

不均匀光照情况下太阳能最大功率追踪算法

严力兼, 徐 迪, 葛爱明

(复旦大学 电光源研究所, 上海 200433)

摘 要: 设计了一种针对多峰值的最大功率追踪算法。光伏板在受到不均匀光照的情况下, 其功率-电流特性曲线会出现多峰值。通过大量光伏电池的数据模拟, 发现光伏板 P-I 曲线具有“峰值高度以全局峰值为中心, 向两侧不断递减”的重要规律, 并且统计研究了 P-I 曲线上左侧坡和右侧坡的斜率、相邻峰值间隔等多种数据, 以此作为算法设计的依据。设计的算法通过对光伏电池的输出曲线进行部分扫描来获得全局峰值的位置, 其中运用了“区域扫描法”来增强扫描的精度和速度。另外对两种简单、快速的变步长扰动观察法进行了比较, 确定了其适用范围并加以灵活运用。所设计的算法快速、有效, 避免了峰值的遗漏, 而且具有“峰值越多, 追踪越快”的特点。

关键词: 最大功率追踪; 不均匀光照; 光伏电池

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2173-08

Novel maximum power point tracking method under non-uniform insolation conditions

Yan Liyang, Xu Di, Ge Aiming

(Institute for Electric Light Sources, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: This research aims to design a maximum power point tracking algorithm which tracks the global maximum among multiple local maximums. Multiple local maxima can be exhibited on the power-current characteristic curve under non-uniform insolation conditions. The research was based on a significant number of data simulations of photovoltaic cell and the discovery that PV panels' P-I curves obeyed the following rule. The values of local maxima monotonically decreased with respect to the distance from the global maximum. Moreover, statistical studies had been conducted on the slopes of the curves, distances between two local maxima, etc. Based on these observations and discoveries, the algorithm was thus designed. The algorithm obtained the location of the global maximum of a P-I curve by partially scanning the curve, during which "Regional Scanning Mechanism" was adopted to enhance the precision and efficiency of the algorithm. In addition, another two simple and fast P&O algorithms

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-01-25

基金项目: 复旦大学本科生学术研究资助计划(123204)

作者简介: 严力兼(1991-), 男, 本科生, 主要从事太阳能最大功率追踪算法研究。Email: leon_yan@aliyun.com

导师简介: 葛爱明(1966-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电系统的研究工作。Email: amge@fudan.edu.cn

were compared, their appropriate uses were discovered and be applies smoothly in real practices. The design of this algorithm also ensures reasonable time complexity, efficiency and guarantees that no maxima will be ignored. It is also equipped with an interesting property such that the more the maxima a P-I curve possesses, the faster the algorithm is correspondingly.

Key words: maximum power point tracking; non-uniform insolation; photovoltaic cell

0 引言

随着化石燃料资源的减少和环境污染的加重,太阳能发电越来越具有研究价值。光伏电池作为太阳能的接收器,其上接收到的光照决定了采集到的能量。根据光伏电池的伏安特性,在其受到均匀光照时,其输出端的 P-I 曲线上存在一个峰值。这个峰值称为最大功率点 (MPP)。输出曲线的形状受温度和照度影响,最大功率点会产生漂移,最大功率追踪 (MPPT) 的目的是使光伏电池输出端的工作点始终保持在最大功率点上,无论环境怎样变化都能获得最大的能量输出。

文中实现最大功率追踪的电路器件是 DC/DC 变换器。DSP 对光伏电池输出端的电参数进行实时采样,并通过算法计算出合适的开关元件占空比 D,从而调节光伏电池输出端的电压和电流,实现最大功率追踪。

扰动观察(P&O)法是最简单的最大功率追踪算法。首先对光伏板的电压施加一个扰动 ΔV ,若由此产生的功率变化 ΔP 为正,说明扰动的方向正确,能使工作点向最大功率点移动,并继续施加相同的扰动。若 ΔP 为负,则需改变扰动方向^[1]。

在光伏板被部分遮挡,受到不均匀光照时,P-I 曲线可能会出现多峰值。这时 P&O 法可能会失效,曲线上只有全局峰值(最高的峰值)才是最大功率点,P&O 法可能使工作点停留在局部峰值上,造成能量损失^[2-4]。

因此,算法必须要在多峰值曲线上找到全局峰值。参考文献[5]提出了将整个 P-I 曲线都进行扫描的方法。此方法十分精确,但耗时太长。笔者认为,查找全局峰值时,按一定规律只扫描曲线的部分是提高效率的关键。

参考文献[6-7]曾提出仅扫描曲线峰值的算法。具体方法是:让工作点以一个较大的步长 Δa 在曲线

上跨越,确定一些点,然后用 P&O 法找到这些点附近的峰值。这种方法在某些照度情况下有不错的效果,但步长 Δa 值的确定是经验性的,工作点可能一下跨越多个峰值,造成遗漏。这个缺陷是由光伏板输出曲线峰值间隔宽度不一造成的。

参考文献[8]曾提出了利用等效阻抗确定最大峰值的方法。如公式(1), V_{oc} 、 I_{sc} 是光伏电池的开路电压和短路电流。 I_{pv} 是光伏板受均匀光照时的输出电流,当不均匀光照出现时,算法通过公式(1)确定全局峰值的大概电压值。

$$V = V_{oc} / I_{sc} I_{pv} \quad (1)$$

这种方法在只有二或三个峰值时很准确,但峰值较多时可能会出错。

此外,开路电压法和短路电流法也被用来追踪全局峰值,如参考文献[9],但此方法需要额外电路,并且频繁地实施开路、短路会造成能量损失。

1 光伏电池特性的分析

使用 MATLAB SIMULINK 模型对光伏电池进行建模。先使用如公式(2)的双二极管模型(Chih-Tanget al, 1957)建立单个光伏电池的模型,如图 1(a)所示。其中, I_0 、 V_0 、 P_0 是光伏电池的输出电流、输出电压、输出功率。 $G(W/m^2)$ 是光伏电池接受到的照度。再建立如图 1(b)所示的光伏阵列,通过分别调节 5 块光伏板接受到的光照 G_1 - G_5 ,分析整个光伏阵列的输出功率、输出电流和输出电压,从而得到特定光照条件下的 P-I 或 P-V 曲线。再对多个照度下的输出曲线进行统计分析。

$$I = I_{pv-stc} G / G_{stc} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_1 V_{T1}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_2 V_{T2}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (2)$$

光伏板型号:Kyocera KG200GT,最大功率点电压: $U_{mpp}=26.3 V$,最大功率点电流: $I_{mpp}=7.61 A$,开路

电压: $U_{oc}=32.9\text{ V}$, 短路电流 $I_{sc}=8.21\text{ A}$, 二极管反向饱和电流: $I_{01}=I_{02}=4.218\text{ e-}10\text{ A}$, 热电势: $V_T=1.387\text{ V}$, 标准照度: $G_{sc}=1000\text{ W/m}^2$, 标准照度光下的电流: $I_{pv,sc}=8.21\text{ [10]}$ 。

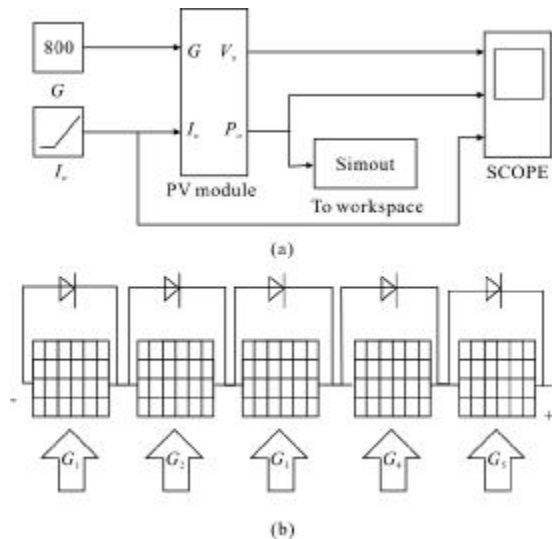


图 1 单个光伏电池的 SIMULINK 模型和光伏阵列模型
Fig.1 Simulink model of PV module and PV panel model

在图 1(b)中的模型中,每个光伏电池预设了 9 种照度情况,分别是 100 W/m^2 、 200 W/m^2 、 300 W/m^2 、 400 W/m^2 、 500 W/m^2 、 600 W/m^2 、 700 W/m^2 、 800 W/m^2 、 900 W/m^2 。因此,5 块光伏电池组成的光伏阵列总共有 $9^5=590\ 49$ 种照度情况。文中针对这些情况进行了模拟。

需要注意的是,这 590 49 种照度情况在现实中并非严格等几率出现,但这并不会影响结论,原因如下:

(1) 模拟的照度环境中,所有光伏电池照度一致的情况只有 9 种,也就是说光伏阵列受到均匀光照的概率是 $9/590\ 49$ 。而现实中光伏阵列受到均匀光照的几率远大于这个值。所以,文中模型主要反映了不均匀光照情况下的 P-I 特性。

(2) 不均匀光照情况的形成受地区、季节、周边建筑等多种因素影响。虽然,每个地点和时间都有各自独特的照度分布,但大体上,所有不均匀照度情况出现的几率是接近的。并且,文中算法的设计定位是针对所有的现实使用条件,所以,建模时设定各种不均匀光照情况出现的几率是相同的,使得算法具有更广泛的适应性。

对图 1(b)的光伏阵列模拟了 59049 种照度情况,发现了多峰值 P-I 曲线的一个重要规律:“通常情况下,多峰值的高度以全局峰值为中心,向两侧不断递减”,即:全局峰值两侧的局部峰值在横坐标上离全局峰值距离越远,其高度就越低。在全部样本中,这种现象出现的概率是 95.51%。并且,如前所述,现实中均匀光照出现的概率要高于文中模型模拟的情况。所以,当发现一个峰值左右两侧的其他峰值的高度都比它小时,基本可以确定这就是全局峰值。

所有情况中,P-I 曲线出现 3 个峰值的概率是 21.54%,出现 4 个峰值的概率为 50.70%,出现 5 个峰值的概率是 25.61%。出现 3~5 个峰的情况占了 97.85%。

全局峰值有 61.93% 的概率出现在 $0.3I_{MAX} \sim 0.6I_{MAX}$ 的区域内,越往两侧全局峰值出现概率越低。相邻两个峰值间的横坐标间隔宽度的离散程度比较大,概率前 5 的峰值间隔宽度为: $0.5\sim 1\text{ A}$ (46.65%), $1.5\sim 2\text{ A}$ (8.98%), $2\sim 2.5\text{ A}$ (14.85%), $1\sim 1.5\text{ A}$ (8.43%), $3\sim 3.5\text{ A}$ (7.14%)。

P-I 曲线右侧坡总体上比左侧坡陡峭,如图 2 所示(同一侧坡总概率为 100%),左侧坡坡度分布较均匀,且最大坡度不超过 70° 。而右侧坡坡度在 80° 以上的概率是 70%。

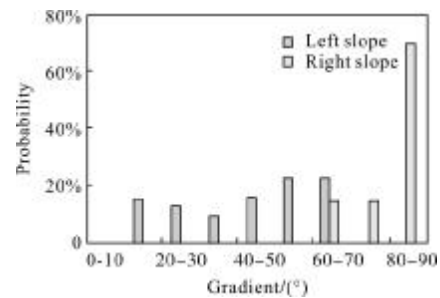


图 2 P-I 曲线左侧坡和右侧坡的坡度分布
Fig.2 Gradient distribution of left and right slope of P-I curve

通过以上数据,可以发现光伏板 P-I 曲线有以下特点:

- (1) 曲线峰值高度基本呈现“峰值高度以全局峰值为中心,向两侧不断递减”的规律。
- (2) 不均匀照射带来了普遍的多峰值现象。
- (3) 曲线总体上有右侧坡比左侧坡陡峭的特征。

曲线相邻峰值的横向间隔距离离散程度较大。

其中,从特点(1)可以看到,全局峰值位置的判断可参考其两侧的峰值高度;特点(3)说明了 P&O 法工作时,工作点在左、右侧坡上会分别显示出不同的运动特性;从特点(4)注意到,“工作点以固定的大步长在各峰值间移动”的方法明显存在问题,原因是相邻峰值间隔距离的随机性太大。

2 最大功率跟踪算法

根据“峰值高度以全局峰值为中心,向两侧不断递减”的规律,只扫描曲线的部分以确定全局峰值的大概位置,然后通过 P&O 法将工作点精确收敛到峰值。

算法在细节上具有以下特点:

(1) 只需扫描部分的 P-I 曲线。而且峰值越多,追踪全局峰值的速度越快。这有赖于 P-I 曲线局部峰值高度向两侧不断递减的规律。

(2) 在保证精度的情况下,粗略扫描 P-I 曲线以获得全局峰值,要求在工作点离峰值较远时能大幅逼近峰值,求得速度。文中选用步长随斜率变化的 P&O 法来完成这个工作。

(3) 当确定了全局峰值的大概位置后,工作点离峰值的距离已很小。此时采用步长逐渐减半的 P&O 法进行精确收敛,以求得更高的精度。

(4) 从以上研究发现,P-I 曲线的右侧坡通常比左侧坡陡峭,这导致工作点在曲线上右移要比左移有更高的效率。因此,提出了可以避免工作点左移的“区域扫描法”。

(5) 为了避免峰值的遗漏,限制采样步长,提出了右侧坡步长优化的方法。

2.1 曲线扫描

对曲线的扫描使用了两种变步长的 P&O 法。一种是“步长按斜率变化的 P&O 法”,如公式(3):

$$a(k)=M \frac{\Delta P}{a(k-1)} \quad (3)$$

式中: $a(k)$ 为第 k 步的步长; M 为可以调节的参数; $\Delta P/[a(k-1)]$ 为 P-I 曲线上某点的斜率^[11]。

另有一种方法是“步长逐渐减半的 P&O 法”:工作点向峰值移动,当其越过峰值时,步长减为原先的一半,并开始反向移动。此过程循环进行,直到步

长减小到预定的下限为止^[12]。

图 3 显示了以上两种变步长 P&O 法在峰值附近的工作轨迹,工作点运动轨迹按图中数字所示。两者工作点的初始位置、初始步长和步长下限设定为一致。

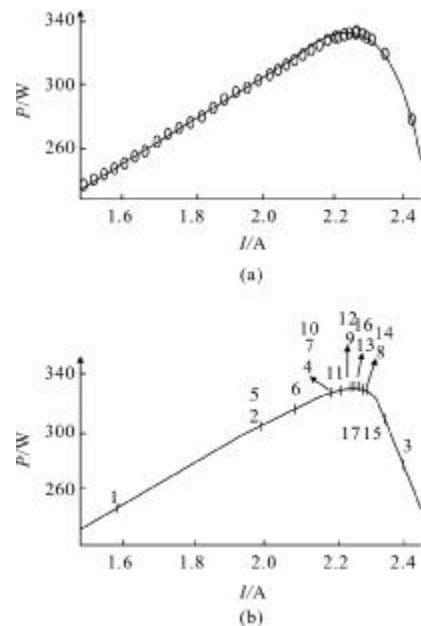


图 3 两种变步长“P&O”法在峰值附近的工作轨迹

Fig.3 Trace of two kinds step varying P&O methods nearby the peak

经比较发现,“步长按斜率变化的 P&O 法”用了 31 步(见图 3(a)),“步长逐渐减半的 P&O 法”用了 17 步(见图 3(b))。显然,在峰值附近的范围内,后者的效率更高。但在离峰值较远的区域,后者速度慢,原因是其步长在工作点越过峰值前是固定不变的,不能起到大幅逼近峰值的作用。所以,文中将两种方法有机结合,先通过“步长按斜率变化的 P&O 法”使工作点在曲线上大幅逼近峰值,再通过“步长逐渐减半的 P&O 法”精确收敛。这样即提高了追踪速度,同时又不降低最终收敛的精度。

2.2 区域扫描法

前一部分研究发现,P-I 曲线右侧坡比左侧坡陡峭,进一步发现,工作点右移的效率明显要高于左移的效率。

P-I 曲线右侧坡的斜率 k 更大,如公式(4),要维持相邻采样点的精度 ΔP 不变,就要减小采样步长 ΔI ,增加采样点数,采样频率是恒定的,扫描的总用时就会增加。

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (4)$$

因此,为了避免工作点左移,提出了“区域扫描法”。即先在曲线上确定一个小区域,在区域内工作点始终右移。完成区域扫描后,区域左移,再次扫描。即通过扫描区域的左移代替工作点的左移。

2.3 右侧坡步长优化

工作点在 P-I 曲线上右移的过程中还存在一个问题。当工作点进入曲线的右侧坡时,由于其斜率很大,根据公式(3),步长会随着斜率猛增,可能一次跨越多个峰值,造成遗漏。针对这种情况,尝试在公式(3)右侧乘以一个小于 1 的优化常数 r,见公式(5),这

样可以限制工作点在下坡时的步长。

$$a(k) = M \frac{\Delta P}{a(k-1)} r \quad (5)$$

2.4 主程序流程

文中提出的算法流程图如图 4 所示。当照度情况稳定时,算法循环执行 P&O 法来维持最大功率点。当相邻工作周期(0.01 s)的输出功率之差大于额定值 ΔP_0 时,主程序检测到照度情况出现突变,开始调用全局峰值追踪子程序,重新找到全局峰值并返回主程序。

有研究表明,照度缓慢持续变化的速度很小 ($\Delta G \approx 0.027 \text{ kW/m}^2$)^[13],因此, ΔP_0 的值能精确调整。

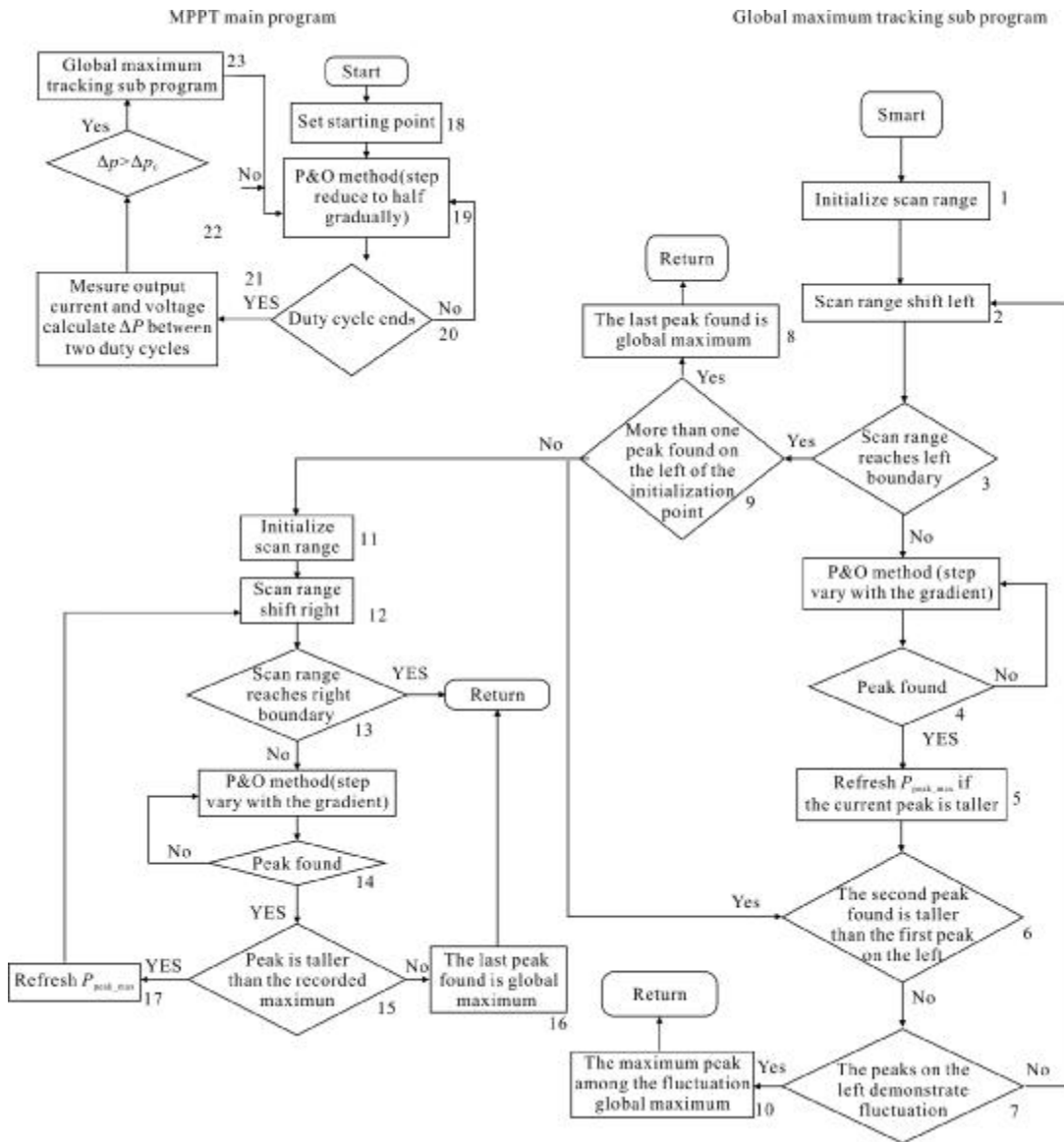


图 4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of the proposed algorithm

2.5 全局峰值追踪子程序流程

照度情况突变后,全局峰值追踪子程序被调用。工作点可能落在如图 5 中的点 E、F、G、H 4 个典型位置上,接下来将以这 4 个位置为例,说明全局峰值追踪子程序的工作方式。

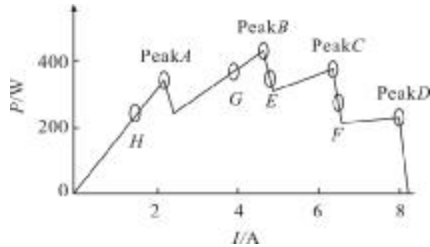


图 5 不同起始工作点的示意图

Fig.5 Examples of different starting point

若从 E 点起始,扫描区域先往左移动,使用区域扫描法,依次扫描得到峰值 B、A。A 峰低于 B 峰,故判断框 6 的条件为真,扫描区域回到初始位置并向右移动,扫描得到较矮的峰值 C,故判断框 15 的条件为真,返回 B 峰是全局峰值。

若从 F 点开始,扫描区域先往左移动,使用区域扫描法,先后扫描得到 C、B、A 3 个峰值,发现峰值高度先增后减,故判断框 7 的条件为真,返回 B 峰是全局峰值。

若从 G 或 H 点开始,扫描区域不断左移直到抵达下限,判断框 9 的条件为假,扫描区域回到初始位置并往右移动。

3 算法模拟结果

算法使用 SIMULINK 模型模拟,在多种照度情况下测试。现以照度情况 1(2 个峰值)、照度情况 2(10 个峰值)为例做一分析,并将提出的算法和“完全扫描法”在相同采样频率下进行对比,完全扫描法的参数设定参考了参考文献[5]。图 6 中,(a)为光伏板 P-I 曲线,符号 o 代表采样点,虚线代表了区域扫描法的区域分割方式,其中的数字代表了区域扫描的顺序。(b)为文中算法的 P-T 响应。(c)为完全扫描法的 P-T 响应。

在照度情况 2 下,对比图 7(b)、7(c)的 P-T 响应,可以发现所提出的算法比完全扫描法能更快地锁定全局峰值。在照度情况 1 下,对比图 6(b)、6(c)也能发现相同的结论。图 6(a)中光伏板 P-T 曲线峰值较少,没有显示出“峰值高度以全局峰值为中心,往两侧递减”的特征,导致几乎整条曲线都被扫描,追踪步数较多。图 7(a)中光伏板 P-T 曲线峰值较多,在小范围内出现峰值高度先增后减的情况,故能

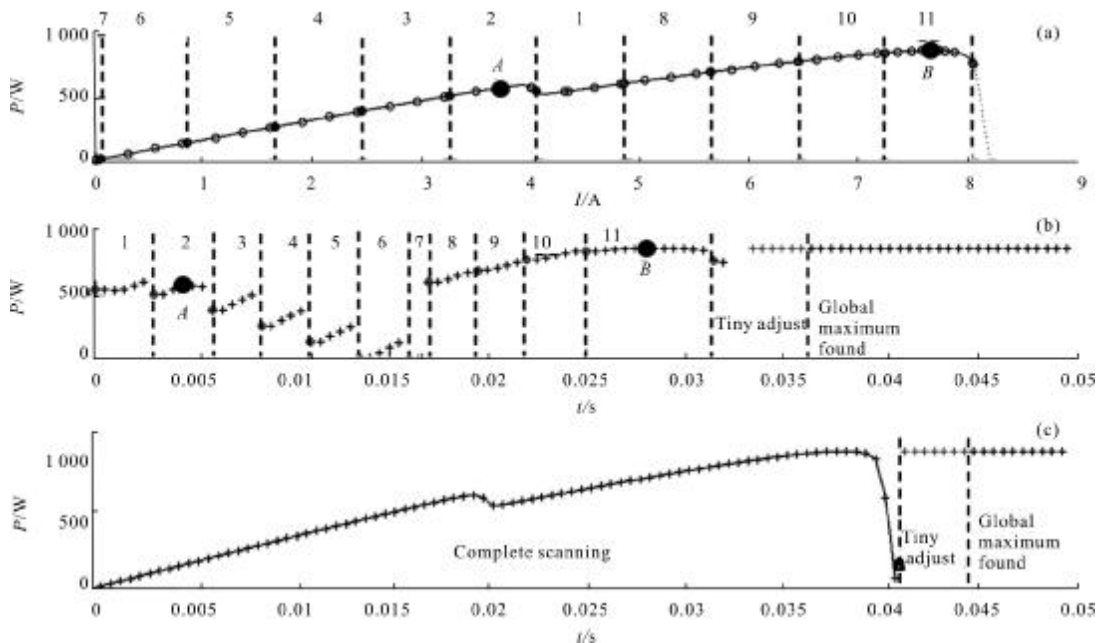


图 6 照度情况 1 下的模拟结果

Fig.6 Simulation result under non-uniform insolation condition 1

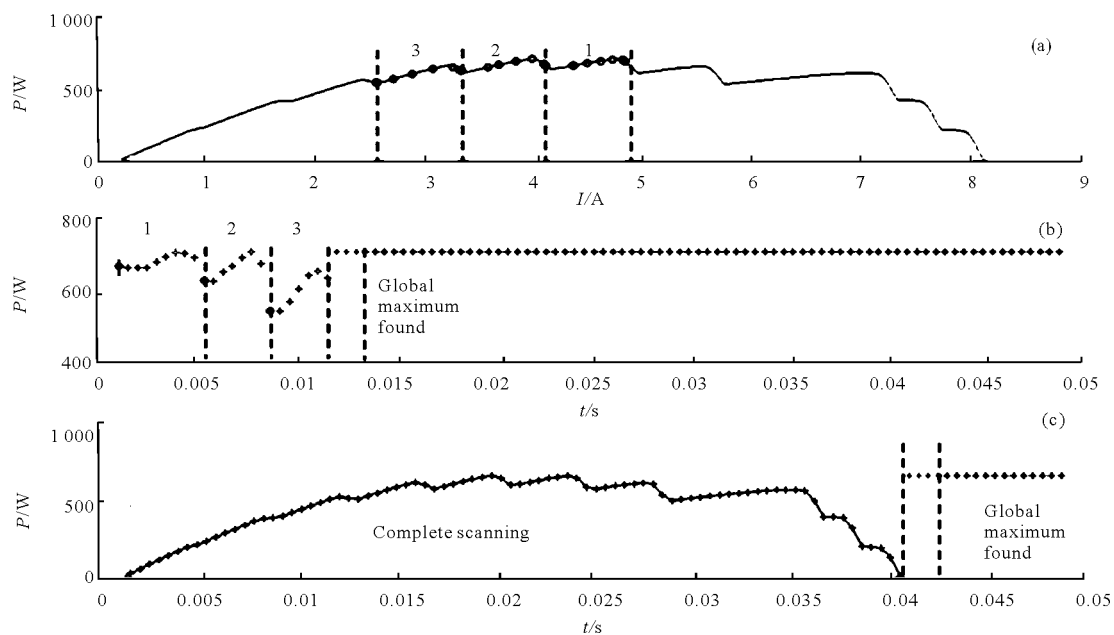


图 7 照度情况 2 下的模拟结果

Fig.7 Simulation result under non-uniform insolation condition 2

更快得到全局峰值,追踪步数较少。

从以上分析可见,本研究提出的算法在速度上高于完全扫描法,并且不损失精度。主要有以下原因:

(1) 算法利用了“峰值高度以全局峰值为中心,向两侧不断递减”的规律,只需扫描部分 $P-I$ 曲线,能在不遗漏峰值的前提下大幅减少采样点数。

(2) 采用了“区域扫描法”,区域不断移动,在区域内工作点始终右移。上文已述工作点左移比右移需要更多的采样点数,对速度和精度都不利。在达到预定精度的前提下,区域扫描法的采样点数比其他方法更少。

(3) 将两种 P&O 法有机地结合。先通过“步长按斜率变化的 P&O 法”让工作点大幅逼近峰值,再通过“步长逐渐减半的 P&O 法”精确收敛。在保证最终精度的前提下减少了采样点数。

(4) 对“步长按斜率变化的 P&O 法”,采用了“右侧坡步长优化”,如公式(5),防止 $P-I$ 曲线下坡斜率很大时,产生过大采样步长,避免了因跨越峰值而产生遗漏。

文中算法的一大特点是:峰值越多,追踪越快。如图 7(a)和 8(a)的追踪轨迹所示,峰值较少时,曲线的很大范围被扫描;峰值较多时,扫描的只是峰值附

近的局部范围。这一特性也是文中算法中的一大优势。

文中算法和完全扫描法相比,速度快,同时可靠性和精度并没有损失。通过“步长逐渐减半的 P&O 法”进行最终收敛可保证工作点精确落在全局峰值附近的可接受的领域内。针对光伏阵列的五万多种照度情况进行了详细的统计和分析,得出了关于曲线特征的可靠结论,确保了算法在只扫描部分曲线的情况下不出差错。

4 结论

设计了一种针对多峰值的最大功率追踪算法。首先通过 MATLAB 模拟了大量光伏板 $P-I$ 曲线,发现 $P-I$ 曲线基本满足“峰值高度以全局峰值为中心,向两侧不断递减”的重要特性。这一特性在判断全局峰值中,大大缩短了追踪时间,并且使算法具有“峰值越多,追踪越快”的特点。

统计分析发现, $P-I$ 曲线的右侧坡比左侧坡陡峭,这会导致工作点左移时需要更高的分辨率来保证精度。因此,文中提出了“区域扫描法”来避免工作点的左移,在保证精度的前提下,提高了扫描速度。同时,对右侧坡采样步长的计算进行了优化,防止 $P-I$ 曲线右侧坡斜率很大时,采样步长突增,导致峰

值的遗漏。

还比较了“步长按斜率变化的 P&O 法”和“步长不断减半的 P&O 法”，发现前者适用于工作点离峰值较远时的扫描，后者适用于工作点离峰值较近时的精细收敛，对两者进行了有机的结合，减少了追踪步数，有效提高了速度。

模拟数据表明，设计的算法快速、有效、不会遗漏峰值，而且具有“峰值越多，追踪越快”的特点。

参考文献：

- [1] ESRAM T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439-449.
- [2] Faranda R, Leva S, Maugeri V. MPPT techniques for PV systems: energetic and cost comparison[C]// IEEE Power and Energy Soc Gen Meet - Convers Del Electr Energy 21st Century, 2008: 1-6.
- [3] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions [C]//Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 1995, 142(1): 59-64.
- [4] Bruendlinger R, Bletterie B, Milde M, et al. Maximum power point tracking performance under partially shaded PV array conditions[C]//Proc 21st EUPVSEC, 2006: 2157-2160.
- [5] Renaudineau H, Houari A, Martin J P, et al. A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses [J]. Solar Energy, 2011, 85(11): 2580-2588.
- [6] Kazmi S, Goto H, Ichinokura O, et al. An improved and very efficient MPPT controller for PV systems subjected to rapidly varying atmospheric conditions and partial shading[C]//Power Engineering Conference in Australasian Universities, 2009: 1-6.
- [7] Patel H, Agarwal V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1689-1698.
- [8] Ji Y H, Jung D Y, Kim J G. A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1001-1009.
- [9] 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 Materials & Solar Cells, 2006, 90(18): 2975-2988.
- [10] Ishaque K, Salam Z. A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model[J]. Solar Energy, 2011, 85(9): 2217-2227.
- [11] Xiao W, Dunford W G. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems [C]//Power Electronics Specialists Conference, 2004 PESC, IEEE 35th Annual, 2004, 3: 1957-1963.
- [12] Al-Amoudi A, Zhang L. Optimal control of a grid-connected pv system for maximum power point tracking and unity power factor [C]//Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998 Seventh International Conference on, 1998: 80-85.
- [13] Bletterie B, Bruendlinger R, Spielauer S. Quantifying dynamic MPPT performance under realistic conditions - First test results: The way forward[C]//21st Eur Photovoltaic Solar Energy Conf, Dresden, 2006: 2347-2351.