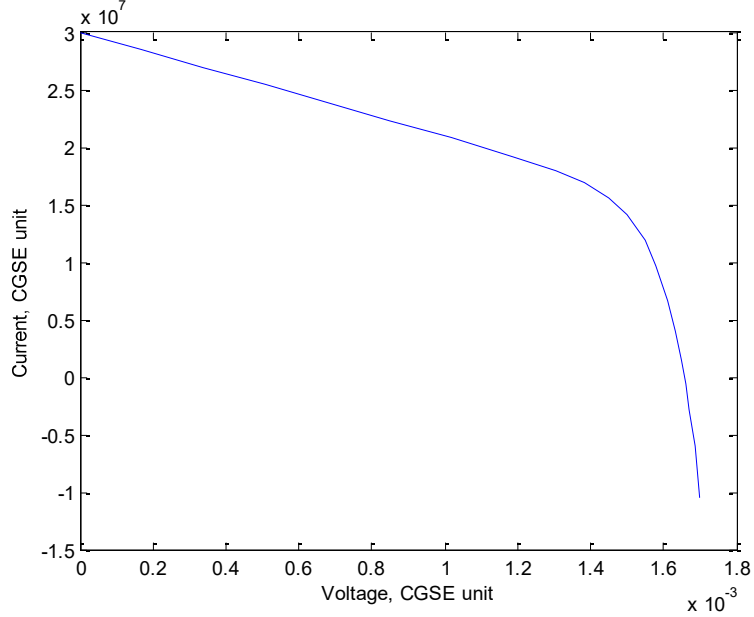


Fig. 3. Current-voltage characteristic of a solar cell under illumination

3. Modeling of the plant and control. The PV panel, power circuit, transducer and controller form the PV system are basic functional elements (Fig. 4). The plant including the power circuit, PV panel and current transducer is modeled as a second-order transfer function given by

$$H_P(s) = \frac{K}{sL(1+sT_D)}. \quad (12)$$

If, for example, the controller is the proportional plus integral controller:

$$G_C(s) = \frac{K_{PI}(1 + sT_{PI})}{sT_{PI}},$$

the closed-loop transfer function is

$$G_{CL}(s) = \frac{sK_{PI}KT_{PI} + K_{PI}K}{s^3T_{PI}LT_D + s^2T_{PI}L + sK_{PI}KT_{PI} + K_{PI}K}. \quad (13)$$

We can select the controller gains in (13) to place the poles of $G_{CL}(s)$ in the desired locations to meet the desired performance specifications. For T_{PI} and K_{PI} we have:

$$\begin{aligned} T_{PI} &= 4T_D, \\ K_{PI} &= \frac{L}{2KT_D}. \end{aligned} \quad (14)$$

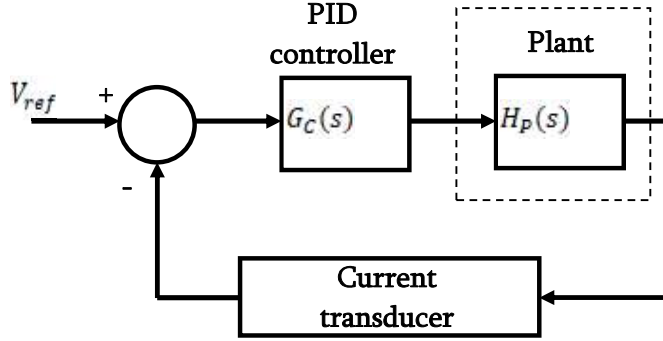


Fig. 4. A simplified block diagram of the proposed system.

4. Experimental results and discussions. The transformer transformation relationship (not shown) ($220/40\text{ V}$) is calculated in such a way that the average voltage at dc side of the thyristor bridge (V_D) when operating with selected trigger angle ($\alpha_0 = 155^\circ$), equals the voltage across the PV panel, when operated in the maximum power at rated insolation level. It is worthwhile to note that although a large steady-state trigger angle would increase the power factor, communication failures could occur. In fact, a limiter should be used in the current-based MPPT to prevent trigger angle from exceeding 170° during transients.

Inductor L is designed in order to limit the magnitude of the lowest order sixth current harmonic at less than 5% of rated dc current when the thyristor bridge is triggered with 140° and required for keeping the dc-ac converter operating in the continuous conduction mode so that power can flow from dc to ac side. It was calculated as 25 mH . The time T_D is the delay that takes into account the period of the modulating signal ($T_D = (1/6f_s)$) where f_s is the frequency of the ac mains. It was calculated as 2.77 ms while the gain and time constant of the PI controller were calculated as 0.217 and 11 ms , respectively. The carrier waveform is the saw tooth type with an amplitude $V_{CAR} = 10\text{ V}$, so that it can be easily implemented in practice with a dedicated IC such as TCA 785. $V_{LL} = 40\text{ V}$ is the line to line voltage. Therefore, the gain of the dc-ac converter is obtained by linearization around the rated steady-state operating point, $\alpha_0 = 155^\circ$.

Fig. 5 shows a reference voltage and the PV panel current (voltage) in the error detector input in the function of time. Two insolation levels were used 11.2 V and 13.2 V represented by a dashed line. The PV panel current presenting the low ripple (less 5%) tracks the maximum power point under the steady state operation. When the av-

average value of this current (voltage) matches to the reference current ($0.92I_L$), the PV panel power is maximum and the error voltage is zero.

To calculate the MPPT, the MATLAB-Simulink program was used (Fig. 5).

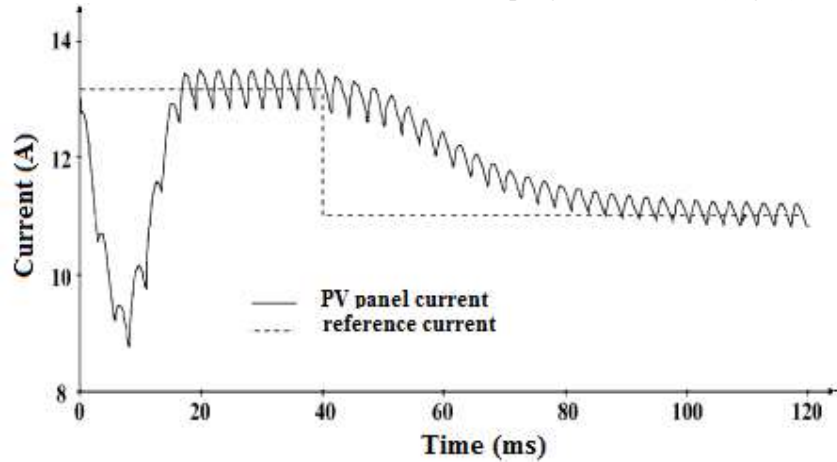


Fig. 5. Current of the PV panel and reference current in the input of the error detector in Fig. 1

Figure 6 shows the Simulink-model of MPPT. The grid is represented by a sinusoidal voltage source (AC 220 V, 50 Hz) and the PV panel with an equivalent DC voltage whose value is 150 V. The thyristor bridge control pulses are formed by the Control System block, whose inputs are used for grid voltage (for synchronization) and the trigger angle calculated from the start of half-period. In this case, the selected trigger angle is equal to $2\pi/3$.

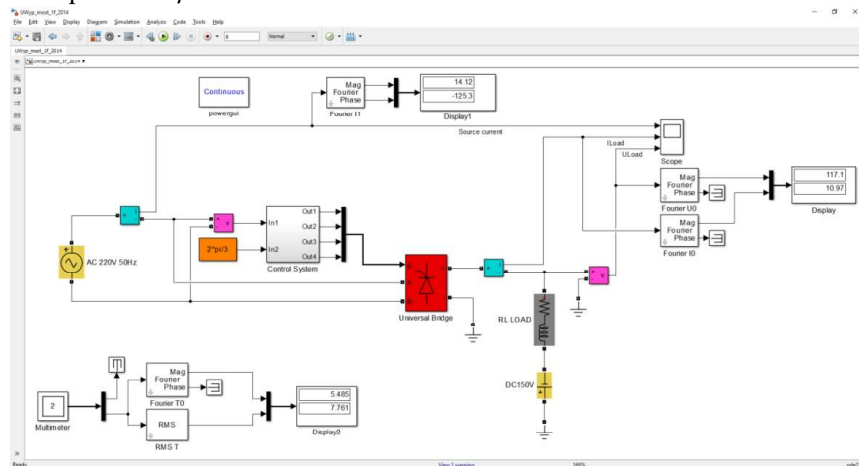


Fig. 6. Simulink-model of MPPT on the basis of the grid-connected inverter

Figure 7 shows the dynamic switching characteristics of the grid-connected inverter during turn-on with zero initial conditions. Figure 8 shows the same operational oscillograms as in Fig. 7 a, b and c, detailed for the stabilized mode.

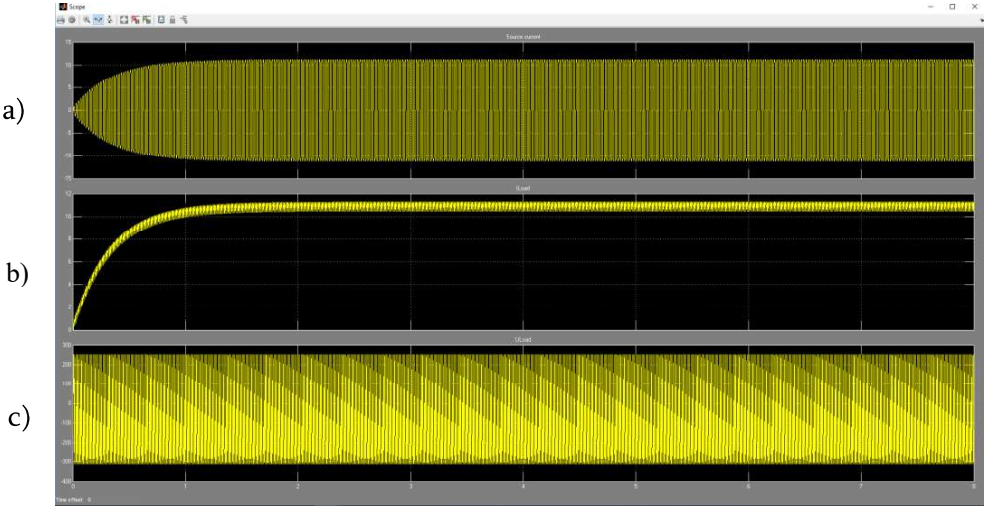


Fig. 7. Dynamic switching characteristics of the MPPT virtual model. (a) Grid current. (b)Choke current. (c) Output voltage of bridge

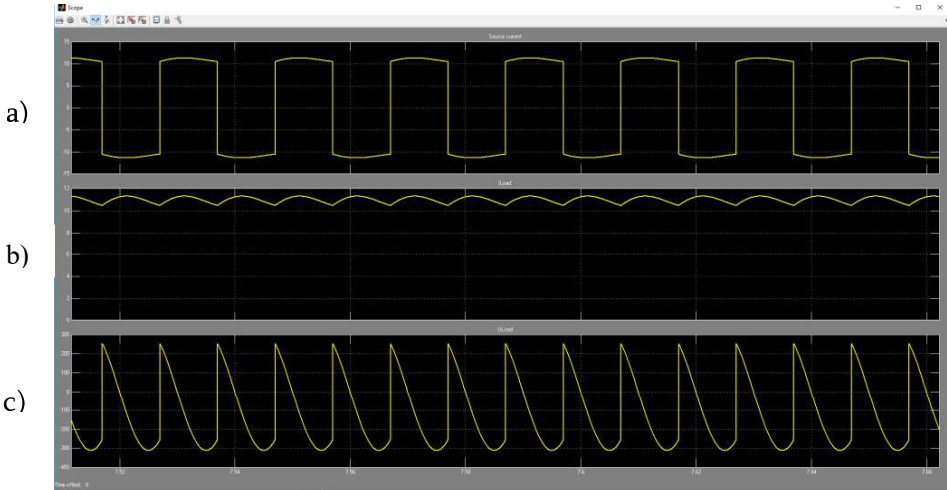


Fig.8. The currents and voltage of the MPPT virtual model in the stabilized mode. (a) Grid current. (b)Choke current. (c) Output voltage of bridge

Conclusion. The new method of the MPPT on the basis of DC/AC converter (inverter) is developed. The proposed MPPT method has the following advantages:

- online adaptive search of the trigger angle for the grid-connected inverter;
- the current on MPP is directly proportional to photocurrent;
- the ratio of the output voltage to the output current for the PV panel is a constant.

This work was made possible by a research grant from the Armenian National Science and Education Fund (ANSEF) based in New York, USA.

References

1. **Buresch M.** Photovoltaic energy systems design and installation. - New York: McGraw-Hill, 1993. – 758p.
2. Discrete control by sliding mode of a photovoltaic system /**B. Khiari, A. Sellami, R. Andoulsi, et al** //International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics. -2003.-P. 187-192.
3. **Kim T.Y., Ahn H.G., Park S.K., Lee Y.K.** A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation // IEEE International Symp. on Ind. Electron.- 2001.- P.1011-1014.
4. **Kirakosyan G.H., Avetisyan Q.A., Kondjoryan A.H., Kirakosyan L.G.** Simulation and construction of a fuzzy-based maximum power point tracker for solar energetic plants // Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2014.-V. 11, N 1.-P. 135-141.
5. **Hua C., Lin J., Shen C.** Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1998. – V. 45, N 1. – P. 99-107.
6. **Kirakosyan G.H., Ayyvazyan G.Y., Barseghyan R.N.** Automatic peak power tracker for solar PV array using software// Proceedings of Engineering Academy of Armenia. - 2007.- V. 4, N 3.-P.437-442.
7. **Kirakosyan G.H., Ayyvazyan G.Y., Barseghyan R.N.** Modeling, simulation and optimization of PV pumping system // Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2006.-V. 3, N 4.-P.645-652.
8. **Masoum M.A.S., Dehbonei H., Fuchs E.F.** Theoretical and experimental analysis of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking // IEEE Trans. Energy Conversion.- 2002.-V.17, N.7.-P. 514-522.
9. **Sze S.M.** Physics of semiconductor devices.- New York: JOHN WILEY & SONS, 1981.- 868 p.
10. **Dubinov A.E., Dubinova I.D., Sajkov S.K.** W-funkciya Lamberta I ee primeneniye v matematicheskix zadachax fiziki. – Sarov: FGUP, 2006. – 160 p.
11. On the Lambert W function / **R.M. Corless, G.H. Gonnet, D.E.G. Hare, et al** // Advances in Computational Mathematics.- 1996. – V.5. – P. 329-359.

Received on 10.10.2018.

Accepted for publication on 17.01.2019.

**ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ՀՉՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿԵՏԻՆ ՀԵՏԵՎՈՂ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ
ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՍԻՄՈՒԼՅԱՑԻԱՆ ՑԱՆՑԱՅԻՆ PV ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ԴԵՊՔՈՒՄ**

Գ.Հ. Կիրակոսյան, Վ.Վ. Մարգարյան, Վ.Ս. Մելքոնյան, Լ.Գ. Կիրակոսյան

Ֆոտովոլտաիկ ցանցային համակարգերը պետք է այնպես հաշվարկվեն, որպեսզի դրանք աշխատեն առավելագույն հզորության կետում (ԱՀԿ) ջերմաստիճանի և արևի ճառագայթման բոլոր փոփոխությունների դեպքում: Ընդհանուր դեպքում, եթե բեռը անմիջականորեն միացված չէ PV վահանակին, ապա աշխատանքային կետը և ԱՀԿ-ն չեն համապատասխանում: Բեռի անմիջական միացումը PV վահանակին կարող է հանգեցնել PV վահանակի չափերի կտրուկ մեծացմանը, և այդպիսով կմեծանա ցանցային PV համակարգի գինը: Այս խնդրի լուծումը կառավարման անկյան ավտոմատ հսկումով DC/AC կերպափոխիչի (ինվերտորի) օգտագործումն է, որը սովորաբար գտնվում է PV վահանակի ու բեռի միջև: Հոսանքի կառավարման մեթոդն օգտագործվում է մոդելավորելու և սիմուլացնելու համար ԱՀԿ-ին հետևող սարքավորումը, որը բաղկացած է ցանցային DC/AC կերպափոխիչից՝ PV վահանակում առաջացած հզորության հոսքի կարգավորման համար: Հոսանքի հիման վրա ԱՀԿ-ին հետևող սարքավորումը հետազոտվում է որպես միջոց ցանցային ինվերտորի կառավարման անկյան հսկման համար: Առավելագույն արդյունավետությունը հիմնախնդիր է, որը դիտարկվում է տվյալ աշխատանքում: Այս աշխատանքում օգտագործվում է արևի ճառագայթման տարբեր ինտենսիվությունների դեպքում ԱՀԿ-ին հետևող ստրատեգիան: Մոդելավորվում են հոսանքի կառավարման սխեման և որպես ինվերտոր գործող ցանցային DC/AC կերպափոխիչը, որպեսզի ստուգվեն առաջարկվող կառավարման ստրատեգիայի բնութագրերը: Ցույց է տրված, որ PV վահանակից մատուցվող հզորությունը հասնում է իր առավելագույն արժեքին արևի ճառագայթման տարբեր ինտենսիվությունների դեպքում, երբ PV վահանակի ելքային հոսանքն ուղիղ համեմատական է ֆոտոհոսանքին: PV վահանակի կարևոր հատկությունն այն է, որ ԱՀԿ-ում ելքային լարման հարաբերությունը ելքային հոսանքին PV վահանակի համար հաստատուն է, որի հետևանքով ձևավորվում է վահանակի և բեռի հարմարավետ համատեղելիությունը: Քանի որ PV վահանակի վոլտ-ամպերային բնութագիրը կախված է արևային տարրի ջերմաստիճանից, արևային ճառագայթումից և բեռից, ապա շատ դժվար է հասնել օպտիմալ համատեղելիության արևային ճառագայթման ինտենսիվության բոլոր արժեքների և ամբողջ ջերմաստիճանային միջակայքի դեպքում: Անհրաժեշտ է ընդգծել, որ այս աշխատանքում, բացի ԱՀԿ-ին հետևող արդյունավետ տեխնիկայից, ներկայացվել է տրանսցենդենտ հավասարման անալիտիկ լուծումը:

Առանցքային բաներ. առավելագույն հզորության կետ, համեմատական-ինտեգրող կոնտրոլեր, PV վահանակ, արևային ճառագայթում, ցանցային, կառավարման անկյուն:

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ СЛЕДЯЩЕЙ УСТАНОВКИ ЗА ТОЧКОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СЕТЕВОЙ PV СИСТЕМЫ

Г.Г. Киракосян, В.В. Маргарян, В.С. Мелконян, Л.Г. Киракосян

Фотовольтаические сетевые системы должны рассчитываться таким образом, чтобы они работали в точке максимальной мощности (ТММ) при всех изменениях температуры и солнечного излучения. В общем случае, если нагрузка непосредственно не подключена к PV панели, то рабочая точка и ТММ не совпадают. Прямое подключение нагрузки к PV панели может привести к превышению размеров PV панели и, тем самым, повышению стоимости целой сетевой PV системы. Решение этой проблемы заключается в использовании DC/AC конвертера (инвертора) с автоматическим контролем угла управления, который обычно находится между PV панелью и нагрузкой. Используется метод управления током для моделирования и симуляции следящей установки за ТММ, которая состоит из сетевого DC/AC конвертера для регулирования потока мощности, возникающей в PV панели. Исследуется установка слежения за ТММ на основе тока как средство для контроля угла управления сетевым инвертором.

Показано, что основной задачей является максимальная эффективность. В работе используется стратегия для слежения за ТММ при различных интенсивностях солнечной радиации. Для проверки характеристик предложенной стратегии управления моделируется схема управления током и сетевым DC/AC конвертером, действующим в качестве инвертора. Показано, что поставляемая со стороны PV панели мощность достигает максимального значения при разных интенсивностях солнечного излучения, когда выходной ток PV панели прямо пропорционален фототоку. Важное свойство PV панели заключается в том, что в ТММ отношение выходного напряжения к выходному току для PV панели постоянно, в результате чего формируется адаптивное совмещение панели с нагрузкой. Так как вольт-амперная характеристика PV панели зависит от температуры солнечного элемента, солнечного излучения и нагрузки, то очень сложно добиться оптимального совмещения при всех интенсивностях солнечного излучения и во всем температурном диапазоне. Следует подчеркнуть, что в этой работе, кроме эффективного слежения за ТММ, представлено аналитическое решение трансцендентного уравнения.

Ключевые слова: точка максимальной мощности, пропорционально-интегрирующий контроллер, PV панель, солнечное излучение, сетевой, угол управления.