

被部分遮挡的串联光伏组件输出特性

翟载腾,程晓舫,丁金磊,查 珺

(中国科学技术大学热科学和能源工程系,安徽合肥 230027)

摘要:以太阳能电池的电流方程和电路的基本理论为基础,对带有旁路二极管的串联组件在被部分遮挡的情况下的输出过程进行了细致的物理分析,并将其划分为旁路二极管导通和阻断两个阶段,从理论上推导出可以运用分段函数准确描述被部分遮挡的串联光伏组件电流和功率输出特性.对两个串联的光伏组件在非均匀光照下的电流和功率情况进行了实验验证,结果证明了文中所提方法的正确性和可行性:①分段函数法可以对被部分遮挡的带有旁路二极管串联光伏组件的电流和功率输出特性进行准确描述;②传统的MPPT法的基础,即功率输出曲线的单峰性,已经失效,因而有必要对跟踪方法进行改进.

关键词:串联组件;旁路二极管;部分遮挡;电流方程;最大功率跟踪

中图分类号:TM914.4 **文献标识码:**A

Characteristics of partially shadowed serial PV module output

ZHAI Zai-teng, CHENG Xiao-fang, DING Jin-lei, ZHA Jun

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Based on solar cell current equation and basic circuit theory, the branch output process of the partially shadowed serial solar module with bypass diode was carefully analyzed. The physical output process was divided into two phases: connection and disconnection of the bypass diode. Based on theoretical deduction, the subsection function was applied to accurately describe partially shadowed serial PV module current and power output characteristics. Finally the experiments were carried out for two serial PV module current and power output under non-uniform illumination. The experimental results demonstrate that the proposed method is correct and feasible; the subsection function can accurately describe the current and power output of partial shadowing of serial PV module with bypass diode; the single peak to power output curve, which is the basis of the traditional MPPT (maximum power point tracking), is also inexistent, so it is necessary to carry on improvement to the tracking method.

Key word: serial PV module; bypass diode; partial shadowing; current equation; MPPT

0 引言

当电力、煤炭、石油等不可再生能源频频告急,许多国家都更加重视风电、太阳能等新能源和可再

生能源的研究、开发和利用.其中太阳能光伏发电作为一种新兴的绿色能源,以其永不枯竭、无污染、不受地域限制等优点,正得到迅速的推广应用^[1].

因为太阳能电池板的造价较高,占整个光伏电站

收稿日期:2007-12-01;修回日期:2008-05-22

基金项目:教育部光伏系统工程研究中心开放基金资助.

作者简介:翟载腾,男,1979年生,博士.研究方向:太阳能电池. E-mail: boston@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:程晓舫,博士/教授. E-mail: xfcheng@ustc.edu.cn

系统造价的比重很大且转化效率低. 为降低整个系统造价并提高对太阳能的利用率, 对太阳能电池板的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)是有效途径之一, 而传统的 MPPT 方法是基于光伏电源系统的特性及其输出功率曲线的单峰性^[2~7]. 但在实际的光伏系统中, 当若干个光伏电池组件串联成光伏阵列时, 需要在光伏电池组件两端并联二极管(旁路二极管), 其中某组件被阴影遮挡或出现故障而停止发电时, 在该二极管两端形成正向偏压, 不至于阻碍其他正常组件发电, 同时也保护光伏电池免受较高的正向偏压或发热而损坏. 正常工作的太阳能电池组件或光伏阵列, 其 $I-V$ 曲线是一个膝形, 其 $P-V$ 曲线为单峰. 而当阵列或组件被遮挡, “旁路二极管”导通时, 组件或阵列的输出特性将发生较大变化.

因此, 被遮挡对太阳能电池组件或阵列的输出特性的影响原理和实验研究是十分必要的. 国外对此已做了较长时间的实验研究, 而国内对该部分的研究较少, 且大都停留在测定阴影造成功率损失的实验研究上, 原理部分的研究较少^[8~11]. 本文以太阳能电池的电流方程为基础, 研究太阳能电池组件的正向和反向特性, 并考虑到旁路二极管激活后对电路的影响, 从理论上推导出串联太阳能电池组件被部分遮挡后的 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线.

1 被部分遮挡的串联光伏组件电流方程的建立

实际应用的光伏阵列在串联回路中每一个光伏电池组件都并联一个旁路二极管, 以使得被遮挡的光伏电池板将通过旁路二极管导通整个阵列的电流. 图 1 给出了安装有旁路二极管的太阳能电池串联支路的模型图.

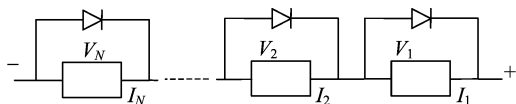


图 1 安装旁路二极管的太阳能电池组件串联支路模型图
Fig. 1 Serial branch model of PV module with bypass diode

对于支路中的每一个太阳能电池组件, 可以用如下的电流方程来表示

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

式中, I_{PH} 为光生电流; I_0 为反向饱和电流; n 为二极管影响因子; q 为电子电荷常数, 为 1.6×10^{-19} C;

T/K 为温度; k 为玻耳兹曼常数, 为 1.38×10^{-23} J/K. 通常电池的并联内阻 R_{SH} 很大, 使 $\frac{V + IR_S}{R_{SH}}$ 项远远小于电池输出电流, 该项可以忽略^[12~14], 其中 R_S 为电池的串联内阻. 式(1)变为

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

旁路二极管的电流 I_b 为

$$I_b = I_{0b} \left\{ \exp \left[\frac{-qV}{n_b k T_b} \right] - 1 \right\} \quad (3)$$

为了分析被遮挡后串联组件的电流输出特性, 从串联支路中取出两个电池组件, 图 2 给出了电路模型. 每一个电池组件的参数认为是一致的, 在均匀光照强度下, 它们处于相同的工作电流, 旁路二极管处于阻断状态, 因此电流输出仍然符合膝形特性, 功率输出维持单峰性. 但在非均匀光照强度下, 若第一块电池组件的光生电流减小, 即 $I_{PH2} > I_{PH1}$, 旁路二极管就有可能导通.

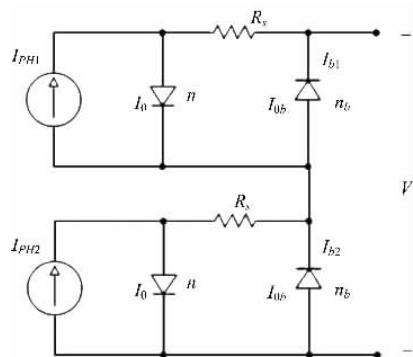


图 2 安装旁路二极管的串联太阳能电池组件电路模型图
Fig. 2 Circuit model of serial PV module with bypass diode

因此在电池被遮挡的情况下, 即 $I_{PH2} \neq I_{PH1}$ 时, 随着外接负载电阻由小增大, 旁路二极管有导通和阻断的两种情况:

(I) 当外接负载电阻很小, 即输出电流很大时, 因为 $I_{PH2} > I_{PH1}$, 所以组件 2 的输出电流大于组件 1 本身产生的电流 I_{PH1} , 此时组件 1 的旁路二极管两端形成正向偏压, 即旁路二极管处于导通状态. 组件 2 多余的电流即 $I - I_{PH1}$ 从旁路二极管流过对外输出. 这个阶段只有组件 2 对外输出功率, 而组件 1 则吸收由组件 2 输出的部分功率, 因此串联后的电流方程就是组件 2 的输出特性方程

$$I = I_{PH2} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + V_b + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

式中, V_b 为组件 1 的旁路二极管上的正向偏压, 可由下式求得

$$V_b = \frac{n_b k T_b}{q} \ln\left(\frac{I - I_{PH1}}{I_{0b}} + 1\right) \quad (5)$$

把式(5)代入式(4)变换可得

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - \frac{n_b k T_b}{q} \ln\left(\frac{I - I_{PH1}}{I_{0b}} + 1\right) - IR_s \quad (6)$$

(II) 随着外接负载电阻的增大,即输出电流越来越小时,当组件 2 的输出电流等于组件 1 本身产生的电流 I_{PH1} 时,组件 1 的旁路二极管两端开始形成反向偏压,即旁路二极管开始处于阻断状态.因此这个阶段组件 1 和 2 都开始正常对外输出功率,串联后的电流方程就是组件 1 和 2 的输出特性方程

$$V = V_1 + V_2 = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH1} - I}{I_0} + 1\right) + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - 2IR_s \quad (7)$$

综上所述,由于旁路二极管的存在,整个串联组件的电流特性发生了改变.在旁路二极管导通和阻断的两种工作状态下,串联组件的电流特性可以用分段函数来表示

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - \frac{n_b k T_b}{q} \ln\left(\frac{I - I_{PH1}}{I_{0b}} + 1\right) - IR_s, I_{PH1} < I \leq I_{PH2} \\ V &= \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH1} - I}{I_0} + 1\right) + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - 2IR_s, 0 \leq I \leq I_{PH1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

通过以上对带有旁路二极管的串联组件电路的分析,知道一个膝形的光伏电流特性方程已经失效,可以用分段函数来描述被部分遮挡的串联光伏组件电流输出特性,而方程之间的交汇点则是旁路二极管导通与阻断的转折点.

根据电路理论,输出功率 $P = IV$,因此功率方程也是一个分段函数,

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{nkTI}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - \frac{n_b k T_b I}{q} \ln\left(\frac{I - I_{PH1}}{I_{0b}} + 1\right) - I^2 R_s, I_{PH1} < I \leq I_{PH2} \\ P &= \frac{nkTI}{q} \ln\left(\frac{I_{PH1} - I}{I_0} + 1\right) + \frac{nkTI}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - 2I^2 R_s, 0 \leq I \leq I_{PH1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这样就建立了串联电路的 $P-I$ 关系式.根据 $\frac{dP}{dI} = 0$

很容易地找到它的最大功率点,因为分段函数的性质,这时可以求解出两个值.这说明组件在被遮挡的情况下,传统的 MPPT 方法的基础——功率输出的单峰性——已经失效.有几个组件被遮挡,功率特性曲线就会出现几个峰值.

2 实验验证

为了验证上述方法的正确性,下面以 Kawamura H 等研究的电池实验数据^[15]为例,用分段函数的方法分别计算它们的 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线并与实验值进行比较.

表 1 为组件 1 被部分遮挡时的电池实验数据.

表 1 太阳能电池实验数据

Tab. 1 Solar cells experimental data

V/V	I/A	V/V	I/A	V/V	I/A
0	3.66	20	1	35.96	0.5
5	3.64	25	1	36.33	0.4
10	3.62	33.55	0.9	36.67	0.3
12.5	3.41	34.46	0.8	36.99	0.2
15	2.6	35.06	0.7	37.29	0.1
16.8	1.5	35.54	0.6	37.58	0

从表 1 中可以看出,短路电流为 3.66 A,开路电压为 37.58 V,另一个膝型平台的电流为 1 A.根据前面的分析,第一个短路电流 3.66 A 为未遮挡组件的短路电流,第二个膝型平台的电流 1 A 为被部分遮挡的组件的短路电流.当外接负载电阻增大到一定程度时,即旁路二极管开始处于阻断状态后,两个组件 1 和 2 都开始正常对外输出功率,此时的电流方程为

$$V = V_1 + V_2 = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH1} - I}{I_0} + 1\right) + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH2} - I}{I_0} + 1\right) - 2IR_s \quad (10)$$

从前面理论分析中可以看出,式中的 $\frac{nkT}{q}$ 是可以整合在一起的量, $\frac{nkT}{q}$ 中各个参量从来没有单独出现过,因此定义 $a = \frac{nkT}{q}$ ^[16].把 $I_{PH1} = 3.66$ A 和 $I_{PH2} = 1$ A 分别代入式(10)可得

$$V = a \ln\left(\frac{3.66 - I}{I_0} + 1\right) + a \ln\left(\frac{1 - I}{I_0} + 1\right) - 2IR_s \quad (11)$$

再利用表1中后半部分的数据进行数值拟合,求出 a, I_0, R_S 三个参数值(表2).

表2 太阳能电池电性参数

电池序号	I_{PH}/A	$I_0/\mu A$	a	R_S/Ω
1	1.00	0.025	1.035	0.75
2	3.66	0.025	1.035	0.75

另外,组件1和2所并联的旁路二极管是整流型二极管,选取了 $I_{ob} = 5.95 \mu A$, $\alpha = \frac{n_b k T_b}{q} = 0.1035$,在 $1 \sim 3.66 A$ 这个电流段和实验数据符合较好.

运用上述理论推导串联后的电流方程,把各组件参数代入式(8)可得,

$$\left. \begin{aligned} V &= 1.035 \ln \left(\frac{3.66 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) - \\ &0.104 \ln \left(\frac{I - 1}{5.95 \times 10^{-6}} + 1 \right) - 0.75I, 1 < I \leq 3.66 \\ V &= 1.035 \ln \left(\frac{3.66 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) + \\ &1.035 \ln \left(\frac{1 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) - 1.5I, 0 \leq I \leq 1 \end{aligned} \right\} (12)$$

根据电流方程(12)画出它的 $I-V$ 特性曲线,与实验测得的曲线进行比较(图3).

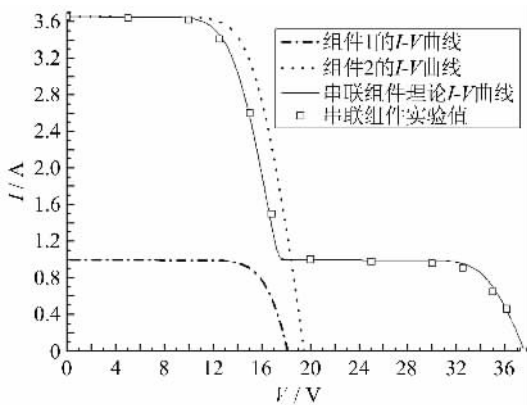


图3 安装旁路二极管的串联太阳能电池组件受到非均匀光照的实验与理论的 $I-V$ 曲线

Fig. 3 Experimental and theoretic $I-V$ curve of serial PV module with bypass diode

从图3可以看出实验和理论曲线符合得较好,理论值与实验值的最大误差为5%,平均误差为2%,说明分段函数可以准确地描述被部分遮挡的串联光伏组件电流输出特性,电流特性曲线不再只有

一个膝形,而是有两个膝形.

同理,被部分遮挡的串联组件功率特性可把各组件参数代入式(9)得

$$\left. \begin{aligned} P &= 1.035 I \ln \left(\frac{3.66 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) - \\ &0.104 I \ln \left(\frac{I - 1}{5.95 \times 10^{-6}} + 1 \right) - 0.75 I^2, 1 < I \leq 3.66 \\ P &= 1.035 I \ln \left(\frac{3.66 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) + \\ &1.035 I \ln \left(\frac{1 - I}{0.025 \times 10^{-6}} + 1 \right) - 1.5 I^2, 0 \leq I \leq 1 \end{aligned} \right\} (13)$$

方程(13)描述出它的 $P-I$ 特性,根据 $V = \frac{P}{I}$,可以很容易得到 $P-V$ 曲线,并与实验值进行比较(图4).

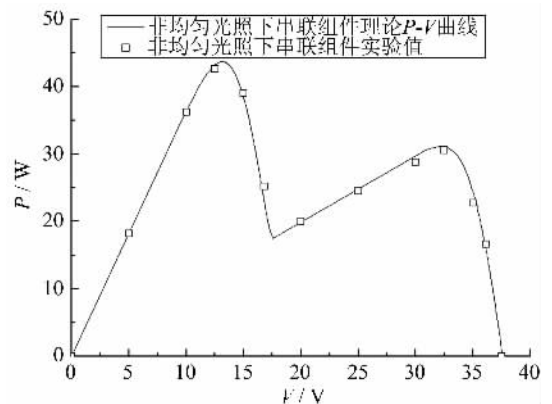


图4 安装旁路二极管的串联太阳能电池组件受到非均匀光照的实验与理论 $P-V$ 曲线

Fig. 4 Experimental and theoretic $P-V$ curve of serial PV module with bypass diode under non-uniform illumination

从图4可以看出非均匀光照下实验和理论曲线符合得较好,说明分段函数也可以准确地描述被部分遮挡的串联光伏组件功率输出特性.另外,通过和均匀光照下 $P-V$ 特性的比较,可知功率输出的单峰性已经失效,因为在两种不同强度的光照下,在 $P-V$ 曲线图上很明显地有两个峰.按照传统的最大功率跟踪策略,此时有两个“最大功率点”,如仅仅跟踪到较小的那个峰值,就可能损失了真正的最大功率.

3 结论

上述方法以太阳能电池的电流方程为基础,结合电路的基本理论,对带有旁路二极管的串联组件在被部分遮挡的情况下的输出特性进行了详细的物理分析.根据旁路二极管导通与阻断两个阶段对电路的影响,从理论上推导出可以运用分段函数准确

描述被部分遮挡的串联光伏组件电流和功率输出特性. 可以推论出在串联了 N 个太阳能电池组件的支路中, 当受到 K 个不同强度的入射光强照射时, 组件的 $I-V$ 特性曲线将出现 K 个膝形, $P-V$ 特性曲线将出现 K 个峰. 此时运用传统的最大功率跟踪方法可能会让系统工作在某一个较小的峰值附近, 而无法确保系统工作在最大的峰值上. 今后的工作是改进传统的最大功率跟踪方法, 以便总能准确跟踪到系统的最大功率点.

参考文献 (References)

- [1] Wang Fei, Yu Shi-jie, Su Jian-hui. Research on photovoltaic grid-connected power system [J]. Transaction of CES, 2005, 20(5): 72-74.
王飞, 余世杰, 苏建徽. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74.
- [2] Riza M, Minwon P, Mohammed D, et al. A maximum power point tracking for photovoltaic-SPE system using a maximum current controller [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2003, 75(3-4): 697-706.
- [3] Zhai Zai-teng, Cheng Xiao-fang, Ding Jin-lei, et al. Influence of the electrical parameters to serial solar panels mismatch losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(25): 42-45.
翟载腾, 程晓舫, 丁金磊, 等. 电性参数对串联太阳能电池失配损失的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(25): 42-45.
- [4] Mohammad A S, Masoum H D, Ewald F F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic system with voltage- and current-based maximum power-point tracking [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514-522.
- [5] Chihchiang Hua, Jongrong Lin. A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(6): 911-925.
- [6] Eugene V S, Shengyi Liu, Roger A D. Power controller design for maximum power tracking in solar installations [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(5): 1 295-1 304.
- [7] Kawamura T, Harada K, Ishihara Y, et al. Analysis of MPPT characteristics in photovoltaic power system [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 47(1-4): 155-165.
- [8] Gavaghan D J, Hahn C E W, Kovach A. Determination of energy output losses due to shading of building-integrated photovoltaic arrays using a raytracing technique[J]. Solar Energy, 1996, 57(2): 117-124.
- [9] Achim W, Johan N, Ronnie B. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations; Literature review and field test results [J]. Solar Energy, 2003, 74(3): 217-233.
- [10] Sharma A K, Dwivedi R, Srivastava S K. Performance analysis of a solar array under shadow condition [J]. Solar Energy, 2003, 74(3): 217-233.
- [11] Alonso M C, Ruiz J M, Chenlo F. Experimental study of mismatch and shading effects in the $I-V$ characteristic of a photovoltaic module [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(3): 329-340.
- [12] Yu Shi-jie, He Hui-ruo. Photovoltaic using of solar energy [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 1991: 6-17.
余世杰, 何慧若. 太阳能的光伏利用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 1991, 6-17.
- [13] Su Jian-hui, Yu Shi-jie, Zhao Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.
苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [14] Ding Jin-lei, Cheng Xiao-fang, Fu Tai-ran. The analysis of series resistance and $P-T$ characteristic of solar cell [J]. Vacuum, 2005, 77(2): 163-167.
- [15] Mishina T, Kawamura H, Yamanaka S, et al. A study of the automatic analysis for the $I-V$ curves of a photovoltaic subarray [C]//Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2002: 1 630-1 633.
- [16] De Soto W, Klein S A, Beckman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance [J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 78-88.