

# 局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法的研究 \*

成杰，唐小亮，梁安江，赵春丽

(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

**摘要:** 针对局部阴影状态下光伏阵列  $P-U$  特性曲线多峰值的问题, 提出了一种基于搜索-计算-判断的三步法全局最大功率点跟踪(GMPPT)策略。该方法使用改进型扰动观察法反向搜索第一个峰值点, 利用计算和判断减小搜索区域, 将多峰值间接转化为单峰值搜索, 解决了搜索过程中陷入局部极值的问题。通过建立3种阴影状态下的模型, 将该方法与现有最大功率点跟踪(MPPT)算法进行仿真对比, 并建立相应的试验进行验证。仿真及试验结果表明, 该方法在有、无阴影状态下均能稳定实现GMPPT, 有效地提高了系统的跟踪精度和跟踪速度。

**关键词:** 全局最大功率点跟踪; 改进型扰动观察法; 三步法; 局部阴影; 多峰值

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)04-0104-06

doi: 10.12177/emca.2021.001

## Research on MPPT Algorithm of PV Array in Partial Shadow \*

CHENG Jie, TANG Xiaoliang, LIANG Anjiang, ZHAO Chunli

(Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** PV array  $P-U$  characteristic curve in partial shadow state has multiple peaks. To solve this problem, a three-step global maximum power point tracking (GMPPT) strategy based on search-calculation-determination is proposed. The improved disturbance observation method is used to search the first peak point in reverse direction, and the search area is reduced by calculation and judgment. The multi-peak value search can be indirectly transformed into a single peak value search, which overcomes the problem of falling into local extremum in the search process. Through the establishment of three kinds of shadow state models, this method is compared with the existing maximum power point tracking (MPPT) algorithm, and the corresponding experiments are established. The simulation and experimental results show that the method can stably realize the GMPPT in the state of shadow and no-shadow, and effectively improve the tracking accuracy and speed.

**Key words:** global maximum power point tracking (GMPPT); improved perturbation observation method; three-step method; partial shadow; multi-peak

## 0 引言

光伏阵列受环境温度和光照强度影响较大, 实现最大功率点跟踪(MPPT)可以有效提高光伏发电系统的效率<sup>[1]</sup>。理想情况下, 光伏发电系统的  $P-U$  特性曲线呈现单峰值状态, 扰动观察法(P&O)和电导增量法(INC)等经典的 MPPT 算法

可以实现最大功率点(MPP)的追踪<sup>[2]</sup>。但是当光伏阵列被局部遮挡时,  $P-U$  特性曲线呈现多峰值状态, 这些经典的算法极易陷入局部最大值, 造成能量的损失<sup>[3-4]</sup>。

随着光伏电站容量的增加, 多峰值状态下全局最大功率点跟踪(GMPPT)算法的研究得到了越来越多的重视。文献[5]提出了改进型扰动观

收稿日期: 2021-01-14; 收到修改稿日期: 2021-02-02

\* 基金项目: 上海市闵行区科技项目(2018MH303)

作者简介: 成杰(1995—), 男, 硕士, 研究方向为新能源发电。

察法,该方法能够有效地追踪单峰值最大功率点,但是追踪多峰值时极易陷入局部极值。文献[6-7]在改进的P&O方法上提出了改进的全局扫描法,该方法有效解决了陷入局部极值的问题,但是又出现稳态功率振荡大的问题。文献[8-10]提出了一种改进型的粒子群算法(PSO),该方法能够有效地追踪到全局最大功率点,追踪精度高,但收敛不稳定,并且追踪速度较慢。文献[11]利用光伏阵列MPP处电流与短路电流之间的近似关系提出了一种三步骤搜索法,该方法有效地提高了运算速度,但是受比例关系影响较大,容易形成误判<sup>[12]</sup>。

针对上述分析,本文提出了一种基于搜索-计算-判断(SCD)的算法来实现GMPPT。该方法使用改进型扰动观察法从 $U_{oc}$ 处反向寻找第一个局部MPP,通过计算与判断,不断减小搜索区域,间接地将多峰值问题简化为单峰值搜索,从而解决误判问题。通过建立与PSO及P&O等算法的对比仿真,并搭建试验平台进行验证,可以得出SCD算法在有、无阴影状态下均能实现GMPPT,能够有效提高光伏系统的发电效率。

## 1 光伏阵列建模与输出特性分析

### 1.1 光伏电池的数学模型

光伏电池在建模的时候,需要从精确度和运算速度2方面进行考虑。本文选择的光伏电池等效电路如图1所示<sup>[13]</sup>。

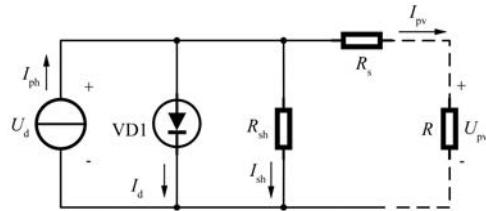


图1 光伏电池等效电路模型

结合图1,可以推出光伏电池的数学模型为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \times \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

因此,将式(2)、式(3)代入到式(1)可以得

到:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times \left[ \exp \left( \frac{qU_d}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{U_d}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$U_d = U_{pv} + I_{pv}R_s \quad (5)$$

式中: $I_{pv}$ 、 $U_{pv}$ 为光伏电池输出的电流和电压; $I_{ph}$ 为光生电流; $I_d$ 为二极管处的电流; $I_{sh}$ 为等效并联电阻处的电流; $I_0$ 为二极管反向饱和电流; $R_{sh}$ 、 $R_s$ 分别为等效后串、并联电阻; $U_d$ 为并联支路电压; $q$ 为电子电荷常数; $n$ 为二极管品质因子; $k$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为外界环境温度。

光伏阵列通常为多个电池串并联构成,将串并联的数量分别记为 $N_s$ 和 $N_p$ ,则式(4)、式(5)变为

$$I_{m_pv} = N_p \times I_{pv} \quad (6)$$

$$U_{m_d} = \frac{U_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv}R_s}{N_p} \quad (7)$$

式中: $I_{m_pv}$ 、 $U_{m_d}$ 分别为多电池串并联后输出电流和并联支路电压。

### 1.2 光伏阵列的输出特性

假设光伏阵列串并联电池模块个数均为4,结构如图2所示。为了保护系统组件并提高整体输出功率,光伏模块均反并联旁路二极管;为了避免产生环流,并联支路均串联阻塞二极管<sup>[14]</sup>。

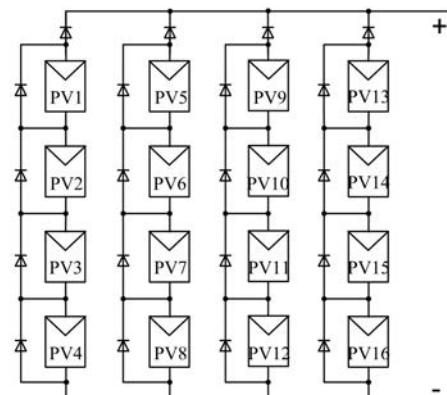


图2 光伏阵列结构

为了不失一般性,本文选用1STH-215-P型号的光伏电池分析,该电池的参数如表1所示。

假设外界环境保持在25℃,单个PV板为最小辐照单元。通过改变PV板的光照强度来构建光伏阵列的3种阴影状况模型。

(1) 阴影状况模型1。所有PV板光照强度均为1000 W/m<sup>2</sup>。

表 1 光伏电池参数

参数名称	参数值
最大功率 $P_{\max}/W$	213.15
开路电压 $U_{oc}/V$	36.3
短路电流 $I_{sc}/A$	7.84
峰值电压 $U_{mp}/V$	29
峰值电流 $I_{mp}/A$	7.35
电流温度系数/ $K^{-1}$	0.102

(2) 阴影状况模型 2。PV1~PV4 光照强度为  $100 W/m^2$ , PV5~PV7 光照强度为  $200 W/m^2$ , PV9~PV10 光照强度为  $500 W/m^2$ , PV13 光照强度为  $600 W/m^2$ , 其余 PV 板光照强度为  $1000 W/m^2$ 。

(3) 阴影状况模型 3。PV1~PV3 光照强度为  $100 W/m^2$ , PV5~PV7 光照强度为  $500 W/m^2$ , 其余 PV 板光照强度为  $1000 W/m^2$ 。

3 种环境下的  $P-U$  特性曲线和  $I-U$  特性曲线如图 3 所示。从图 3 可以得出, 当光照强度不均匀时,  $P-U$  曲线会出现多峰值; 电流  $I$  与电压  $U$  成反比关系。模型 1 为单峰值状况, 最大功率约为  $3382.93 W$ , 通过参数计算功率应该为  $3410.40 W$ , 功率损失约为  $0.8\%$ ; 模型 2 为四峰值状况, 最大功率约为  $1293.77 W$ ; 模型 3 为三峰值状况, 最大功率约为  $1801.16 W$ 。

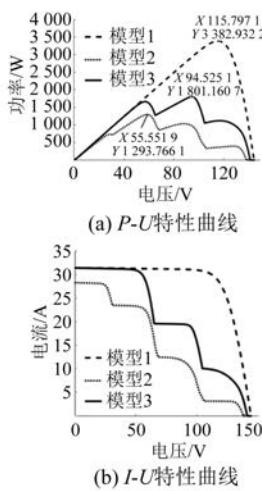


图 3 不同状态下的光伏特性仿真曲线

## 2 PV 全局最大功率跟踪算法

### 2.1 改进型扰动观察法

传统的扰动观察法, 当正向施加扰动时, 其原理为<sup>[15]</sup>

— 106 —

$$\begin{cases} U = U_0 + \Delta U, & P > P_0 \\ U = U_0 - \Delta U, & P < P_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_0$ 、 $P_0$  分别为上一次检测的电压和功率;  $U$ 、 $P$  分别为此次检测的电压和功率;  $\Delta U$  为电压扰动步长。

此方法具有控制概念简单、被测量参数少等优点, 但受电压的初始值和  $\Delta U$  的影响较大。由于  $\Delta U$  固定, 在 MPP 附近振荡, 造成能量的损失。为了规避这种缺点, 本文采用了基于逐步逼近法的扰动观察法, 在保证速度的同时可以极大地提高跟踪精度。其基本思路为, 以较大步长从开路电压  $U_{oc}$  处反向搜索, 每当搜索方向发生变化时, 等比例缩小搜索步长及搜索区域, 再次进行搜索, 每改变一次步长时, 精度成倍提高<sup>[1]</sup>。

### 2.2 最大功率跟踪算法

本文在 2.1 节改进型扰动观察法的基础上, 提出了一种三步式 GMPPT 算法, 通过对  $P-U$  曲线的搜索-计算-判断实现全局最大功率的跟踪。其过程如下。

第 1 步, 搜索。从  $U_{oc}$  处应用改进型扰动观察法进行 MPP 搜索, 搜索到第一个(下一个)峰值点时停止, 记为  $(U_{mi}, P_{mi})$ 。

第 2 步, 计算。 $U_{ref}$  不断反向减小, 寻找拐点。当  $dP/dU > 0$  时, 更新拐点电压  $U_{sci}$ , 根据  $P_{mi}/U_{sci}$ , 求出下一个判断点(次点)  $N_i$  的电流  $I_{Ni}$ 。

第 3 步, 判断。判断  $N_i$  点处  $dP_{Ni}/dU_{Ni}$  是否大于 0, 若大于 0 则回到第 1 步, 否则回到第 2 步, 当  $U_{ref}$  小于  $U_{end}$  时结束, 得到最大功率。

SCD 算法的具体操作流程如图 4 所示。

为了更具体地介绍此算法的实现流程, 下面将结合 1.2 节中模型 2 的  $P-U$  特性曲线进行具体介绍, 其实现过程如图 5 所示。

进行第一个峰值点搜索。从  $U_{oc}$  处应用改进型扰动观察法进行搜索, 寻找第一个极值点  $M_1(U_{m1}, P_{m1})$ , 此时最大功率  $P_m = P_{m1}$ , 通过式(9)求出  $U_{end}$ 。然后, 进入计算环节。不断反向减小电压, 当  $dP/dU > 0$  时, 找到第一个拐点  $A(U_A, P_A)$ , 根据式(10)求出次点  $B(U_B, P_B)$ :

$$U_{end} = U_{min} = U_{m1}/N \quad (9)$$

式中:  $U_{end}$  为结束搜索点处电压;  $U_{min}$  为相邻极值点间最小电压差;  $U_{m1}$  为开路电压附近的极值点电压;  $N$  为旁路二极管的个数。

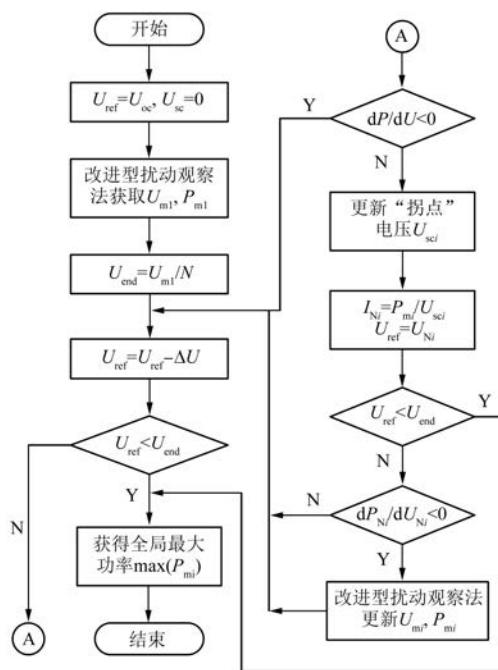


图 4 SCD 算法流程图

第  $i$  个次点处的电流  $I_{Ni}$  为

$$I_{Ni} = P_{mi}/U_{sc} \quad (10)$$

式中:  $P_{mi}$  为第  $i$  个极值点处的功率;  $U_{sc}$  为拐点处电压。

由前文结论可知, 从  $B$  点到  $A$  点, 电流单调递减, 电压单调递增, 因为在区间  $[U_B, U_A]$  上,  $U_{max} = U_A$ ,  $I_{max} = I_B$ , 所以此区间所有的功率均小于  $P_{m1} = U_A \times I_B$ 。因此, 可以从  $M_1$  点直接跨到  $B$  点, 省去中间部分的搜索。之后进行判断, 若  $dP/dU > 0$ , 则说明  $B$  点处于功率上升处, 需要进一步搜索, 寻找  $M_2$  点。若  $dP/dU \leq 0$ , 则说明  $B$  点处于  $M_2$  点上或者是  $M_2$  左侧功率的下降沿, 则可以直接忽略  $M_2$  点, 从  $B$  点开始计算寻找下一个拐点。重复上面的过程, 直至完成全局搜索。

本例中  $B$  点位于  $M_2$  点的右侧, 因此需要进行搜索寻找  $M_2(U_{m2}, P_{m2})$ , 此时  $P_m = \max\{P_{m1}, P_{m2}\}$ 。

然后在  $M_2$  点重复上述过程, 寻找到拐点  $C(U_c, P_c)$ , 通过式(10)找到次点  $D(U_d, P_d)$ , 此时点  $M_3(U_{m3}, P_{m3})$  在  $D$  点右侧, 忽略不计, 从  $M_2$  点直接跨越到  $D$  点。在  $D$  点继续计算, 当  $U_{ref} < U_{end}$  时, 完成 GMPPT 的搜索, 得到最大功率  $P_m$ 。

因此本次追踪的轨迹为  $U_{oc} - B - M_2 - D - U_{end}$ 。

可以看出 SCD 算法的应用将一个三峰值问题转换成为单峰值搜索, 通过计算的方式不断缩小搜索区域, 在避免误判的基础上提高了搜索速度。此外, 此算法在应用过程中无需增加外围电路, 并且运算程序简单、易实现。

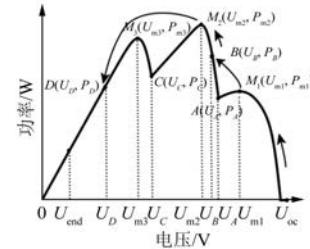


图 5 SCD 算法示例图

### 3 仿真对比分析

为了验证 SCD 算法的有效性, 选取 STH-215-P 光伏组件进行本次仿真试验。光伏阵列结构为  $4 \times 4$ , 电池参数如表 1 所示, 环境温度保持  $25^{\circ}\text{C}$ , 光照强度如上文 3 种阴影模型所述, 采用 Boost 电路作为主电路。通过与粒子群算法和扰动观察法进行仿真对比, 其中 PSO 算法的参数设置为: 个体学习因子  $c1 = 1.2$ ; 局部学习因子  $c2 = 1.2$ ; 最大迭代次数为 60; 惯性权重  $w = [0.15, 0.85]$ ; 速度  $v = [-1, 1]$ 。其具体仿真情况及结果如下所示。

#### 3.1 无阴影情况下仿真对比分析

图 6 为单峰值最大功率跟踪对比仿真结果。从图 6 可以得出, 使用 SCD 跟踪算法在 0.026 s 左右跟踪到峰值, 输出结果大约为 3 382 W, 几乎为恒值输出, 跟踪精度为 99.97%。

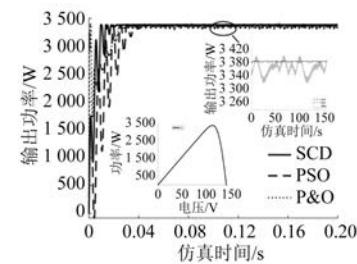


图 6 单峰值全局跟踪过程

使用 PSO 算法在 0.043 s 附近追踪到峰值, 峰值在 3 365.1~3 383.0 W 之间上下波动, 跟踪平均精度约为 99.74%。使用 P&O 算法大约在 0.025 s 追踪到峰值, 跟踪精度为 99.2%。由此可

以得出,单峰值情况下,3 种方法均能快速追踪到最大值,SCD 算法追踪时间短、追踪精度最高,P&O 算法追踪精度最差。

### 3.2 多峰值情况下仿真对比分析

图 7 为三峰值最大功率跟踪对比仿真结果。从图 7 可以得出, P&O 算法在局部峰值处上下振荡, 输出功率范围为  $1\ 097.22 \sim 1\ 120.1\text{ W}$ , 追踪精度仅为 61.55%, 功率损失非常大。SCD 算法最终功率输出大约为  $1\ 799\text{ W}$ , 且上下波动极小, 追踪精度为 99.88%。PSO 算法输出功率稳定在  $1\ 785.3 \sim 1\ 805.9\text{ W}$ , 追踪精度约为 99.69%。SCD 算法的追踪时间为 0.024 s, 小于 PSO 算法的 0.045 s。

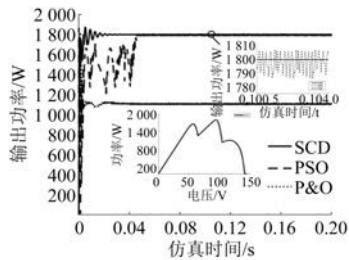


图 7 三峰值全局跟踪过程

图 8 为四峰值最大功率跟踪对比仿真结果。其仿真情况与三峰值基本相似,SCD 算法、PSO 算法和 P&O 算法输出功率分别为 1 293.7 W、1 271.6~1 302.2 W、1 043.4~1 011.04 W, 实现 MPPT 的时间分别为 0.021、0.046、0.014 s。

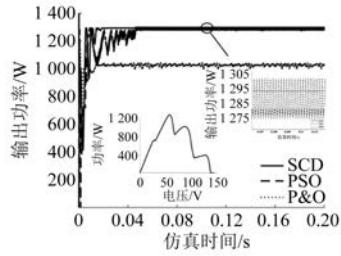


图 8 四峰值全局跟踪过程

从上述 3 种情况的仿真结果可以看出,SCD 算法具有最高的跟踪精度和较快的跟踪速度,并且随着峰值个数的增加,能够更快地跟踪到全局最大峰值;PSO 算法的跟踪精度较好,但是跟踪时间相对较长,并且随着峰值个数的增加,追踪的时间在不断增加;P&O 算法单峰值情况跟踪效果良好,但是在多峰值情况下会陷入局部峰值,不能实

现全局 MPP 跟踪。

## 4 试验验证与分析

为了验证 SCD 算法的可行性, 搭建试验平台如图 9 所示, 试验选取的光伏电池板型号为 XKD200, 此型号在标准状况(环境温度为 25 ℃, 光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup>) 的开路电压为 41.5 V, 最大功率点处电压为 36 V, 光伏阵列结构为 4×1。

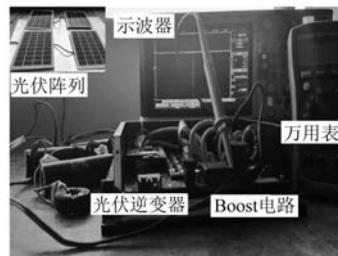


图 9 MPPT 验证试验平台

在阳光充分照射的情况下,用白板对部分 PV 板进行遮挡。由于 MPP 处电压电流等参数一定,试验时仅测量了电压变化曲线,所得的试验跟踪的电压波形如图 10 所示。从图 10 可以看出,应用 SCD 算法能够快速判断出阴影的状况,26 ms 左右完成跟踪,最终将电压稳定在 17.7 V 附近。试验数据表明,该算法在实际应用中可行有效,满足了预期的设想,在有阴影的状况下,系统能够快速地实现全局最大功率点的跟踪,并且输出电压比较稳定。

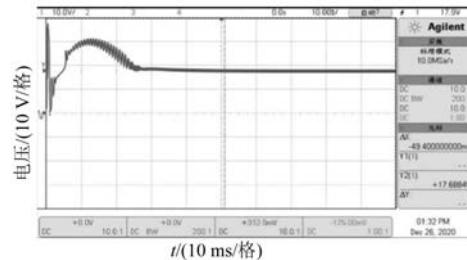


图 10 电压跟踪过程波形

5 结语

本文通过对光伏电池的数学模型进行分析,建立 $4 \times 4$  光伏阵列模型。基于此模型和改进的扰动观察法,提出了 GMPP 跟踪的 SCD 算法。通过与现有的 PSO 和 P&O 算法在 3 种不同的工况下进行对比仿真,结合试验验证,可以得出以下

结论:

- (1) 本文提出的算法在单峰值(无阴影)和多峰值(有阴影)状态下均能快速稳定地跟踪到最大功率点。
- (2) 本文提出的算法与传统的 PSO 和 P&O 算法对比分析表明,在全局最大功率跟踪的过程中,此算法跟踪精度高、跟踪速度快。

### 【参考文献】

- [1] 张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439.
- [3] MAKI A, VALKEALAHTI S. Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 173.
- [4] 李善寿,张兴,张鸿恺,等.基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J].中国电机工程学报,2014,34(28): 4809.
- [5] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K. Variable perturbation size adaptive P&O MPPT algorithm for sudden changes in irradiance [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 718.
- [6] ALONSO R, IBANEZ P, MARTINEZ V, et al. An innovative perturb, observe and check algorithm for partially shaded PV systems[C]//2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009: 1–6.
- [7] DEMENKO A, SYKULSKI J K. Analogies between finite-difference and finite-element methods for scalar and vector potential formulations in magnetic field calculations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 7004206.
- [8] 鞠立华,蒋书运.稀土永磁无刷直流电动机电磁场有限元分析[J].机械制造与自动化,2005,34(1): 115.
- [9] 史石磊,康尔良.永磁同步直线电机的电磁设计与分析[J].微特电机,2020,48(3): 25.
- [10] 孙明灿,唐任远,韩雪岩,等.轴向磁通永磁电机空载气隙磁场建模分析[J].中国电机工程学报,2018,38(5): 1525.
- [11] JI Y, JUNG D, WON C, et al. Maximum power point tracking method for PV array under partially shaded condition[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 1–6.
- [12] 石季英,张文,张永革,等.基于改进 PSO 算法的光伏阵列 MPPT 研究[J].电气传动,2015,45(7): 52.
- [13] 房俊龙,张卫丹,宋朝,等.基于 QPSO 的 MPPT 控制研究[J].电气传动,2019,49(11): 88.
- [14] ISHAQUE K, SALAM Z. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3195.
- [15] 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.
- [16] TEY K S, MEKHILEF S. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5384.
- [17] 梅润杰,张经炜.基于 Z 源逆变器的粒子群和模糊变步长电导增量 MPPT 算法[J].太阳能学报,2020,41(1): 137.
- [18] BABU T S, RAJASEKAR N, SANDEETHA 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.
- [19] 周林,武剑,栗秋华,等.光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J].高电压技术,2008(6): 1145.

(上接第 70 页)

- [7] DEMENKO A, SYKULSKI J K. Analogies between finite-difference and finite-element methods for scalar and vector potential formulations in magnetic field calculations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 7004206.
- [8] 鞠立华,蒋书运.稀土永磁无刷直流电动机电磁场有限元分析[J].机械制造与自动化,2005,34(1): 115.
- [9] 史石磊,康尔良.永磁同步直线电机的电磁设计与分析[J].微特电机,2020,48(3): 25.
- [10] 孙明灿,唐任远,韩雪岩,等.轴向磁通永磁电机空载气隙磁场建模分析[J].中国电机工程学报,2018,38(5): 1525.