

doi: 10. 3788/gzxb20174606. 0604001

不均匀光照条件下太阳能电池串联电路特性 分析及 GMPPT 控制

乐全明¹, 赵健², 郭力²

(1 国网浙江省电力公司, 杭州 310007)

(2 天津大学 电气与自动化工程学院 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要:通过对太阳能电池串联电路的动态特性分析,建立了不均匀光照条件下多峰值出现的充要条件. 基于串联电路的工作原理,建立了局部峰值点功率之间的数学关系,确定了最大功率点区间位置的动态判断系数. 该方法可快速定位全局最大功率点所在区间,确定该区间的上下边界,将电导增量法的运行初值保持在该区间,能够使其快速准确跟踪到全局最大功率点. 该方法利用较少计算和小区间搜索代替全局搜索,具有良好的快速性和准确性. 同时该方法改善了区间搜索重启条件使其拥有较强的鲁棒性.

关键词:光伏系统;全局最大功率跟踪;最优初值;太阳能电池;全局最大功率区间;充要条件;不均匀光照
中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)06-0604001-12

Analysis of Dynamic Characteristic for Solar Arrays in Series and GMPPT Control

YUE Quan-ming¹, ZHAO Jian², GUO Li²

(1 State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou, 310007, China)

(2 Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, College of Electrical Engineering
and Automation, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract: Based on circuit analysis, this paper shows that the number of peak points can be determined by short-circuit currents and maximum-power point currents of all the arrays in series. The principle is established based on which the number of the peak points is to be determined. Furthermore, based on the dynamic characteristic of solar array, this paper establishes the rule for determination of the relative position of the global maximum power point. In order to track the global maximum power point within an appropriate period, a reliable technique and the corresponding computer algorithm are developed for global maximum power point tracking control. It exploits a definable nonlinear relation is found between variable environmental parameters and the output current of solar arrays at every maximum power point, obtained based on the dynamic performance corresponding to partial shading condition.

Key words: Photovoltaic system; Global maximum power point tracking; Optimal initial value; Solar cell; Global maximum power point tracking zone; Sufficient and necessary condition; Partial shading

OCIS Codes: 040.5350; 040.1240; 250.3140

0 引言

由于持续恶化的环境和全球能源危机,可再生能源的利用和发展得到持续的增强. 太阳能作为一种无污染、可再生、储量无限的新型能源成为具有强大生命力的替代能源形式^[1-2]. 但在发展中也有诸多亟需解决的问题,效率是主要问题之一. 太阳能电池的伏安特性主要受辐照度、结点温度等因素的影响. 在光伏发电实际过程中,为了满足输出电压和功率的要求,需要将多个太阳能电池板串联起来. 天气不断变化,尤其是云

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2015AA050104)资助

第一作者: 乐全明(1974—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为智能电网技术. Email: yqm8341@sohu.com.

收稿日期: 2016-11-30; **录用日期:** 2017-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

团、树荫、建筑物、太阳能电池表面灰尘等给部分电池板造成阴影遮挡,表现出不同的伏安特性.相互串联的太阳能电池板在伏安特性不一致时会导致热斑的产生,为避免热斑带来的器件损坏,通常为太阳能电池并联旁路二极管.此时,串联电路的输出功率特性曲线常常会呈现出多峰状态,影响最大功率点跟踪的实现.为提高光伏系统转换效率,需要使光伏系统持续工作在全局最大功率点,从而实现全局最大功率跟踪(Global Maximum Power Point Tracking, GMPPT)^[3].

实际运行中发现,在较轻程度的不均匀条件下,P-I特性曲线呈现出局部扭曲但不会形成局部峰值的特点.这表明不均匀光照条件是多峰产生的必要条件而非充分条件.文献[4]提及峰值点数跟各互相串联的光伏单元被遮挡的程度有关.但并未对多峰出现的充要条件进行论证.针对光伏系统全局最大功率点区间,文献[5]提出了一种三步法,第一步通过使系统处于短路初始状态并运用电导增量法寻找第一个局部最大功率点;第二步通过对系统施加正向电压扰动寻找该区域的短路电流拐点并得到短路电流;第三步运用最大功率点电流与短路电流的比例关系,对其他峰值点进行预判比较找到最大功率点区间.三步法循环的初始条件是系统处于短路状态,程序频繁启动将会造成能量较大浪费.文献[4]提出了一种分界比例系数法,通过对各电池板短路电流的比较找到最大功率点区间.该方法的分界比例系数忽略了光照的影响,有较大的误差,且该方法并未确定最大功率点区间的上下边界.

目前,国内外针对光伏系统的GMPPT策略进行了较多研究.文献[6]采用有源开关拓扑将P-U特性由多极值点校正为单极值点,然后采用常规MPPT算法搜索阵列的最大功率点,缺乏实用性.文献[7-8]采用粒子群算法实现多峰GMPP控制.该方法以功率突变为重启条件,功率突变并不是遮阴条件的充分条件,扩大了重启范围;搜索算法以光伏阵列开路为初始条件,频繁的启动将会减少能量的输出.文献[9-10]提出Fibonacci序列跟踪全局最大功率点,然而该算法也不能保证任意情况下全局最大功率点(Global Maximum Power Point, GMPP)的跟踪.文献[11-12]研究了两步法,首先将工作点移动到由负载曲线和阵列I-U曲线的相交处,然后采用传统MPPT进行最大值搜索,但是在复杂条件下不能跟踪到最大功率点.

在复杂条件下,最大功率点具有随机性、不确定性和不稳定性,因此在光伏发电GMPPT策略中,快速性、准确性、鲁棒性和高效率需要统筹兼顾^[13].本文首先分析了太阳能电池串联电路在严重局部阴影和轻微局部阴影下的输出特性,提出了造成多峰的充要条件.在数学分析的基础上,建立了串联电路全局最大功率点动态区间,并确定了上下边界.将光伏系统运行在此区间的任意一点,并作为常规电导增量法的运行初值,可精确跟踪到全局最大功率点.本方法确定的最大功率区间是一个动态区间,能够满足最大功率点随机性的要求;在区间内运用电导增量法追踪最大功率点,因此具有较好的准确性和鲁棒性.

1 串联太阳能电池的动态特性

1.1 串联太阳能电池的数学模型

对于单个太阳能电池,文献[14]给出了其等效的数学模型(见图1),即

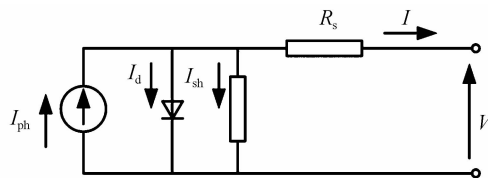


图1 PV等效模型

Fig. 1 Equivalent circuit of the PV module

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{Q}{nkT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中 I 和 V 分别代表太阳能电池的输出电流和输出电压, I_0 是二极管反向饱和电流, I_{ph} 是光生电流; Q 是电荷常量; k 是玻尔兹曼常量; T 太阳能电池温度.在实际工程中,式(1)可被简化为^[14]

$$V = V_{oc} \left[1 + \frac{1}{A} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{sc}} \right) \right] \quad (2)$$

$$P = I \times V = IV_{oc} \left[1 + \frac{1}{A} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{sc}} \right) \right] \quad (3)$$

式中 $A = \frac{V_{oc}}{V_m - V_{oc}} \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)$; I_m 和 V_m 分别代表最大功率运行点的电流和电压; I_{sc} 是太阳能电池短路电流; V_{oc} 是太阳能电池开路电压. 式(2)描述的是在标准辐照度($1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$)和标准温度($25\ ^\circ\text{C}$)下太阳能电池的特性. 考虑到光照及温度变化对光伏电池特性曲线的影响,需要加以修改来描述新的特性曲线. 对于一个由 p 块太阳能电池串联的电路,下标 i 代表第 i 个太阳能电池在任意条件下的参量. 在工程准确度条件下有^[15-17]

$$I_{sci} = I_{sc} \times \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (4)$$

$$V_{oci} = V_{oc} \times (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \quad (5)$$

$$I_{mi} = I_m \times \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (6)$$

$$V_{mi} = V_m \times (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \quad (7)$$

式中, $\Delta T = T - T_{ref}$; $\Delta S = S/S_{ref} - 1$; T_{ref} 为标况温度; S_{ref} 为标况辐照度. 变量 a 、 b 、 c 的典型值分别为 $0.002\ 5/^\circ\text{C}$ 、 0.5 、 $0.002\ 88/^\circ\text{C}$.

定义短路电流矢量为

$$\mathbf{I}_{sc} = [I_{sc1}, I_{sc2}, \dots, I_{scp}] \quad I_{sc1} < I_{sc2} < \dots < I_{scp} \quad (8)$$

则串联太阳能电池的数学模型可分段表示为

$$\begin{aligned} V_{sys} &= V_1 + V_2 + \dots + V_p - V_{diod} \quad (9) \\ P_{sys} &= V_{sys} \times I_{sys} = V_1 I_{sys} + \dots + V_p I_{sys} - V_{diod} I_{sys} = \\ &\sum_i^p IV_{oci} \left[1 + \frac{1}{A_i} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{sci}}\right) \right] - 0.7(i-1) \begin{cases} I_{sci-1} \leq I < I_{sci} \\ i = 1, 2, \dots, p \\ I_{sys} = I \\ I_{sc0} = 0 \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{sys}}{dI} &= V_{oci} \left[1 + \frac{1}{A_i} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{sci}}\right) \right] + IV_{oci} \frac{1}{A_i(I - I_{sci})} + V_{oci+1} \left[1 + \frac{1}{A_{i+1}} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{sci+1}}\right) \right] + \\ &IV_{oci+1} \frac{1}{A_{i+1}(I - I_{sci+1})} + \dots + V_{ocp} \left[1 + \frac{1}{A_p} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{scp}}\right) \right] + IV_{ocp} \frac{1}{A_p(I - I_{scp})} \quad (11) \end{aligned}$$

式中 V_{sys} 、 I_{sys} 和 P_{sys} , 分别为串联电路输出电压、电流和功率.

1.2 多峰的充要条件

图 2 是两个太阳能电池板组成的串联电路. 假设 $I_{sc1} < I_{sc2}$, 当串联电流 I 大于 I_{sc1} 时, 施加给 PV_1 的多余电流会造成 PN 结雪崩击穿, 形成热斑, 损坏电池组件. 为避免热斑的形成, 通常为每个太阳能电池并联旁路二极管为多余电流提供流通回路. 当串联电流大于电池板的短路电流时, 对应的并联二极管导通, 此时该太阳能电池不参与系统的功率输出. 根据串联电流的大小和二极管的导通情况, 串联电路的输出特性如图 3 所示.

串联电路的输出特性可归纳为两种情况. 当 $I_{m2} > I_{sc1}$ 时, 输出特性曲线如图 3(a) 所示, 电路工作状态描述如下:

1) 当 $0 < I < I_{m1}$ 时, 电路中二极管工作在关断状态, PV_1 和 PV_2 都参与功率输出; V_1 和 V_2 变化不大, 基本处于恒压状态. 总输出功率 P_{sys} 单调递增;

2) 当 $I_{m1} < I < I_{sc1}$ 时, PV_1 和 PV_2 都参与功率输出. 随着电流增加, V_1 和 P_1 迅速降低至 0; V_2 基本保持不变, P_2 单调递增. 根据式(11)可知, $\frac{dP_{sys}}{dI}/I=I_{m1} > 0$ 、 $\frac{dP_{sys}}{dI}/I=I_{sc1} < 0$, 又 P_{sys} 是连续的, P_1 和 P_2 在该区间是

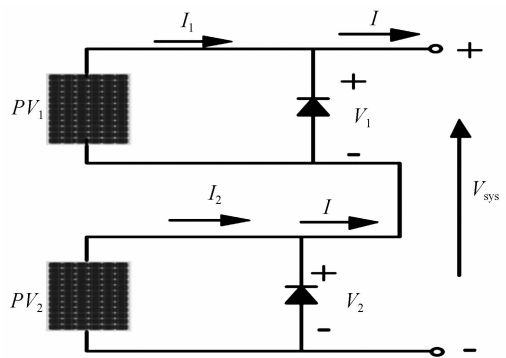


图 2 太阳能电池串联电路
Fig. 2 Solar arrays in series

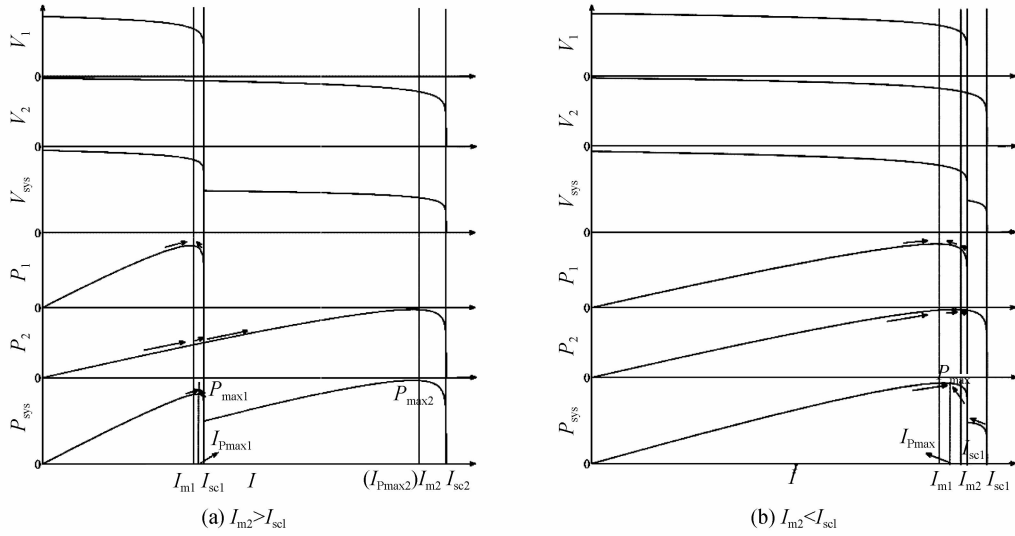


图3 不同条件下串联电路输出特性

Fig. 3 Dynamic characteristic curves of 2 PV arrays series connected in different condition

单调的,因此在区间 (I_{m1}, I_{sc1}) 存在唯一的电流 I_{Pmax1} 得 $\frac{dP_{sys}}{dI}=0$.对应的 P_{max1} 是此区间的最大功率点;

3)当 $I_{sc1} < I < I_{sc2}$ 时, PV_1 并联二极管导通, PV_1 被短路不参与功率输出.串联电路的输出特性与 PV_2 单独作用时一致.在串联电流等于 I_{m2} 时 $\frac{dP_{sys}}{dI}=0$,对应的 P_{max2} 是该区间的最大功率点.

综上, $I_{m2} > I_{sc1}$ 条件下,整个运行区间串联电路存在2个峰值点.当 $I_{m2} < I_{sc1}$ 时,输出特性曲线如图3(b)所示,电路工作状态描述如下:

1)当 $0 < I < I_{m1}$ 时, PV_1 和 PV_2 都参与功率输出; V_1 和 V_2 变化不大,基本处于恒压状态.总输出功率 P_{sys} 单调递增;

2)当 $I_{m1} \leq I \leq I_{m2}$ 时, PV_1 和 PV_2 都参与功率输出.随着电流增加, V_1 和 P_1 下降速度逐渐加快; V_2 基本保持不变; P_2 逐渐增大.由式(11)可知, $\frac{dP_{sys}}{dI}/I=I_{m1} > 0$ 、 $\frac{dP_{sys}}{dI}/I=I_{m2} < 0$.同时, P_{sys} 是连续的, P_1 单调递减, P_2

单调递增,因此在区间 (I_{m1}, I_{m2}) 存在唯一的电流 I_{Pmax} 使得 $\frac{dP_{sys}}{dI}=0$,对应的 P_{max} 是该区间的最大功率点;

3)当 $I_{m2} \leq I \leq I_{sc2}$ 时, V_1 和 P_1 迅速降低至0,在串联电流为 I_{sc1} 处, PV_1 旁路二极管导通, PV_1 被短路; V_2 和 P_2 在整个区间迅速降低至0.总功率 P_{sys} 单调递减.串联电路在该区间不存在最大功率点.

经过分析可知在 $I_{m2} < I_{sc1}$ 条件下,整个运行区间串联电路仅存在1个峰值点.在当 $I_{m2} = I_{sc1}$ 时,串联电路运行特性与 $I_{m2} < I_{sc1}$ 时相同, P_{sys} 在 I_{m2} 处不可导,串联电路只存在一个峰值点.

综上,当 $I_{m2} > I_{sc1}$ 时,串联电路存在两个峰值点;当 $I_{m2} \leq I_{sc1}$ 时,串联电路仅存在一个峰值点.因此,该太阳能电池串联电路多峰的充分必要条件为 $I_{m2} > I_{sc1}$.推广到多太阳能电池串联电路,多峰的充分必要条件可描述为:相邻光照条件的两块太阳能电池板,辐照度较强的太阳能电池的最大功率点电流大于辐照度较弱的太阳能电池的短路电流.数学描述为

$$I_{mi} > I_{sci-1} \tag{12}$$

式中, I_{mi} 是 I_{sc1} 对应的最大功率点电流,满足电流矢量 I_{sc} 的排序.将式(4)和(6)带入式(12)可得

$$I_{sc} \times \frac{S_{i-1}}{S_{ref}} < I_m \times \frac{S_i}{S_{ref}} \frac{(1+a\Delta T_i)}{(1+a\Delta T_{i-1})} \tag{13}$$

式中 S_i 和 ΔT_i 是 I_{sc1} 对应的光照和温度差.工程中,太阳能电池结点温度满足

$$T_i = T_{air} + 0.02 \times S_i \tag{14}$$

因此, $\frac{1+a\Delta T_i}{1+a\Delta T_{i-1}} \approx 1$.式(13)简化为

$$\frac{S_i}{S_{i-1}} > \frac{I_{sc}}{I_m} \quad (15)$$

式(15)描述了同型号太阳能电池板串联电路出现多峰现象的充分必要条件. 重复判断,记录满足式(15)的分母辐照度 S_i 下标号,构成向量 \mathbf{Q} ,不等式(15)满足的次数即是峰值点个数 q . \mathbf{Q} 的物理意义是该向量中元素对应的电池板的 I_m 附近存在局部峰值.

一般情况下,短路电流与峰值点电流的比值约为 0.92^[18],峰值充要条件可进一步简化为

$$\frac{S_i}{S_{i-1}} > 1.09 \quad (16)$$

由多峰充要条件可知,在足够多太阳能电池串联电路中,峰值点个数是有限的,其最大值取决于辐照度区间. 不同辐照度区间内峰值点最大值见表 1. 由表 1 可知,在 100~1 000 辐照度区间内,串联电路至多有 28 个峰值点;当辐照度全部大于 920 时,串联系统不存在多峰现象;高辐照度区间峰值点个数远小于低辐照度区间;当辐照度小于 400 时,峰值点个数急剧增大. 因此,在低辐照度时,串联电路需要更好性能的全局最大功率跟踪策略.

表 1 不同辐照度范围下最大峰值数

Table 1 Quantity of LMPPs under different irradiance conditions

S/1000	0.92~1	0.8~1	0.6~1	0.4~1	0.3~1	0.1~1
LMPPsQty	1	3	7	11	15	28

1.3 全局最大功率区间的判定

在图 3(a)中,串联电路存在两个峰值点 $P_{\max 1}$ 和 $P_{\max 2}$. 峰值点 1 对应的串联电流 $I_{p_{\max 1}}$ 近似等于 I_{m1} ,此时 PV_2 运行在小电流状态,对应的 V_2 近似等于 V_{oc2} . $P_{\max 1}$ 和 $P_{\max 2}$ 可表示为

$$P_{\max 1} \approx V_{m1} \times I_{m1} + I_{m1} \times V_{oc2} \quad (17)$$

$$P_{\max 2} = I_{m2} \times V_{m2} \quad (18)$$

假设 $P_{\max 1}$ 大于 $P_{\max 2}$,则有

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} > \frac{V_{m2}}{V_{m1} + V_{oc2}} \quad (19)$$

结合式(5)、(6)和(7),式 19 可转化为

$$\frac{S_1}{S_2} > \frac{V_m \ln(e + b\Delta S_2)}{V_m \ln(e + b\Delta S_1) + V_{oc} \ln(e + b\Delta S_2)} = L_{1,2}^2 \quad (20)$$

$L_{1,2}^2$ 是一个无量纲系数,其物理意义为局部最大功率值大小的分界系数. 当 S_1/S_2 大于 $L_{1,2}^2$ 时, $P_{\max 1}$ 大于 $P_{\max 2}$; S_1/S_2 等于 $L_{1,2}^2$ 时, $P_{\max 1}$ 等于 $P_{\max 2}$; 当 S_1/S_2 小于 $L_{1,2}^2$ 时, $P_{\max 2}$ 大于 $P_{\max 1}$.

推广到 p 块电池串联的多峰值电路式(20)转化为

$$\frac{S_i}{S_j} > \frac{V_m \ln(e + b\Delta S_j) + V_{oc} \ln\left[\prod_{j+1}^p (e + b\Delta S_{j+1})\right]}{V_m \ln(e + b\Delta S_i) + V_{oc} \ln\left[\prod_{i+1}^p (e + b\Delta S_{i+1})\right]} = L_{i,j}^p \quad (21)$$

式中 i 和 j 是向量 \mathbf{Q} 的元素. 其物理意义为, p 块电池板串联电路中当 S_i 和 S_j 满足式(21)时, $P_{\max i}$ 大于 $P_{\max j}$. 重复判断不等式(21),最终满足条件的光照下标记为“max”,则全局最大功率点所在区域为 $(I_{sc_{\max-1}}, I_{sc_{\max}})$. 实际中, ΔS_i 间没有数量级的差异,可忽略 $\ln(e + b\Delta S_j)$ 对 $L_{i,j}^p$ 的影响. 通常情况下峰值电压 V_m 约是开路电压 V_{oc} 的 0.8 倍^[18],则 $L_{i,j}^p$ 的典型值如表 2 所示.

表 2 局部最大功率分界系数的典型值

Table 2 Typical values of $L_{i,j}^p$

Arrays	Typical values of $L_{i,j}^p$					
2	$L_{1,2}^2 = 0.444$					
3	$L_{1,2}^3 = 0.643$	$L_{1,3}^3 = 0.286$	$L_{2,3}^3 = 0.444$			
4	$L_{1,2}^4 = 0.737$	$L_{1,3}^4 = 0.474$	$L_{1,4}^4 = 0.211$	$L_{2,3}^4 = 0.643$	$L_{2,4}^4 = 0.286$	$L_{3,4}^4 = 0.444$
p	$L_{i,j}^p = (p-j+0.8)/(p-i+0.8)$					

1.4 基于 PV 运行电压电流的环境参量计算方法

在基于环境参量的最大功率跟踪控制中^[18-22],需要辐照度传感器和温度传感器为控制系统传输实时的光照度及温度数据作为控制的前提.但是在实际系统中,大范围地采用辐照度传感器以及温度传感器一方面使得成本增加,另一方面光伏系统温度实际上指的是电池板结点温度而不是空气温度.结点温度主要取决于电路电流和空气温度.直接采用温度传感器并不能很好地界定电池板温度.

由式(2)可得^[14]

$$I = I_{sc} \{1 - \exp(-A) [\exp(AV/V_{oc}) - 1]\} \quad (22)$$

任何被采用去描述 PV 特性的数学模型都包含了依据实验数据计算的参量.由式(22)可知,太阳能电池的任意运行状态由其输出电压 V 和电流 I 表征.在太阳能电池运行过程中 V 和 I 是实时可测的.因此,式(22)可以看做是 S 和 T 的函数,即

$$f(S) = I_{sc} \{1 - \exp(-A) [\exp(AV/V_{oc}) - 1]\} - I = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[A \left[\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right)} - 1 \right] \right] + \exp(-A) \right\} - I \quad (23)$$

可证, $df(S)/dS$ 在 $[0 \ 1000]$ 内恒大于 0(附录 1). 因此,在光伏系统任意运行点 V 和 I 测定情况下,有且仅有唯一的 S 使得 $f(S) = 0$. 在实际计算中可以用牛顿迭代法进行快速求解.因此在光伏系统任意运行点 V 和 I 测定已知的情况下,可快速求得太阳能电池综合利用辐照度 S 以及电池温度 T .

S 由太阳能电池板本身的伏安特性所约束,代表的是可利用辐照度强度,与辐照度测量仪所测定的辐照度有一定的差别.受限于依据模型的准确性,由精确模型计算的光照度与实际太阳能电池利用辐照度之间有一定的误差.这个误差主要取决于模型的准确度,本文所依据的模型与实际系统存在 6% 以内的误差^[15],在实际计算参量的过程中,利用的实际上是 S/S_{ref} (S_{ref} 一般为 $1 \ 000 \text{ W/m}^2$). 因此,辐照度计算误差并不会加剧计算得到的参量与实际系统参量间的误差.

2 GMPPT 工作原理

2.1 最大功率点电流与环境参量的数学关系

基于太阳能电池的输出功率电流特性,最大功率点表示为

$$\frac{dP_{sys}}{dI} = 0 \quad (24)$$

将式(10)代入式(24)可得

$$\frac{dP_{sys}}{dI} = V_{oci} \left[1 + \frac{1}{A_i} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{sci}} \right) \right] + IV_{oci} \frac{1}{A_i (I - I_{sci})} + V_{oci+1} \left[1 + \frac{1}{A_{i+1}} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{sci+1}} \right) \right] + IV_{oci+1} \frac{1}{A_{i+1} (I - I_{sci+1})} + \dots + V_{ocp} \left[1 + \frac{1}{A_p} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{scp}} \right) \right] + IV_{ocp} \frac{1}{A_p (I - I_{scp})} = 0 \quad (25)$$

对式(25)化简可得

$$\prod_i^p \left(\frac{I_{sci}}{I_{sci} - I} \exp \frac{I_{sci}}{I_{sci} - I} \right)^{\frac{V_{oci}}{A_i}} = \prod_i^p \exp^{V_{oci} \left(1 + \frac{1}{A_i} \right)}, \quad \begin{cases} I_{sci-1} \leq I < I_{sci} \\ i = 1, 2, \dots, p \\ I_{sys} = I \\ I_{sc0} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

1.3 节中求得的 GMPP 所在区间为 $(I_{scmax-1}, I_{scmax})$, 在该区间对式(26)进行求解. 所得的电流为全局最大功率点电流, 记为 I_{pmax} . 由 1.2 节分析可知, 区间 $(I_{scmax-1}, I_{scmax})$ 对应太阳能电池的最大功率点电流 I_{mmax} 与 I_{pmax} 同在该区间且相差不大, 为了减小计算量可用 I_{mmax} 代替 I_{pmax} .

2.2 基于最优初值电导增量的 GMPPT 策略

在复杂条件下, 最大功率点具有随机性、不确定性和不稳定性, INC 法和 P&O 兼具快速性、准确性、鲁棒性和高效率性, 在工程中得到广泛的应用. 在不均匀光照条件下, INC 法跟踪失败的根本原因在于其运行初值不能时刻保持在 GMPP 区间内. 根据前言部分分析, 在确定的 GMPP 区间内运行 INC 法将得到全局最

大功率点,并继承传统 INC 法的优点.

控制流程如图 4 所示. 步骤如下:

1)B-1 和 B-2:采集各太阳能电池板的任意运行电流 I_i 、电压 V_i 、串联电路电流 I 以及环境温度 T_{air} ;

2)B-3:计算各个太阳能电池的辐照度 S_i ;

3)B-4:将 S_i 从小到大排列建立辐照度向量 S ; 温度向量 T ;满足式(16)的辐照度下标构建下标向量 Q ;输出峰值点个数 q ;

4)B-5:依据式(21),寻找全局最大功率区间所对应的电池板标号 \max ;

5)B-6 和 B-7:利用 S_{\max} 计算得到 $I_{m\max}$ 、和 GMPP 区间($I_{sc\max}$, $I_{sc\max-1}$);并将 $I_{m\max}$ 作为参考输入幅值给 I_{ref} ,判断串联电路电流 I 是否在 GMPP 区间(B-7);

6)B-8 和 B-9:如果 I 处于 GMPP 区间,则运行 INC 法精确寻找全局最大功率点(B-8);否则,运行 B-9 使太阳能电池串联电路快速运行到 GMPP 区间.

整个控制过程的特点:

1)此方法在系统启动时,不需要将整个电路运行至短路或者开路状态,只需要测量各个太阳能电池板的运行电压电流,即可得到最大功率点区间,避免能量损失;

2)当串联电流 I 在 GMPP 区间外时,输出 ΔI 使系统快速运行到 GMPP 区间,具有良好的快速性;

3)外界条件变化时,GMPP 区间跟随改变,串联电流只要运行在该区间,INC 法则会寻找到 GMPP,具有良好的鲁棒性和自适应性.

3 辐照度计算实验结果分析

为验证本文提出的辐照度综合计算方法,在实际运行的太阳能系统进行光照度计算实验.

图5为实际测试所用的光伏发电单元照片,主要为验证光照度计算提供实验数据,对应得到运行参量见表3,此表中实验数据在2016年10月天气晴朗的白天测试得到,同时采用文献[4]部分数据.测试用太阳能电池板标况下开路电压为37 V、短路电流为9.03A、最大功率点电流为8.36A,最大功率点电压为29.3 V.



图5 光伏发电单元

Fig.5 Solar units

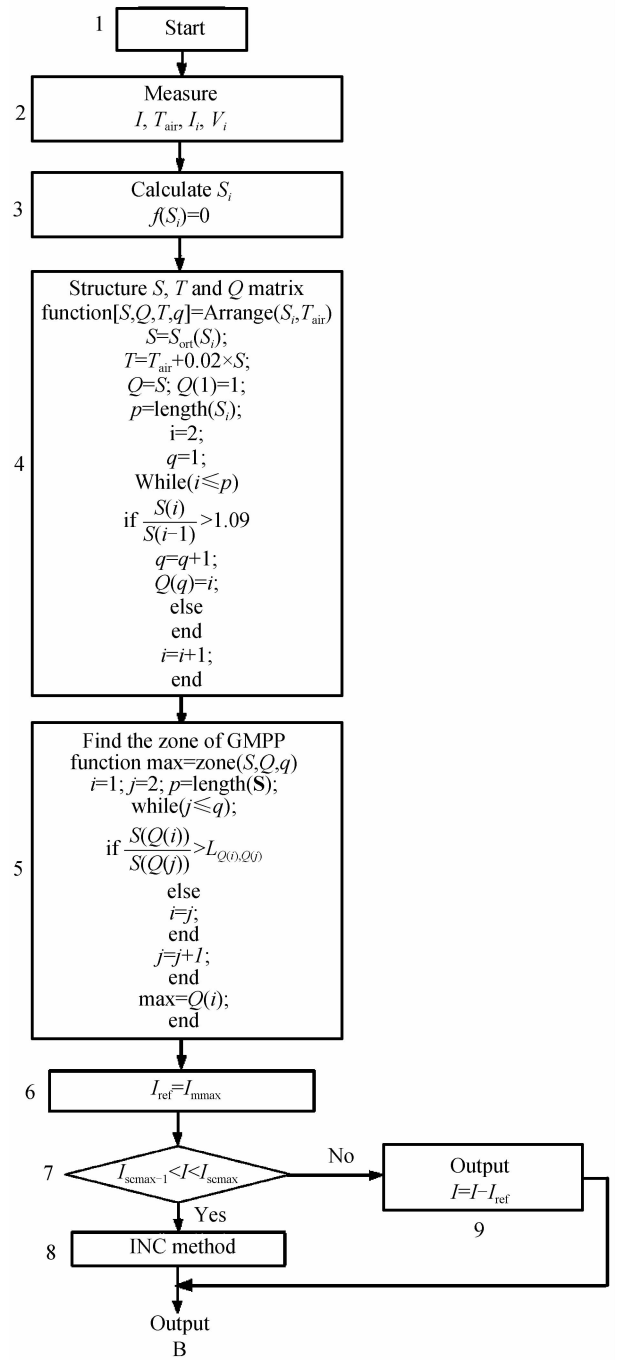


图4 算法流程

Fig.4 Flowchart for the proposed GMPPT method

测试用太阳能电池板标况下开路电压为37 V、短路电流为9.03A、最大功率点电流为8.36A,最大功率点电压为29.3 V.

表 3 实验测量及计算数据

Table 3 Date of experimental measurement and calculation

Data source	T_{air}	V	I	S	S^*	I_{pmax}	V_m
	Meas.	Meas.	Meas.	Meas.	Calc.	Calc.	Calc.
Actual measure	23.1	26.9	6.10	736	714.5	6.15	26.7
	20.5	27.4	5.78	722	689.7	5.89	26.8
	17.4	26.9	6.10	740	714.7	5.89	26.8
Form	4	33.5	2.58	-	636.9	2.46	34.5
Ref. [14]	4	32.3	2.55	-	609.7	2.35	34.3
Table1	4	30.7	0.95	-	239.3	0.90	31.6
	4	31.5	2.19	-	522.5	2.00	33.7

计算流程为:

- 1) 采集 PV 系统任一运行电压和电流数值, 以及环境温度值;
- 2) 基于采集的 V 、 I 和 T_{air} 及公式(23)计算辐照度 S ;
- 3) 利用步骤 2 中辐照度 S 计算最大功率点电压 V_m 及电流值 I_{pmax} .

表 3 中 V 和 I 分别代表当前运行条件下的任一电压和电流, 在实验中为了与计算得到最大功率点电流和电压对比, V 和 I 选取最大功率点附近的数值. 通过对比 I 列和 I_{pmax} 列数据可知, I_{pmax} 与 I 的误差在 3% 左右. 为了增加实验数据来源多样性, 采用了文献[14]的实验数据, 并假定此时的环境温度为 4 摄氏度, 对比 I 列和 I_{pmax} 列数据可知, I_{pmax} 与 I 的误差在 0.3A 以内, 误差在 4% 左右. 由于 I_{pmax} 由 S 计算得到, 这个误差实际上反映了计算得到的 S 与实际 S 的误差. 实验数据表明, 在给定实际运行电压电流情况下, 通过计算得到的辐照度是准确的, 并表明了辐照度计算对温度测量的准确度要求较低.

4 仿真结果分析

4.1 稳定不均匀光照条件下的跟踪性能对比

本文提出的方法一方面基于太阳能电池的数学关系, 另一方面基于太阳能电池的动态特性. 因此在仿真时, MATLAB 仿真用太阳能电池模型需要有较高的准确度并与本文采用的计算模型有所区别, 仿真模型采用了美国国家可再生能源实验室(NREL) Solar Advisor Model 模型中的参量模型^[19]. 为了研究本文提出的基于最优初值电导增量(OIV-INC)的 GMPPT 控制策略的控制特性, 采用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验, 并将实验结果与全局扫描法进行对比. 仿真电路参量: PV 电池板参量 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 分别为 25.44 A、66 V、23.25 A 和 54.2 V; Boost 电路的电感和电容均为理想元件, 其值分别取 0.01 H 和 2 mF; 二极管缓冲电阻、内部电阻和正向压降分别为 500Ω、0.001Ω 和 0.8 V; IGBT 开关缓冲电阻、内部电阻分别为 0.001Ω 和 10^5 Ω; 负载电阻为 500Ω; 仿真起始为零初始状态. 整个仿真实验主要分为稳定不均匀光照条件下和时变不均匀光照条件下的跟踪对比实验.

进行稳定不均匀光照条件下最大功率跟踪性能对比的光伏系统由三块电池板串联组成.

实验 1 环境条件为: 温度 25℃, 太阳辐照度为 1 000 W/m²、400 W/m² 和 0 W/m², 光伏系统输出特性及

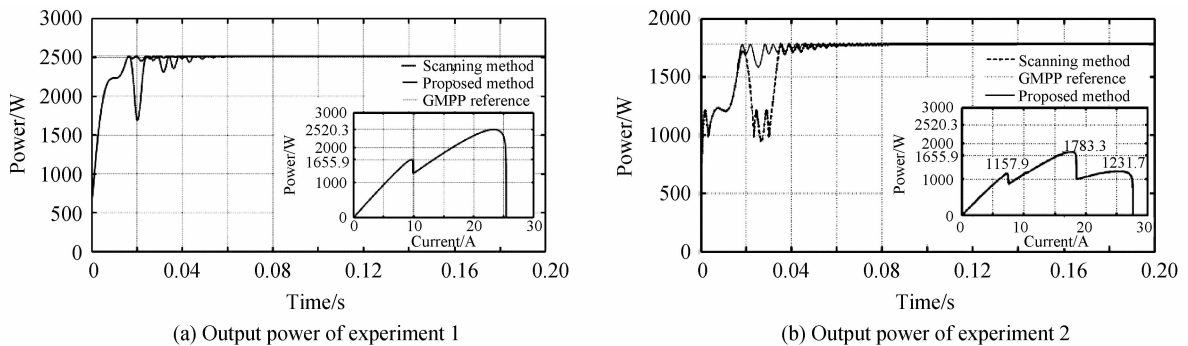


图 6 不同遮阴条件下本文方法和全局扫描法跟踪性能比较

Fig. 6 Tracking performance comparisons of the proposed MPPT method and global search method under different shadow conditions

GMPPT 跟踪曲线如图 6(a)所示.

实验 2 环境条件为: $PV_1(1000 \text{ W/m}^2, 60^\circ\text{C})$, $PV_2(700 \text{ W/m}^2, 40^\circ\text{C})$, $PV_3(300 \text{ W/m}^2, 20^\circ\text{C})$, 输出特性及 GMPPT 跟踪曲线如图 6(b)所示.

图 6(a)和(b)分别有 2 个和 3 个局部最大功率点. 图 6(a)所示为本文方法在起始阶段判断系统运行电流进入最大功率区间,此时运用 INC 法在 18 ms 时准确跟踪到并稳定在最大功率点. 图 6(b)所示为本文方法在起始阶段判断系统运行电流在最大功率区间之外,在 5 ms 后进入最大功率区间,此时运用 INC 法在 18 ms 时准确跟踪到并稳定在最大功率点. 图 6 曲线中 10s 时的功率波动由控制器引起,并非经过局部最大功率点. 对比图 6(a)和(b),全局扫描法的动态性能随着峰值点数量的增多迅速变差. 本文方法在两种情况下均保持了良好的动态性能.

4.2 时变不均匀光照条件下的跟踪性能对比

考虑一种复杂的环境条件,光照和温度变化情况如图 7(a)和(b)所示. PV_1 、 PV_2 和 PV_3 的运行条件分别为 (S_1, T_1) 、 (S_2, T_2) 和 (S_3, T_3) .

实验 3: PV_1 和 PV_2 串联组成系统运行,输出特性和 GMPP 跟踪效果如图 8(a)所示. 0~0.3 s 时间段,系统快速运行到 GMPP 区间,采用 INC 法稳定运行在 GMPP 点. 0.3 s 时环境发生剧烈变化,GMPP 区间边界发生改变,当前运行点与更新后的 GMPP 区间相距较近,经过短暂的暂态过程迅速稳定在新的 GMPP. 0.5 s 时以同样的暂态过程迅速过渡到新的平衡状态,保持全局最大功率输出.

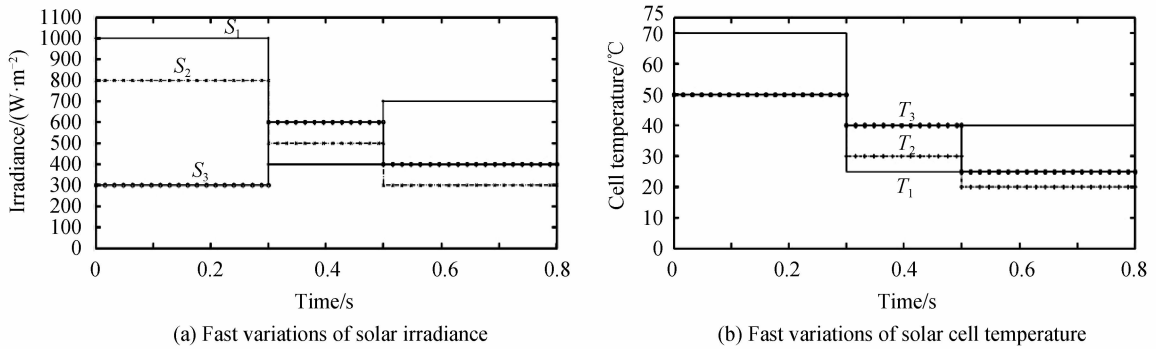


图 7 辐照度和温度变化曲线

Fig. 7 Fast variations of solar irradiance and solar cell temperature

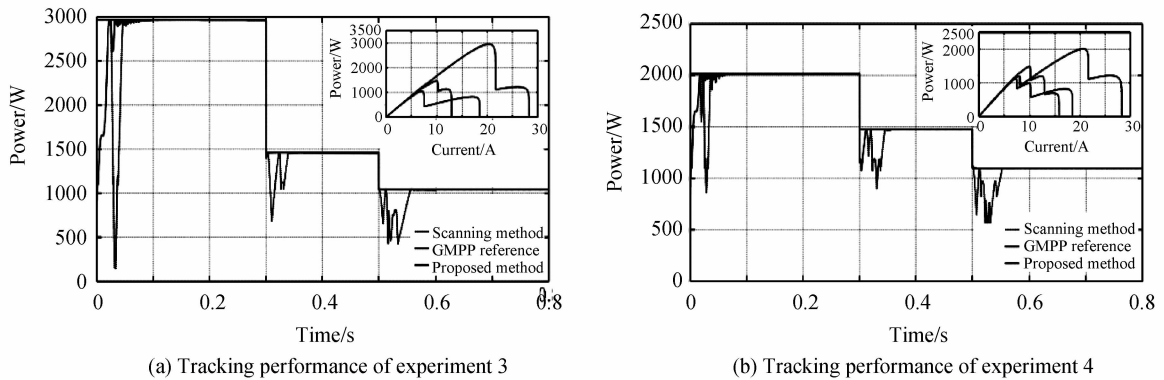


图 8 时变遮阴条件下本文方法和全局扫描法跟踪性能比较

Fig. 8 Tracking performance comparisons of the proposed MPPT method and global search method under variable shadow conditions

实验 4: PV_1 、 PV_2 和 PV_3 串联运行,输出特性和 GMPP 跟踪效果如图 8(b)所示. 在 0~0.3 s 时间段,系统保持与实验 3 同样的动态特性. 在 0.3 s 时,3 块电池板同时发生剧烈环境突变,GMPP 区间发生改变,此时系统当前的运行电流与更新后的 GMPP 区间相距较远,系统输出 ΔI ,以较大的步长快速运行到 GMPP 区间,经过短暂的动态过程重新稳定在新的全局最大功率点. 0.5 s 时,环境条件继续恶化,当前运行点与新的 GMPP 区间较近,系统快速进入该区间并稳定在全局最大功率点. 对比 0.3 s 和 0.5 s 的动态过程发现,当前运行点与新的 GMPP 区间的距离决定了动态过程的长短,较大的环境恶化程度有可能对应一个较小的暂态

过程.

仿真实验结果证明,本文提出的基于最优初值电导增量控制的 GMPPT 方法具有较好的快速性、鲁棒性和自适应性.能够避免系统在环境变化时初始化为短路或开路状态,适用于各种天气情况导致的多峰值状况的最大功率跟踪.

5 结论

本文在分析不均匀光照条件下太阳能电池串联电路动态特性的基础上,提出了一种基于最优初值电导增量控制的 GMPPT 方法,通过理论分析和仿真实验验证,得到以下结论:

1)不均匀光照条件下太阳能电池串联电路出现多峰的充要条件取决于相邻光照强度的比值和太阳能电池板本身的特性.提出的充要条件可为光伏电站更换已损坏电池板提供理论指导;

2)提出了太阳能电池串联电路峰值点判断方法,并建立了局部峰值点功率大小的动态分界系数,依据该分界系数可迅速确定全局最大功率峰值点所在区间及其上下边界;

3)在最大功率区间内运用电导增量法可迅速追踪到全局最大功率点.全局最大功率区间边界实时更新,保证系统在环境变化时运行在该区间内,具有良好的鲁棒性和自适应性;

4)提出了一种基于太阳能电池运行状态参量的辐照度计算方法.通过实验测试,验证了所提方法的有效性.为本文的最大功率跟踪策略提供简便的参量获取方法.并未为它已提出的基于环境参量的最大功率算法提供数据支持;

5)本文运用的电导增量控制可更换为扰动观测法、变步长电导增量等传统控制方法,具有良好的可移植性.

参考文献

- [1] DE BRITO M A G, GALOTTO L, *et al.* Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(3): 1156-1167.
- [2] JIAN Xian-zhong, WEI Kai, GUO Qiang. Artificial bee swarm algorithm in the application of photovoltaic cell five-parameter double-diode model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **60**(3): 1156-1167.
简献忠, 魏凯, 郭强. 蜂群算法在光伏电池双二极管五参量模型中的应用[J]. 光子学报, 2013, **44**(1): 0125001.
- [3] LIAO Zhi-fan, QI Xin-mei, ZHENG Shou-sen, *et al.* Stability analysis of photovoltaic generation system under rapid change of light intensity[J]. *Power System Technology*, 2011, **35**(7): 60-65.
廖志帆, 祁新梅, 郑寿森, 等. 光照强度快速变化时光伏系统稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, **35**(7): 60-65.
- [4] WANG Yun-ping, RUAN Xin-bo, LI Ying. A rapid tracking method of maximum power point for solar units in series under uneven solar irradiance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(9): 4870-4878.
王云平, 阮新波, 李颖. 不均匀光照光伏单元串联电路快速 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, **35**(9): 4870-4878.
- [5] WANG Yun-ping, LI Ying, RUAN Xin-bo. Maximum power point tracking algorithm for photovoltaic array under partial shading based on current property[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, **31**(14): 201-210.
王云平, 李颖, 阮新波. 基于局部阴影下光伏阵列电流特性的最大功率点跟踪算法[J]. 电工技术学报, 2016, **31**(14): 201-210.
- [6] LIU Bang-yin. Energy conversion and control technique investigation for building integrated photovoltaic system[D]. Wu Han: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
刘邦银. 建筑集成光伏系统的能量变换与控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [7] RENAUDINEAU H, DONATANTONIO F, *et al.* A pso-based global mppt technique for distributed pv power generation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**(2): 1047-1057.
- [8] SARVI M, AHMADI S, ABDI S. A PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under environmental and partially shaded conditions[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2015, **23**: 201-204.
- [9] MIYATAKE M, INADA T, HIRATSUKA I, *et al.* Control characteristics of a Fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded[C]. The 4th IPEMC. Riga, Latvia; IEEE, 2004: 816-821.
- [10] RAMAPRABHA R, MATHUR B, RAVI A, *et al.* Modified Fibonacci search based MPPT scheme for SPVA under partial shaded conditions[C]. 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. Goa, India; IEEE, 2010: 379-384.
- [11] KOBAYASHI K. A study on a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions[J]. *Electrical Engineering in Japan (S0424-7760)*, 2003, **4**: 2612-2617.
- [12] KOBAYASHI K, TAKANO I, SAWADA Y. A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions[J]. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 2006, **90**: 2975-2988.
- [13] NIE Xiao-hua, LAI Jia-jun. A survey on tracking and control approaches for global maximum power point of

- photovoltaic arrays in partially shaded environment[J]. *Power System Technology*, 2014, **38**(12): 3279-3285.
- 聂晓华, 赖家俊. 局部阴影下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 电网技术, 2014, **38**(12): 3279-3285.
- [14] MUTOH N, OHNOM, INOUE T. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems[J]. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2006, **53**: 1055-1065.
- [15] SU Jian-hui, YU Shi-jie, ZHAO Wei. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. *Acta Energiæ Sola Ris 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.
- [16] XIONG Lian-song, LIU Xiao-kang, ZHUO Fang. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters[J]. *Power System Technology*, 2014, **38**(5): 1234-1241.
- 熊连松, 刘小康, 卓放. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参量的全局优化设计方法[J]. 电网技术, 2014, **38**(5): 1234-1241.
- [17] JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wen-hua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. *Power System Technology*, 2010, **34**(11): 199-202.
- 焦阳, 宋强, 刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术, 2010, **34**(11): 199-202.
- [18] HAJIGHORBANI S, RADZI M A M, KADIR M Z A A, et al. Implementing a novel hybrid maximum power point tracking technique in DSP via simulink/MATLAB under partially shaded conditions[J]. *Energies*, 2016, **9**: 85.
- [19] DESOTOW, KLEIN SA. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. M. S. thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 2004.

附录 1

已知: $T_{ref}=25, S_{ref}=1\ 000, a=0.002\ 5, b=0.5, c=0.002\ 88, K=0.02, A$ 是大于 0 的常量, S 的范围为 $[0, 1000]$, $KS+T_{air}$ 的范围为 $[0, 70]$.

证明 $df(S)/dS > 0$.

证明:

$$f(S) = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] \left\{ 1 - \exp \left[A \left(\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) - 1} \right) \right] + \exp(-A) \right\} - I$$

$$\frac{df(S)}{dS} = \left\{ I_{sc} \frac{1}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] + \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} Ka \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[A \left(\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) - 1} \right) \right] + \exp(-A) \right\} + I_{sc} \frac{bS}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] \left\{ - \exp \left[A \left(\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) - 1} \right) \right] \right\} \cdot \frac{-VA}{V_{oc} \left\{ [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) \right\}^2} \left\{ -cK \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) + [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \frac{b/S_{ref}}{e + bS/S_{ref} - b} \right\}$$

设

$$N(S) = \left\{ I_{sc} \frac{1}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] + \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} Ka \right\} \left\{ 1 - \exp \left[A \left(\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) - 1} \right) \right] + \exp(-A) \right\}$$

$$D(S) = I_{sc} \frac{bS}{S_{ref}} [1 + a(KS + T_{air}) - aT_{ref}] \left\{ - \exp \left[A \left(\frac{V}{V_{oc} [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) - 1} \right) \right] \right\} \cdot \frac{-VA}{V_{oc} \left\{ [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) \right\}^2}$$

$$M(S) = -cK \ln \left(e + \frac{bS}{S_{ref}} - b \right) + [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \cdot \frac{b/S_{ref}}{e + bS/S_{ref} - b}$$

$$\text{则: } \frac{df(S)}{dS} = N(S) + D(S) \cdot M(S)$$

由于

$$M(S) > -cK + [1 - c(KS + T_{air}) + cT_{ref}] \frac{b/S_{ref}}{e + bS/S_{ref} - b} > -cK + [1 - c \cdot 70 + c25] \cdot \frac{b/1000}{e} =$$

$$-0.0000576 + 0.0001601 = 0.0001025 > 0$$

$$D(S) > 0$$

$$\text{故 } D(S) \cdot M(S) > 0$$

$$\text{又 } N(S) > 0$$

$$\text{则: } \frac{df(S)}{dS} = N(S) + D(S) \cdot M(S) > 0$$

故 $df(S)/dS$ 在定义域内恒大于 0.