

局部阴影条件下基于改进电导增量法的光伏系统最大功率跟踪方法*

陈玲玉², 黄磊^{1,3†}, 张继元^{1,3}, 王浩¹, 崔琼¹, 舒杰^{1,3‡}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在局部阴影的情况下, 由于串联式光伏组件的输出特性不同而产生多个极值点, 使得传统的最大功率追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 方法陷入局部极值点而失效。文中提出一种针对两级并网光伏系统的改进电导增量法以适应光伏阵列在局部阴影下的多峰值最大功率跟踪, 通过分析最大功率点电压的变化范围, 设定最大功率电压搜索范围以提高搜索效率, 并通过 DC/DC Boost 变换器占空比实现输入电压控制, 保证算法不陷入局部极值点。最后利用仿真实验验证了该算法在有、无阴影情况下均能准确地跟踪光伏方阵最大功率, 有效提高了光伏阵列输出效率。

关键词: 局部阴影; 多峰值; MPPT; 电导增量法; 光伏发电

中图分类号: TK513; TM615

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.06.009

An Improved Incremental Conductance Method for MPPT Control of PV Systems under Partially Shaded Conditions

CHEN Ling-yu², HUANG Lei^{1,3}, ZHANG Ji-yuan^{1,3}, WANG Hao¹, CUI Qiong¹, SHU Jie^{1,3}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Under partially shaded conditions, traditional maximum power point tracking (MPPT) methods may be trapped in local maximum power point due to the multiple peaks of PV array output caused by different output characteristics of series-connected PV modules. This paper proposes an improved incremental conductance method for two-level grid-connected PV system under partially shaded conditions. By analyzing the variation range of maximum power point voltage, voltage searching range is set to improve searching efficiency. And the voltage is controlled by the duty cycle of DC/DC boost converter. The proposed method can search out every local maximum power point and ensure PV system working at global maximum power point. Simulation results confirm that the proposed method can find out maximum power point under partially shaded or unshaded conditions, and improve the PV generation efficiency significantly.

Key words: partially shaded conditions; multiple peaks; maximum power point tracking (MPPT); incremental conductance; PV generation

0 引言

光伏发电是太阳能利用的主要方式之一, 单个光伏电池输出电压和功率均较低, 因此需要将多个光伏电池串并联起来以获得较高的电压和功率。因制造工艺固化成一体的多光伏电池组称为光伏发电

组件 (module)。光伏组件带有强烈的非线性特征, 当光照均匀时, 串联线路功率只是简单的叠加; 当光照不均匀时, 由于各单元短路电流不同, 叠加不再以倍数形式出现, 在并联旁路二极管后, 会出现不同的峰值点。若光伏阵列不能运行在最大功率点, 则其发电效率将会降低。

* 收稿日期: 2016-10-21

修订日期: 2016-11-30

基金项目: 佛山市院市合作项目 (2014HK100051); 广州市创新平台与共享项目 (201509010018); 广东省自然科学基金 (2014A030310191)

† 通信作者: 黄磊, E-mail: huanglei@ms.giec.ac.cn; 舒杰, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn

目前解决光伏阵列多峰值寻优效率低的方法有两类：一类是寻求具有多极值寻优能力的最大功率点跟踪方法，找到全局最大功率点(global maximum power point, GMPP)；另一类是改变光伏阵列的拓扑结构，如将集中式改为分布式，让每个子光伏方阵达到各自的最佳工作状态时都有独立的DC/DC转换，减少因光伏组件之间的功率不匹配造成的功率损失。针对第一类，学者们提出了多种多峰值MPPT算法^[1-7]，这些方法多为智能算法。易芳^[1]提出的伪功率拟合法将功率曲线拟合成一条连续的、单极值的曲线，且极值点落在真实功率曲线的最大功率点所在区域，在该区域寻找最大功率点，但当串联组件个数较多时，曲线拟合困难。刘立群等^[2]提出的模糊免疫算法有较强的鲁棒性，但算法实现比较复杂。朱艳伟等^[3]提出的粒子群优化算法能追踪最大功率点，比普通粒子群算法更精确，但依赖经验，参数选取没有具体依据。

在目前的实际应用中，光伏发电最大功率跟踪多采用扰动法和电导增量法。单峰值最大功率跟踪的变步长改进电导增量法能够迅速适应电压变化，提高跟踪效率，减小稳定条件下的振荡范围，且比扰动法速度更快，功率损耗更小^[8-9]。但当光照不均匀时，单峰值电导增量法将有可能陷入局部极值点，不能追踪到最大功率点，从而影响系统的发电效率。因此，本文基于电导增量法，提出一种适用于光伏方阵多峰值最大功率点跟踪的改进算法。首先分析光伏组件多峰值产生的原因和特性，针对局部阴影条件下的光伏阵列串联结构提出电压搜索范围，实现在各局部功率极大值附近采用电导增量法进行MPPT搜寻，用小区域搜索代替全局搜索，比较后取优来实现最大功率点跟踪。最后利用仿真实验验证所提改进电导增量法的有效性。

1 局部阴影条件下光伏阵列特性分析

1.1 光伏阵列等效电路模型

光伏组件等效电路模型是局部阴影条件下光伏阵列输出特性分析的基础，光伏组件的等效电路如图1所示， $I-V$ 特性方程为^[10-11]：

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{N_{cell}nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中， I 为光伏组件输出电流，A； V 为光伏组件输出电压，V； I_{ph} 为光伏组件的光生电流，A； I_s 为二极管的反向饱和电流，A； R_{sh} 为等效并联电阻， Ω ； R_s 为等效串联电阻， Ω ； n 为二极管理想因数； T 为电池绝对温度，K； N_{cell} 为光伏组件中串联光伏电池个数； k 为玻耳兹曼常数， 1.381×10^{-23} J/K； q 为电子电荷， 1.6×10^{-19} C。

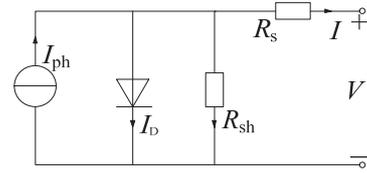


图1 光伏组件等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the photovoltaic module

不考虑温度变化，假定温度为 25°C ，为求解不同辐照下的光伏电池 $I-V$ 曲线，根据模型参数(I_{ph} 、 I_d 、 n 、 R_s 、 R_{sh})随辐照变化的半经验公式，可得出各种条件下的光伏电池模型。

I_{ph} 与辐照呈线性关系，如式(2)所示。

$$I_{ph} = I_{ph,STC} \frac{S}{S_{STC}} \quad (2)$$

式中， S 为太阳辐照， W/m^2 ；STC表示标准测试条件，太阳辐照为 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 25°C 。

同样两个光伏组件，在不同光照条件下，由于组件的短路电流与光照强度近似成正比，开路电压与光照强度的自然对数近似成正比^[12]，将它们直接串联，短路电流的差异会使部分电池输出受到限制并产生热斑，严重时可能损坏电池板，因此通常给光伏电池并联旁路二极管。通常每72个光伏电池串联成一个光伏组件时并联3~9个旁路二极管^[13]。

本文以SUNPOWER SPR-305-WHT光伏组件{8×41}阵列为例。STC条件下组件参数为：最大功率 $P_{mp} = 305 \text{ Wp}$ ，开路电压 $V_{oc} = 64.2 \text{ V}$ ，最大功率点电压 $V_{mp} = 54.7 \text{ V}$ ，短路电流 $I_{sc} = 5.96 \text{ A}$ ，最大功率点电流 $I_{mp} = 5.58 \text{ A}$ ，方阵最大功率为 100 kWp 。光伏方阵结构如图2所示，其中旁路二极管是为了更直观表达而画出，实际情况是旁路二极管在光伏组件内部并且数量有所增加。均匀光照下光伏阵列输出特性如图3所示。

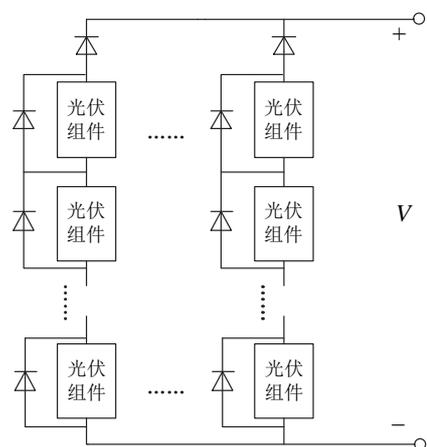


图 2 光伏阵列排列结构

Fig. 2 Structure of photovoltaic array

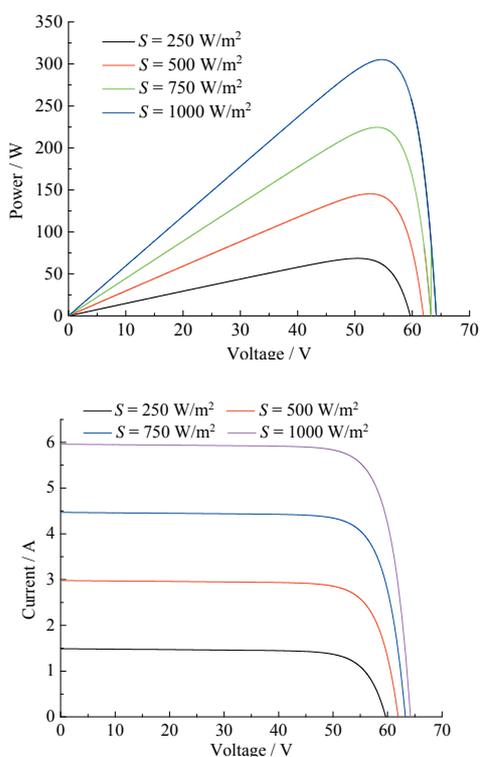


图 3 SUNPOWER SPR-305-WHT 光伏组件特性

Fig. 3 Characteristics of SUNPOWER SPR-305-WHT

1.2 局部阴影下光伏阵列输出特性

设辐照 $1\ 000 \text{ W/m}^2$ 为无阴影遮挡, 辐照低于 $1\ 000 \text{ W/m}^2$ 的情况视为存在阴影遮挡。为方便讨论, 本文将光伏阵列进行分组, 每组阴影均为均匀分布。如图 4 所示, 整个光伏方阵分为 4 组, 每组中包括 41 列并联的且每列为 2 个串联的组件。每组的开路电压 V_{oc} 由于有两个组件串联的关系, 可看作 $V_{oc} = 2 \times 64.2 = 128.4 \text{ (V)}$ 。这里选取两种阴影情况进行讨论, 阴影情况 1: 四组光照分别为 $1\ 000$ 、 800 、

600 、 400 W/m^2 ; 阴影情况 2: 四组光照分别为 $1\ 000$ 、 $1\ 000$ 、 600 、 400 W/m^2 。两种阴影情况下的 P - V 曲线如图 5 和 6 所示。

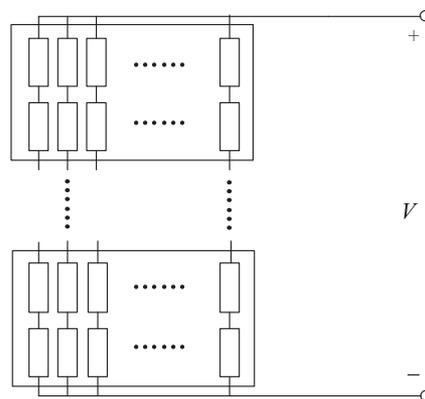
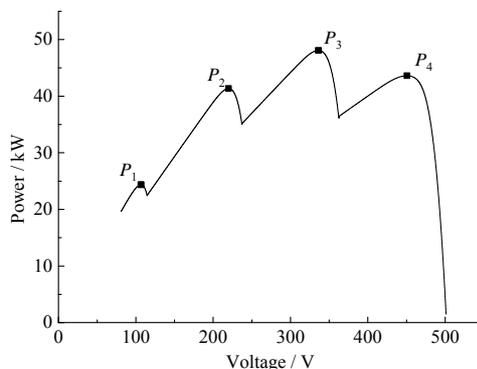


图 4 光伏阵列分组

Fig. 4 Groups of PV array

如图 5 所示, 当 4 组阵列分别接收到不同的太阳辐照时, P - V 曲线中产生 4 个功率极值点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 分别对应 $V_1 = 106.6 \text{ V}$ 、 $V_2 = 219.2 \text{ V}$ 、 $V_3 = 334.2 \text{ V}$ 、 $V_4 = 431.8 \text{ V}$ 。其中, 最大极值点为 P_3 , $P_3 = 48.1 \text{ kW}$ 。假设 $K = V/(NV_{oc})$, 其中 N 为不大于串联组件数量的正整数。则 N 取 1、2、3、4 分别对应 $K_1 = 0.829$ 、 $K_2 = 0.854$ 、 $K_3 = 0.867$ 、 $K_4 = 0.840$ 。如图 6 所示, 当光伏阵列接收到 3 种不同辐照时, 产生 3 个功率极值点, P_1' 、 P_2' 、 P_3' 分别对应 $V_1' = 215.8 \text{ V}$ 、 $V_2' = 338.0 \text{ V}$ 、 $V_3' = 432.4 \text{ V}$ 。其中, 最大极值点为 P_1' , $P_1' = 49.6 \text{ kW}$ 。同样, N 取 2、3、4 分别对应 $K_1' = 0.840$ 、 $K_2' = 0.877$ 、 $K_3' = 0.842$ 。

由以上分析可知, 串联光伏组件数量为 N_s , 当光伏阵列有 M 种辐照时会产生 M 个极值点, 且 $M \leq N_s$ 。每个峰值点电压都大于 $0.8NV_{oc}$, 因此选择搜索的起点电压为: $V_s = 0.8NV_{oc}$, $N = 1, 2, \dots, N_s$ 。

图 5 阴影情况 1 下的 P - V 曲线Fig. 5 P - V curve under partially shaded condition 1

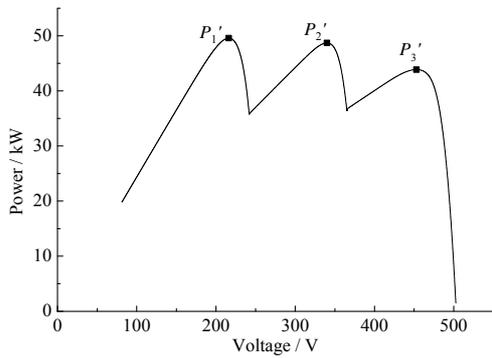


图 6 阴影情况 2 下的 P-V 曲线
Fig. 6 P-V curve under partially shaded condition 2

2 改进电导增量法在 MPPT 中的应用

2.1 光伏系统并网方式

光伏系统通常有几种并网方式，如集中式单级并网和组串式双级并网等。其中集中式并网直接采用 DC/AC 电力电子器件全桥逆变，具有器件简单但控制复杂的特点，系统结构如图 7 所示。由于局部阴影下光伏组件之间不匹配，不能使每一路组件都处于最佳工作点，阻塞二极管引起的功率损耗较大，尤其当有一块组件发生故障或者被阴影遮挡时会影响整个系统的发电效率。

组串式并网的逆变器采用 DC/DC 升压和 DC/AC 全桥逆变两级电力电子器件变换，可以灵活发电。此类逆变器有多种排列结构，可以有效减少各支路功率不匹配造成的功率损失，显著提高光伏阵列输出功率，系统结构如图 8 所示。本文采用的是 DC/DC+DC/AC 双级并网方式，MPPT 在 DC/DC 部分实现。

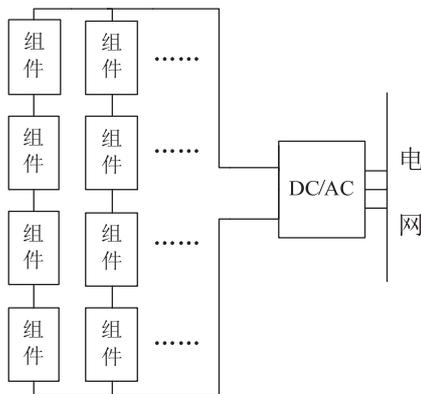


图 7 集中式并网光伏系统
Fig. 7 Centralized grid-connected PV system

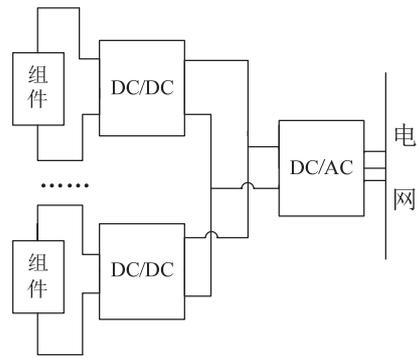


图 8 组串式光伏并网系统
Fig. 8 String grid-connected PV system

2.2 改进电导增量法

电导增量法是利用光伏输出最大功率点处功率和电压的关系进行最大功率跟踪。当光伏输出达到最大功率点时，有 $dP/dV=0$ 。将 $P=VI$ 代入 $dP/dV=0$ ，可以得到如下关系式：

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \tag{3}$$

由式 (3) 获得最大功率点计算方式，即当 $I + V \frac{dI}{dV} > 0$ 时，光伏方阵输出功率位于最大功率点左侧，通过减小占空比 D 来增大电压继续搜索；当 $I + V \frac{dI}{dV} < 0$ 时，光伏方阵输出功率位于最大功率点右侧，通过增大占空比 D 来减小电压继续搜索。

在电导增量法的基础上，通过设定启动电导增量法搜索的起点电压 $V_s=0.8N V_{oc}$ ，减少搜索范围以提高搜索效率。具体搜索过程如下：当电导增量法从起点电压开始找到一个局部最大功率点时，记录当前功率并跳至 $N+1$ 所对应的起点电压再继续扫描，这样保证了对每个峰值点的搜索。同时，若前一个扫描到的最大功率点电压已经大于当前 $N+1$ 所对应的电压，则通过 V_{mp} 反推出其所对应的 N 值，推算公式为：

$$N = \frac{V_{mp}}{0.8V_{oc}}, N \leq N_s \tag{4}$$

更新 N 值后，设定下一个起始搜索电压为 $N+1$ 对应的起始电压，这样可以避免重复搜索。若 $N < N_s$ ，则可以将 $N+1$ 继续追踪；若 $N = N_s$ ，则表明当前已对所有局部极值点完成了搜索。最后比较几个局部最大功率点大小并使光伏方阵工作在全局

最大功率点。

当太阳辐照或者阴影发生改变时, 由于光伏单元的输出特性随之改变, 算法需要重新启动。这里参考文献[3], 将重启条件设为自然重启和突变重启。

$$\Delta P = \frac{|P - P_{mp}|}{P_{mp}} \quad (5)$$

式中, ΔP 为功率波动相对值; P 为实时功率, kW; P_{mp} 为在 V_{mp} 条件下的最大功率, kW。

自然重启条件为当自然稳定条件下光照每分钟辐照变化超过 20 W/m^2 , 对应的功率变化量 ΔP 为 0.02。突变重启条件参考 ΔP , 根据各仿真结果将 ΔP 设为 0.1, 当 $\Delta P > 0.1$ 时算法重启。改进电导增量法算法流程如图 9 所示。

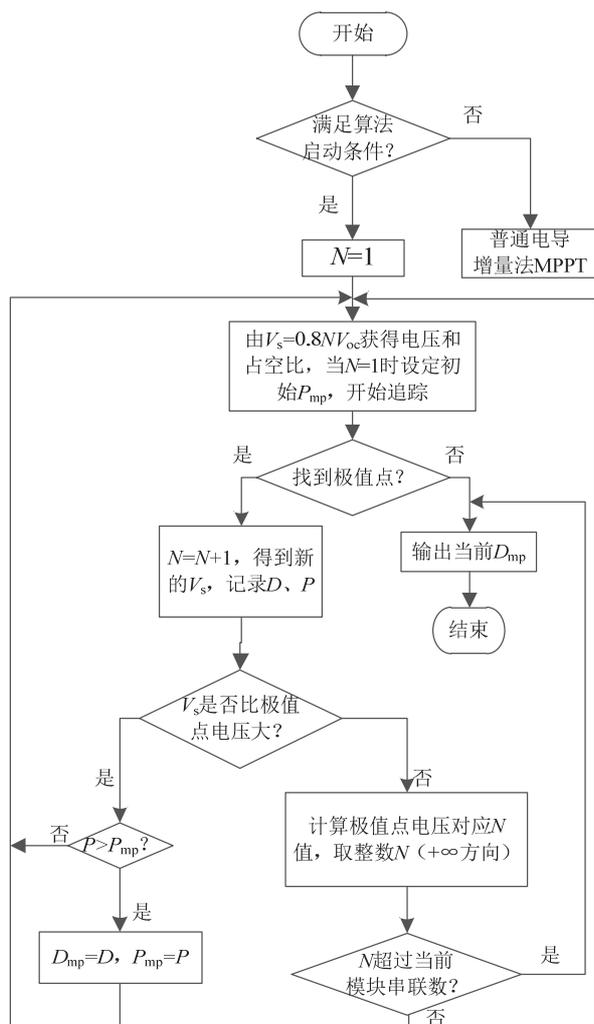


图 9 改进电导增量法流程图

Fig. 9 Flowchart of improved incremental conductance method

3 仿真实验结果及分析

这里采用 Matlab/Simulink 搭建光伏并网系统模型, 仿真模型采用 DC/DC 升压+DC/AC 逆变双级并网方式与电网连接, 如图 10 所示。其中光伏方阵由 SUNPOWER SPR-305-WHT 光伏组件构成, 为 $\{8 \times 41\}$ 阵列, 方阵最大功率为 100 kWp 。光伏阵列经 DC/DC Boost 变换器实现最大功率跟踪并升压, 然后通过 DC/AC 逆变器采用电压外环+电流内环的 VSC 控制方式将光伏阵列输出的最大直流功率逆变后输送至电网。用 S Function 编写 MPPT 程序, 其模块中含有脉冲发生器, 以输出占空比 D 驱动, 使光伏阵列工作在实时更新的电压。所提改进电导增量法通过控制占空比来控制电压, 占空比与电压关系如式 (6) 所示。

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (6)$$

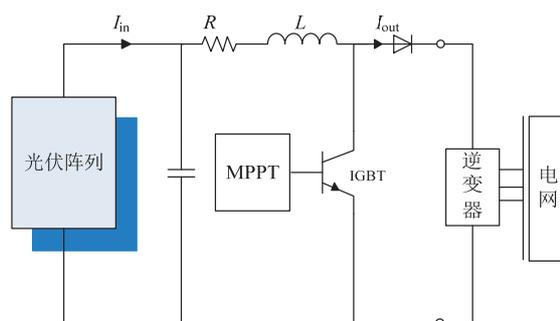


图 10 光伏阵列 DC/DC+DC/AC 双级并网系统模型

Fig. 10 Simulation model of DC/DC+DC/AC two-level grid-connected system

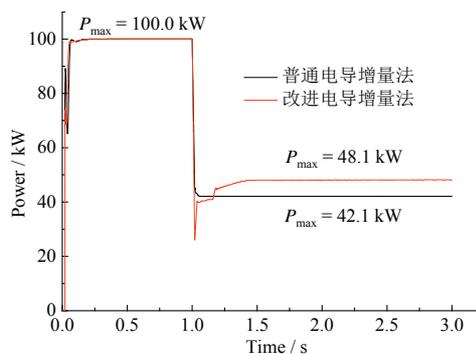


图 11 阴影情况 1 下最大功率跟踪结果

Fig. 11 MPPT results under partially shaded condition 1

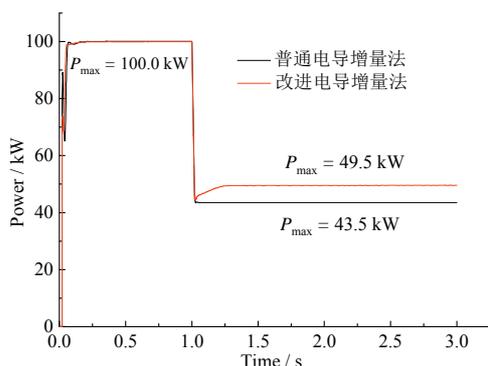


图 12 阴影情况 2 下最大功率跟踪结果

Fig. 12 MPPT results under partially shaded condition 2

STC 条件下，光伏单元开始工作，0.05 s 时 MPPT 开始工作，在 1 s 时出现光照突变，按照 1.2 所述的两种阴影情况进行突变。将仿真结果与普通的电导增量法结果进行比较，如图 11 和 12 所示。

由图 11 和图 12 可知，在正常光照下，普通电导增量法和改进电导增量法都能跟踪到最大功率点。但当光照发生突变时，普通的电导增量法在两种阴影情况下都陷入了局部最大功率点，此时所有光伏单元都工作在能维持发电状态的局部极值点；而改进后的电导增量法能够使部分旁路二极管导通，使得低辐照下的光伏组件被旁路而停止工作，并能成功找到全局最大功率点，局部阴影条件下所跟踪的最大功率与理论最大功率仅相差 0.2%。从速度上看，改进后的电导增量法同样保持了稳定快速的搜寻，在光照突变后 0.5 s 以内迅速重新找到全局最大极值点。

4 结 论

本文针对光伏发电 DC/DC+DC/AC 双级并网系统提出了一种局部阴影情况下的多极值 MPPT 改进电导增量法。分析了局部阴影情况下光伏阵列的输出功率特性及功率极值点处电压变化规律，利用此规律设定电压搜索范围后通过电导增量法寻找光伏功率局部极值点，最大功率即为局部极值点的最大值。仿真实验证明所提改进电导增量法能够利用少量计算和小区域搜索实现最大功率跟踪。在局部阴影情况下避免陷入局部极值点，通过减少电导增量法 MPPT 搜索范围提高了搜索速度，并具有电导增量法的工程实用性。

参考文献：

- [1] 易芳. 局部阴影条件下光伏系统 MPPT 控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [2] 刘立群, 王志新, 张华强. 部分遮蔽光伏发电系统模糊免疫 MPPT 控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 35(7): 96-99. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2010.07.019.
- [3] 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.
- [4] RAJESH R, CAROLIN M M. A comprehensive review of photovoltaic systems[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 51: 231-48. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.006.
- [5] SUDHAKAR BABU T, RAJASEKAR N, SANGEETHA K. Modified particle swarm optimization technique based maximum power point tracking for uniform and under partial shading condition[J]. Applied soft computing, 2015, 34: 613-624. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.05.029.
- [6] RIZZO S A, SCELBA G. ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions[J]. Applied energy, 2015, 145: 124-132. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.077.
- [7] BELKAID A, COLAK I, ISIK O. Photovoltaic maximum power point tracking under fast varying of solar radiation[J]. Applied energy, 2016, 179: 523-530. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.034.
- [8] BENDIB B, BELMILI H, KRIM F. A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 45: 637-648. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.009.
- [9] 余运俊, 张翔, 王时胜, 等. 电导增量法光伏发电 MPPT 研究综述 [J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2440-2444. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2014.12.090
- [10] PATEL H, AGARWAL V. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2008, 23(1): 302-310. DOI: 10.1109/TEC.2007.914308.
- [11] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(S): 229-234.
- [12] 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(19): 4870-4878. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.19.004.
- [13] 刘邦银, 段善旭, 康勇. 局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 188-192. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2008.02.012.

作者简介：

陈玲玉 (1995-), 女, 主要从事电力电子在电力系统中的应用。

黄磊 (1986-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事可再生能源发电预测及微网技术研究。

舒杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事可再生能源发电及微网技术研究。