

基于等功率曲线法的多峰值MPPT算法研究

王建山, 杨 奕, 杨元培, 张桂红, 胡海涛

(南通大学电气工程学院, 南通 226019)

摘 要: 为实现光伏阵列最大功率跟踪控制技术的优化,首先对不同温度、光照、遮挡模式下的光伏阵列进行建模分析,由输出特性曲线,深入分析遮挡模式对全局最大功率点的影响。提出一种基于等功率曲线法最大功率跟踪方法,定性解决了陷入局部极值而使得跟踪失败的问题,可提高光伏阵列的输出功率,为多峰值下最大功率点跟踪技术的研究提供了一种新思路。

关键词: 太阳能电池; 最大功率点跟踪; 扰动观察法; 等功率; 曲线扫描法

中图分类号: TM615

文献标识码: A

0 引 言

光伏系统在实际工作中,复杂的环境因素产生的局部阴影通常使得光伏阵列的电流-电压($I-U$)特性曲线变成阶梯状,功率-电压($P-U$)特性曲线呈现出多峰值^[1,2]。而传统的最大功率点跟踪(MPPT)方法^[3-5]中,如爬山法、电导增量法、扰动观察法等,通常都是对单峰值曲线中的最大功率点进行跟踪^[6-9],针对多峰值曲线,由于无法精确地跟踪到全局最大功率点(GMPP),使系统陷入局部极值而导致跟踪失败,最终导致光伏阵列的输出功率显著降低。如文献[10]提出的粒子群优化算法本质上说是一种全局扫描法,但对于粒子群以及合理的步长选择却不易实现,如粒子群范围选择的太小或扫描步长太大,会遗漏全局最大功率点,反之,若粒子群范围选择太大或步长太小则使得整个系统运行效率降低。文献[11]提出的一种粒子群优化(PSO)方法虽然收敛速度很快而且能准确跟踪到全局最大功率点,但在实际运行中会出现反复震荡的现象,为解决该问题,通常需要增加特定的硬件系统来实现对功率的稳定输出,显然,增大了成本以及系统的繁杂性。文献[12]提出的当阴影发生变化时,迅速增大光伏阵列参考电压的给定值来重新实现对 GMPP

的跟踪,该方法与传统最大功率点跟踪法相比有较好改进。对于多峰值 MPPT 算法的研究一直是近年来的热点问题,已经涌现出很多研究成果来实现对多峰值最大功率点的跟踪^[12,13],本文将从太阳能电池的数学模型进行系统搭建,对光伏阵列不同温度、不同光照、不同遮挡模式下的输出特性进行分析,深入研究遮挡模式与最大功率点的定性关系,进而确定局部峰值的个数和具体分布,依据特性曲线提出一种全局最大功率跟踪算法^[14,15]等功率曲线扫描法,通过理论分析、数学建模、最终在 Matlab 软件中进行仿真,验证本文算法在不同阴影模式下的优越性及可行性。

1 光伏阵列建模

1.1 数学模型

如图 1 所示为太阳能电池的等效电路,根据电路理论得到太阳能电池电流 I 与电压 U 的关系方程:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(U + IR_s)q}{nkTN_s} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

式中, I_0 ——二极管的反向饱和电流; R_s 等效后的串联电阻; R_p ——等效后的并联电阻; I_{ph} ——等效光电流; q ——电荷常量,值为 $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$;

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51507087); 江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划(KYLX16_0972; YKC16002); 江苏省自然科学基金(BK 20140430)

通信作者: 杨 奕(1963—), 女, 硕士、教授, 主要从事新能源及其控制技术方面的研究。yang.y@ntu.edu.cn

n ——二极管的理想因子, 满足 ($1 \leq n \leq 2$);
 h_γ ——等效电流源(图 1); T ——太阳电池的表面温度; k ——玻尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K;
 N_s ——串联的太阳电池数量。

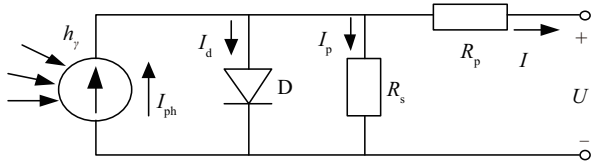


图 1 太阳电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cells

1.1.1 开路状态

对于开路状态, 在标准的测试条件下, 此时的二极管电压恰好满足等式 $U_d = U_{ocn}$, 此时的开路电压也仅与太阳电池本身的温度有关, 从而得到任意温度情况下的开路电压 U_{oc} :

$$U_{oc} = K_V(T - T_{ref}) + U_{ocn} \quad (2)$$

1.1.2 短路状态

对于短路状态, 为了得到任意光照强度下的光电流 I_{ph} , 需将流经等效电阻的电流 I_p 和二极管的电流 I_d 略去, 此时 I_{ph} 为:

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} [I_{scn} - K_1(T_{ref} - T)] \quad (3)$$

式中, S 、 S_{ref} ——实际、参考辐照度; K_1 ——温度比例系数; T_{ref} ——参考温度, $T_{ref} = 147.86$ °C。

1.1.3 二极管理想因子及反向饱和电流

对于二极管的理想因子 n , 本文直接给出 $n = 1.4$ 。温度对反向饱和电流的影响 I_0 由(4)式给出:

$$I_0 = I_{0n} \exp \left[\frac{E_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/n} \quad (4)$$

式中, E_g ——二极管对应电子伏特, $E_g = 1.12$ eV;
 I_{0n} ——标准情况下测得二极管反向饱和电流, 由式(5)给出:

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp[qU_{ocn}/(nkT_{ref}N_s)] - 1} \quad (5)$$

式中, I_{scn} ——短路电流; U_{ocn} ——开路电压。

1.1.4 最大功率点

由式(1)可推出最大功率:

$$\begin{aligned} P_{max} &= U_m I_m \\ &= U_m \left\{ I_{ph} + I_0 \left[1 - \exp \left(\frac{U_m + I_m R_s}{nkT N_s / q} \right) \right] - \frac{U_m + I_m R_s}{R_p} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, U_m 、 I_m ——最大功率点 P_{max} (MPP) 对应的电压和电流。

由式(6)得到 R_s 与 R_p 之间的关系为:

$$\begin{aligned} R_p &= U_{mn} (I_{mn} R_s + U_{mn}) / \\ &\quad \left\{ U_{mn} I_{scn} - P_{maxn} + U_{mn} I_{0n} \left[1 - \exp \left(\frac{I_{mn} R_s + U_{mn}}{nkT_{ref} N_s / q} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)易得, 每一个 R_s 都存在一个 R_p 与之相对应, 且仅有一组电阻满足 $P_{max} = P_{maxn}$, 说明了所搭建模型的最大功率点要与实际给定的太阳电池相吻合, 而在实际工程应用中, 对于不同的太阳电池这种关系不存在, 其参数取决于制作工艺和条件。

1.1.5 模型搭建

本文采用浙江昱辉阳光(ReneSola)提供的太阳电池, 具体参数见表 1, 图 2 为阴影遮挡条件下搭建的光伏阵列仿真模型。图 3 为辐照度条件为 200、400、600、800、1000 W/m² 时的 $I-U$ 、 $P-U$ 特性曲线输出。

表 1 太阳电池参数

Table 1 Parameters of photovoltaic cells

参数	数值
开路电压 U_{oc}/V	43.3
短路电流 I_{sc}/A	4.72
最大功率 P_{max}/W	150
峰值电压 U_{max}/V	34.5
峰值电流 I_{max}/A	4.35
电池串联数 m	10
电池并联数 n	100
电流温度 I 系数/ $\% \cdot K^{-1}$	0.017
电压 U 温度系数/ $\% \cdot K^{-1}$	0.34
功率 P 温度系数/ $\% \cdot K^{-1}$	-0.45

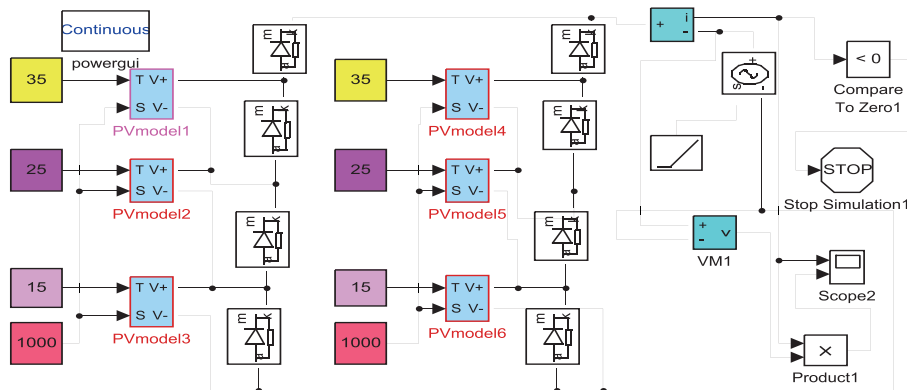


图2 阴影遮挡条件下组件串并联模型搭建

Fig. 2 Model of series and parallel connection of components under the condition of shadow occlusion

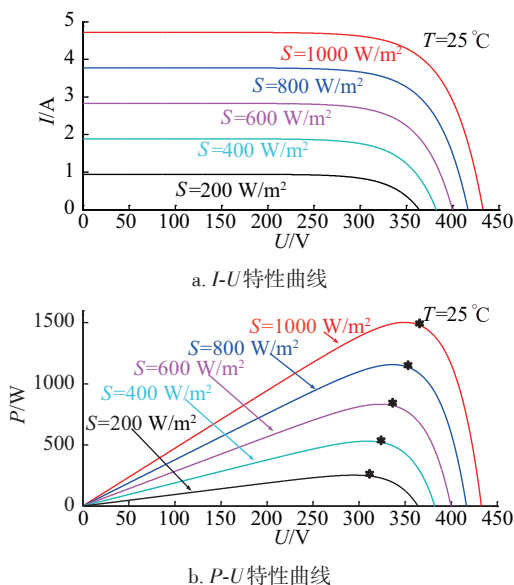


图3 不同光照下的I-U、P-U曲线

Fig. 3 I-U, P-U curves at different illumination

2 阴影条件下输出特性的分析

厂家给与的测试条件通常为标准情况下的环境因素 ($S = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$), 具体参数如表1所示。图4为光伏阵列任意一条支路的结构图, 其中 $M_1, M_2, M_3 \dots M_n$ (M 为单个太阳能电池等效元件) 串联组成一条支路, 支路上端的 D_b (阻塞二极管), 当支路输出电压过低、电流发生倒流时 D_b 起到保护组件的作用。 $D_1 \sim D_n$ (旁路二极管), 用来避免热斑效应对光伏组件的损坏。

由 $I-V$ 输出特性可得: 当任意一条串联支路中的组件受到局部阴影的影响时, 必将导致该组件的短路电流 I_{sc} 降低, 此时, 当负载较小时, 各个组件都

满足正常的工作条件, 对外输出功率, 旁路二极管没有电流通过; 但当负载较大时, 假如 $I > I_{sc1}$, 同时 $I < I_{sc2}$, $I < I_{sc3}$, \dots , $I < I_{scn}$, 则会出现 M_1 不输出功率, 反而消耗功率, 相当于一个负载, 此时, 旁路二极管 D_1 承受反压, 起到保护作用, $U_1 < 0$, $I_{d1} > 0$, $P_1 = U_1 I_1 < 0$; 当负载继续增大, 就会出现更多组件不能正常工作, 而消耗更多的功率。

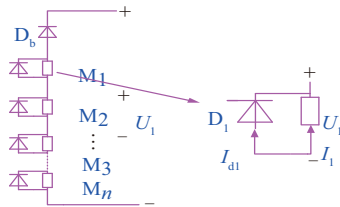


图4 光伏阵列中任意一条支路结构图

Fig. 4 Structure of any branch in photovoltaic array

本文首先对 $\{5 \times 5\}$ 的光伏阵列进行研究, 共有 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 共5条支路, 每条支路的结构如图4所示, 各组件对应的光照强度和最大功率点如表2所示

表2 支路情况为5条时光照强度及MPP

Table 2 Light intensity and MPP in 5 branches

支路	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	MPP (P/W, U/V)
L_1	1000	800	600	400	200	(968, 263)
L_2	1000	900	600	300	100	(968, 263)
L_3	100	600	400	300	100	(723, 138)
L_4	800	700	500	300	200	(534, 346)
L_5	800	500	300	200	100	(348, 52)

注: $G_1 \sim G_5$ —PV 阵列分的5个组群。

该阵列的仿真输出 $I-U$ 、 $P-U$ 特性曲线如图 5 所示,光伏组件在局部阴影条件下 $P-U$ 为多峰值, $I-U$ 为阶梯状。由功率输出曲线易得,当电流较小时,支路的输出电压很大,此时各个支路均有功率输出;当电流较大时,支路的输出电压很小,此时有些支路不输出功率,而是消耗功率。

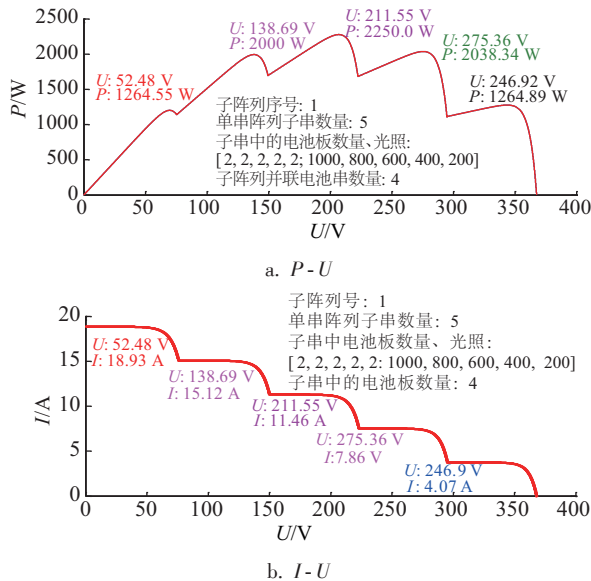


图 5 光伏阵列输出特性曲线

Fig. 5 Output characteristic curve of PV array

由于支路处于不同的阴影下,输出的 $P-U$ 特性曲线不同,对应的 MPP 也不同,虽然多条支路并联后电压相同,但却不能保证每条支路恰好同时工作在最大功率点上,传统 MPPT 算法是对整体输出进行跟踪,忽略了支路并联时造成的功率损耗。

为进一步研究局部阴影下的输出特性,本文采用的光伏阵列由 10×100 个模块串并联组成,每条串联的支路 $n=10$,并联支路 $m=100$ 。按照辐照度的不同,将 PV 阵列分为 5 个组群($G_1 \sim G_5$),从 5 个组群中分别选取一个组件进行分析,光伏阵列辐照情况: 1) 无遮挡时 $S=1000 \text{ W/m}^2$; 2) 有遮挡时 $S=600 \text{ W/m}^2$ 。表 3 为组件的参数方案表,其中 N_1 代表标准光照下的组数, N_2 代表阴影遮挡下的组数,仿真参数依然选用表 1 中的电池参数,仿真结果如图 6 所示。

针对表 3 中的参数,图 6 中的仿真曲线 a~e 分别对应于光伏阵列中的组群 $G_1 \sim G_5$,由仿真结果得出光伏组件处于不同光强下开路电压与短路电流相同。虽然光的辐照度对单个光伏模块的开路电压、短路电流没有影响,但当光伏模组中有不同数

表 3 组件序列阴影遮挡方案表

Table 3 Shadow block scheme table of component sequence

组件序列号	$N_1(1000 \text{ W/m}^2)$	$N_2(600 \text{ W/m}^2)$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
a	9	1	25
b	8	2	25
c	7	3	25
d	6	4	25
e	5	5	25

量的组件受到局部阴影影响时,会产生大小不同的电流,此时的旁路二极管 D_n 会在不同时间导通,这也就形成了 $I-V$ 曲线中的 2f 个膝行平台以及 $P-U$ 曲线中的 2 个峰值。对于单条支路串联的太阳能电池数均为 10 个,当 $N_2 < a \times n$ (a 为给定比例系数, $a=0.6$) 时,无阴影遮挡区的组件处于最大功率点;当 $N_2 = a \times n$,遮挡区与非遮挡区输出的最大功率几乎一致;当 $N_2 > a \times n$,阴影遮挡区处于最大功率点;随着阴影区域的增大,整个组件损失的功率也增大,以上分析可得:针对局部阴影条件下 MPP 的判断,首先依据遮挡模式大致确定 MPP 的位置,然后运用传统单峰值 MPPT 算法进行控制,从而解决了将功率极大值误判为全局最大值的问题。

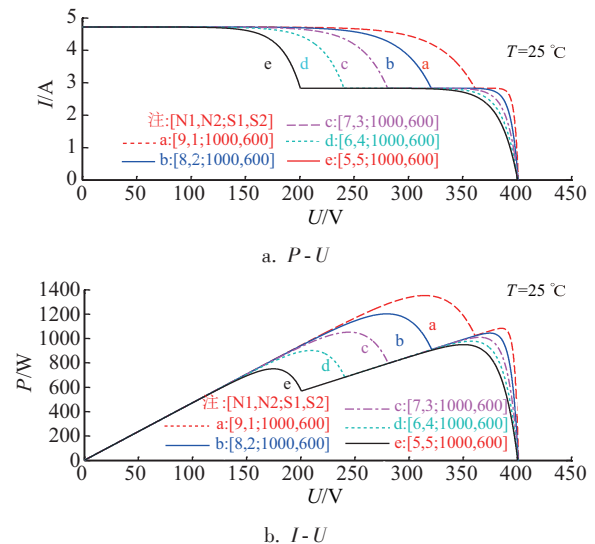


图 6 组件序列输出特性曲线

Fig. 6 Output characteristic curve of component sequence

3 多峰值 MPPT

针对上述提出的问题,国内外学者提出多种解决方案,其中扫描法是应用较广泛的一种算法,该算法是对整个光伏阵列的输出特性曲线进行扫描,直到找到 GMPP。由于需要不间断的对非最大功率

区域进行扫描,从而导致系统运行速度下降、功率损耗增加。本文基于现有多峰值 MPPT 算法研究的基础上,提出一种改进的全局扫描法,即等功率曲线扫描法。

3.1 基于等功率曲线法的多峰值 MPPT 算法

3.1.1 等功率曲线法的原理

等功率曲线法的思想源于对几种常规全局扫描法的分析,该思想主要包括以下 2 步:

第 1 步:首先采用与普通单峰值 MPPT 跟踪算法相同的步骤,找到任意一个 LMPP,同时记录该局部最大功率点对应的 3 个重要参数 (P_{M1}, U_{M1}, I_{M1}),此时系统默认 $P_{max} = P_{M1}$ 为最大功率点。

第 2 步:从 I - V 特性曲线的另一侧分别扫描得到每一个局部峰值点对应的功率值 $P_{M2}, P_{M3}, P_{M4}, \dots$,依次与第一步中的最大功率点进行比较,若此时 $P_{M2} \geq P_{M1}$,则此时 $P_{max} = P_{M2}$,反之,最大功率点不改变,为 $P_{max} = P_{M1}$,以此类推,直到确定全局最大功率点。

虽然功率扫描法能精确地找到 GMPP,但不可避免在非 MPP 点处不断采样搜寻,降低了整个系统的运行速度。为降低非最大功率点处的采样时间,提出了等功率曲线法的思想。如图 7 所示,首先画出 P_{M1} 的等功率曲线 A,显然,曲线 A 左下方的功率输出值均小于 P_{M1} ,全局最大功率点一定落在了曲线 A 的右上区域。将第 2 步中电压的初始值取得尽可能小,不妨取 $U_1 = \delta$ (δ 为初始电压值),短路电流略大于工作电流 I_1 ,将 $U_{n+1} = P_m / I_n$ 作为下一个工作点的取值,其中 P_m 为功率最大值, I_n 为对应的电流值, U_{n+1} 为第 $n+1$ 步的工作电压。由条件 $I_b > I_1$ 及 $U_{n+1} = P_m / I_n$ 可得 $U_3 > U_2$, $P_{M1} > P_2$,当电压继续增大,到达“3”,此时 $P_3 = P_{M1}$,然后继续增加电压,找到新的最大功率点“MPP2”,同时记录此时的 (P_{M2}, U_{M2}, I_{M2})。将 2 次搜寻到的最大功率值相比较,若此时 $P_{M2} \geq P_{M1}$,则此时的最大功率点 $P_{max} = P_{M2}$ 。电压继续增大 δ ,直到“4”,依然按照 $U_{n+1} = P_m / I_n$ 确定工作点“5”处的参数 (P_5, U_5, I_5)。由于 $P_{M2} \geq P_5$,因此电压需要继续增加,直到“6”,此时 $P_6 = P_{M2}$,继续增大电压,找到新的最大功率点“MPP3”。由图 7 得到相邻局部最大功率点之间至少相差一个 U_{MPP} (U_{MPP} 代表光伏组件在该环境下的最大功率点对应的电压值),令 $d = U_{MPP}$,则该多峰值 MPPT 算法终止的条件为 $U > U_{M1-d}$ 。

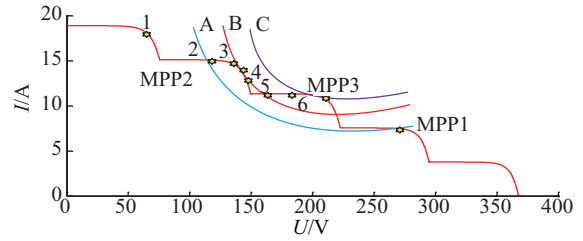


图7 等功率曲线扫描法的实现过程

Fig. 7 Realization of equal power curve scanning method

仍以昱辉阳光 RSL150 W 太阳电池为例,设定辐照度范围 $S=200 \sim 1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$,光伏阵列列为 2×5 。如图 8 为 P - U - I 三维输出曲线,串联 5 个单块电池的电压范围为 $71 \sim 108 \text{ V}$,则单块电池的 U_{MPP} 的波动范围为 $14.2 \sim 21.6 \text{ V}$,因此 d 的取值即为 14 V 。

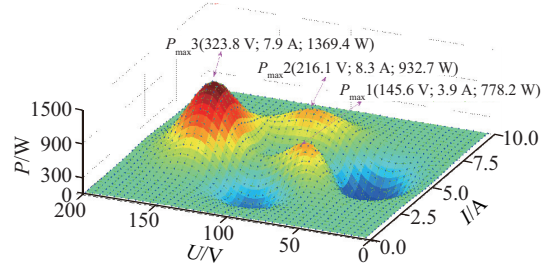
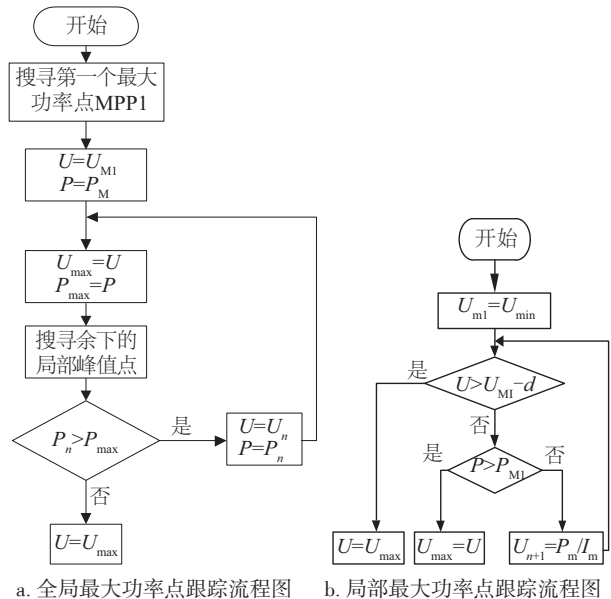


图8 光伏阵列的 P - U - I 三维输出波形

Fig. 8 P - U - I 3D output waveform of PV array

3.1.2 等功率曲线算法流程图

图 9 为等功率曲线法在全局扫描法中的具体实现步骤,包含最大功率点跟踪的 2 个主要部分:



a. 全局最大功率点跟踪流程图

b. 局部最大功率点跟踪流程图

图9 等功率曲线算法流程图

Fig. 9 Flow chart of power curve algorithm

1)首先以开路侧电压为出发点搜寻到第一个最大功率点 MPP1 并记录保存;2)从短路电流侧依次扫描搜寻,记录每一个局部峰值点,然后相互比较,最终确定全局最大功率点。

3.1.3 模型搭建及仿真分析

根据 3.1.1 节理论分析及图 9 算法流程框图,首先利用 Matlab 软件在 Simulink 环境下搭建双峰值仿真模型如图 10 所示,在 2×1 的光伏阵列中光伏阵列的参数分别设置为: $U_{oc} = 175.9 \text{ V}$, $U_m = 143.6 \text{ V}$,

$I_{sc} = 4.75 \text{ A}$, $I_m = 4.25 \text{ A}$ 。参数设定: PV1 光伏阵列照度 $S = 1000 \text{ W/m}^2$; PV2 的部分光伏组件在 0.5 s 时进行遮挡,由 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 突变为 $S = 600 \text{ W/m}^2$ 。如图 11 所示,光伏阵列 $P-U$ 特性曲线由曲线 i 变为曲线 ii,光伏阵列的最大功率点由 PM1 变为 PM2,若最大功率点的跟踪过程未采用全局搜索方式,则搜寻过程很可能陷于局部峰值点,造成功率损失,采用 GMPPT 算法的仿真结果如图 12 所示。

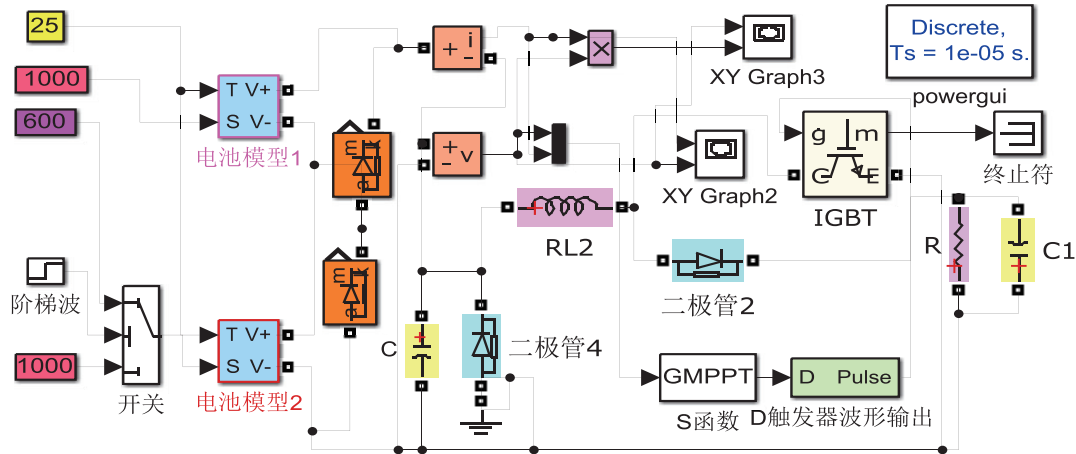


图 10 双峰值系统模型搭建

Fig. 10 Two peak system model

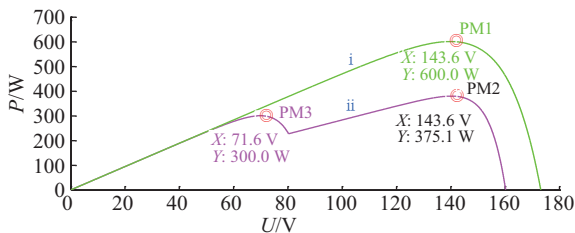
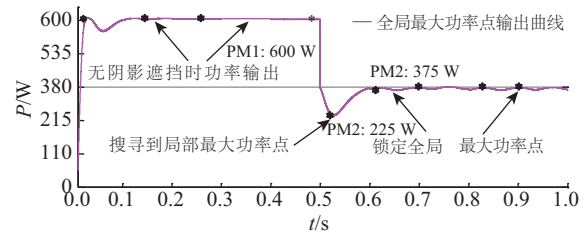


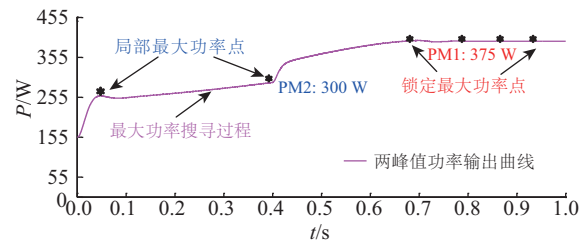
图 11 双峰值光伏阵列 $P-U$ 输出曲线

Fig. 11 Two peak PV array $P-U$ output curve

图 12a 可看出,等功率曲线扫描法 0.53 s 时在开路电压的左侧搜寻到第 1 个局部峰值点后,继续扫描,在 0.6 s 时搜寻到了第 2 个峰值点,两者进行比较,确定全局最大功率点,最后稳定输出,由图 12b 最大功率输出曲线也能直观看出来,首先搜寻到第 1 个局部峰值点 (PM2: 300 W) 后,继续搜寻,找到了第 2 个局部峰值点 (PM1: 375 W),两者比较后,确定全局最大功率点为 (PM1: 375 W),在 0.7 s 后稳定输出最大功率 ($U_{MPP} = 136.4 \text{ V}$, $P_{MPP} = 375 \text{ W}$) 验证了该控制算法的稳定性及有效性。



a. 等功率曲线追踪结果



b. 全局最大功率点搜寻过程

图 12 双峰值等功率算法功率输出

Fig. 12 Power output of two peak equal power algorithm

为进一步验证该算法的优越性,搭建功率输出为三峰值的系统模型,如图 13 所示,在 3×1 的光伏阵列中光伏阵列的参数分别设置为: $U_{oc} = 211.6 \text{ V}$ 、

$U_m = 157.5 \text{ V}$ 、 $I_{sc} = 4.75 \text{ A}$ 、 $I_m = 4.25 \text{ A}$ 。在 0.3 s 时，将 PV2 的部分光伏阵列进行遮挡，辐照度由 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 突变为 $S = 600 \text{ W/m}^2$ ；在 0.4 s 时，将

PV3 的部分光伏阵列进行遮挡，辐照度由 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 突变为 $S = 400 \text{ W/m}^2$ ，图 14 为三峰值最大功率系统中 PWM 波生成模块。

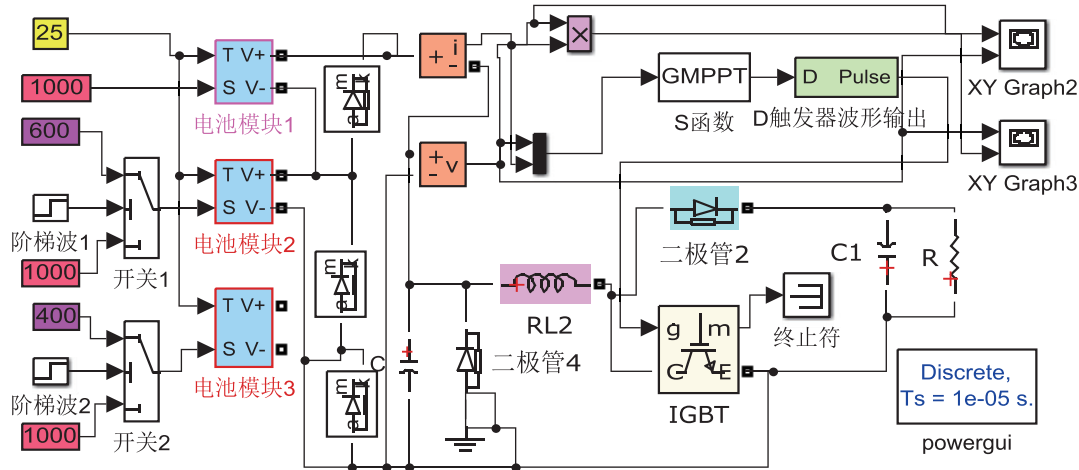


图 13 三峰值模型搭建

Fig. 13 Three peak model building

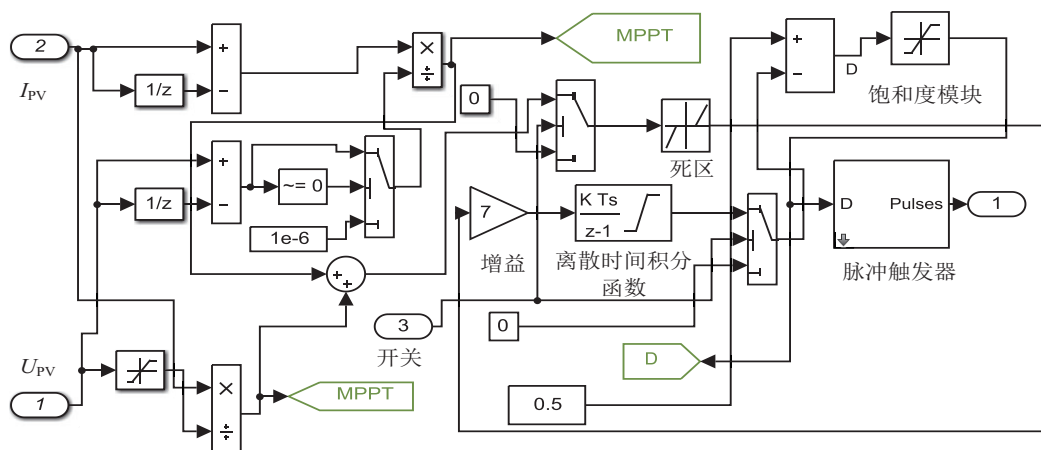


图 14 三峰值PWM波生成模块

Fig. 14 Three peak PWM wave generation module

图 15 为光伏阵列 $P-U$ 特性曲线。由于光照的突然变化，光伏阵列的最大功率由 PM1 变成了 PM2。

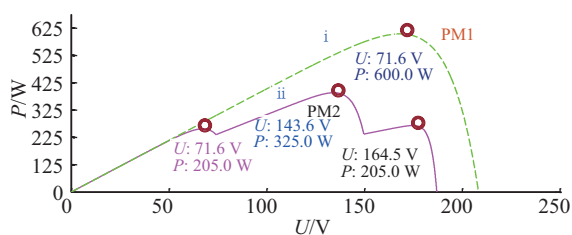


图 15 三峰值光伏阵列输出特性

Fig. 15 Three peak PV array output characteristics

由图 16a 得出，基于等功率曲线的全局扫描法在 0.5 s 时，在开路电压的左侧第 1 次搜寻到了局部峰值点，而后继续扫描，在 0.52 s 时，搜寻到了第 2 个峰值点，之后继续扫描跟踪，在 0.64 s 时，搜寻到第 3 个峰值点，三者进行两两比较，比较之后得出全局最大功率点，最后稳定输出。由图 16b 最大功率输出曲线也很容易看出，首先，系统在稳定后逐渐对光伏阵列进行最大功率点跟踪，在搜寻到第 1 个局部峰值点后的 0.06 s 时，记录下此时的峰值 (PM3: 104 W)，然后继续搜寻，在搜寻到第 2 个局部峰值点后的 0.13 s 时，记录下此时的峰值点

(PM2: 215 W), 两者进行比较, 确定此时最大功率点为 215 W, 并记录输出, 而后继续搜寻, 搜寻到第 3 个局部峰值点后的 0.17 s 记录下此时的峰值 (PM1: 325 W), 将此时的峰值点与之前保存的峰值点进行比较后得出全局最大功率点为 325 W, 并在 0.7 s 后对最大功率值稳定输出, 输出结果验证了该控制算法的稳定性及有效性。

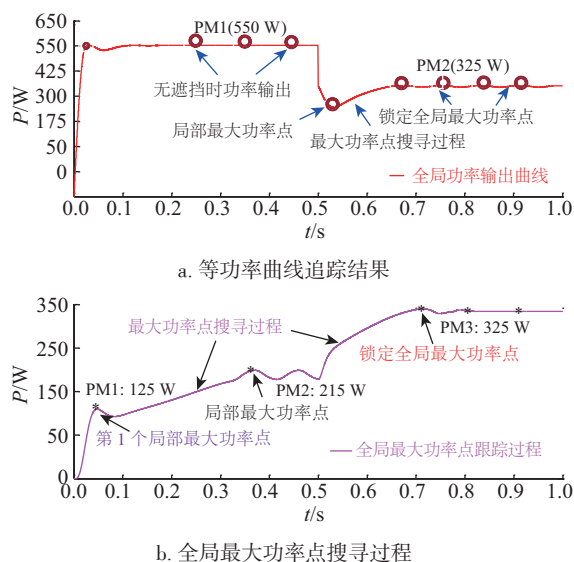


图 16 三峰值等功率算法功率输出

Fig. 16 Three peak equal power algorithm power output

4 结 论

针对传统的 MPPT 算法会导致最大功率点的跟踪陷入局部极大值, 不能最大程度地发挥光伏阵列的输出功率。本文提出一种基于等功率曲线扫描法的 GMPPT 控制算法。

1) 本文首先对光伏阵列处于不同阴影遮挡下的 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线输出进行模型搭建, 由输出特性分析得出光照强度、遮挡方式及阵列模式之间的联系, 为多峰最大功率点的跟踪建立良好的基础。

2) 在光伏阵列仿真模型的基础上, 搭建一种等功率曲线 GMPPT 算法模型, 分别对两峰值、三峰值情况下进行控制输出。该算法的扫描范围是整条特性曲线, 通过比较局部峰值点的大小, 最终确定全局最大功率点, 由于该算法的引入, 使得当系统工作在最大功率点较远处时系统能够快速掠过非最大功率点。

3) 该算法能实现传统 MPPT 算法不能实现的多峰值最大功率点跟踪, 针对两峰值及多峰值功率

输出曲线进行全局 MPP 跟踪, 实现当光伏阵列处于局部阴影遮挡或光照强度发生变化时, 系统能快速准确锁定到新的最大功率点, 并稳定输出最大功率。

4) 该算法工作效率很高, 与传统算法相比其结构简单、输出功率明显增加, 验证了算法的有效性, 大大提高了系统优化设计流程, 对光伏系统的运行具有实际参考价值。

[参考文献]

- [1] 戚 军, 张晓峰, 张有兵, 等. 考虑阴影影响的光伏阵列仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 131—138.
- [1] Qi Jun, Zhang Xiaofeng, Zhang Youbing, et al. Study on simulation algorithm of PV array considering shade effect [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 131—138.
- [2] 杨 奕, 王建山, 杨元培, 等. 基于外推追赶迭代法的 MPPT 算法仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2355—2361.
- [2] Yang Yi, Wang Jianshan, Yang Yuanpei, et al. Simulation of MPPT algorithm based on the extrapolation chasing method [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2355—2361.
- [3] 孙 博, 梅 军, 郑建勇, 等. 局部阴影条件下最大功率点跟踪改进算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 115—119.
- [3] Sun Bo, Mei Jun, Zheng Jianyong, et al. Improved MPPT method under partial shading conditions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 115—119.
- [4] Masoum M A, Dehbonei H, Fuchs E F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514—522.
- [5] Esmar T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439—449.
- [6] Subudhi B, Pradhan R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89—98.
- [7] Bidram A, Davoudi A, Balog R S. Control and circuit

- techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, 2(4): 532—546.
- [8] 胡义华, 陈昊, 徐瑞东, 等. 阴影影响下最大功率点跟踪控制[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(9): 14—26.
- [8] Hu Yihua, Chen Hao, Xu Ruidong, et al. Maximum power point tracking under shadowed conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(9): 14—26.
- [9] Ji Young-Hyok, Jung Doo-Yong, KIM Jun-Gu, et al. 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.
- [10] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(4): 42—48.
- [10] Zhu Yanwei, Shi Xinchun, Dan Yangqing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(4): 42—48.
- [11] Miyatake M, Veerachary M, Toriumi F. Maximum power-point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 367—380.
- [12] 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.
- [13] 胥芳, 张任, 吴乐彬, 等. 自适应BP神经网络在光伏MPPT中的应用[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(3): 468—472.
- [13] Xu Fang, Zhang Ren, Wu Lebin, et al. Self-adaption BP neural network for the maximum-power-point tracking in photovoltaic[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2012, 33(3): 468—472.
- [14] 杨贵恒. 太阳能光伏发电系统及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [14] Yang Guiheng. Solar photovoltaic power generation system and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [15] 王俊平. 分布式光伏发电系统的效率优化方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [15] Wang Junping. Research on efficiency optimization scheme of distributed photovoltaic power generation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

RESEARCH ON MULTI PEAK MPPT ALGORITHM BASED ON EQUAL POWER CURVE METHOD

Wang Jianshan, Yang Yi, Yang Yuanpei, Zhang Guihong, Hu Haitao

(College of Electrical Power Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to realize the optimization of the maximum power tracking control technology of PV array, this paper firstly models and analyzes the PV arrays under the different temperature, illumination and occlusion modes. Through the deep analysis of the influence of the occlusion mode on the global maximum power point from the output characteristics curve, a method of maximum power tracking based on the equal-power curve method is proposed. The method solves the problem of tracking failure owing to trapping in local extreme value qualitatively and improves the output power of the PV array, which provides a new idea for the research of the maximum power point tracking technology under multiple peaks.

Keywords: photovoltaic cell; maximum power point tracking; perturbation and observation method; equal power; curve scanning method