

DOI: 10.7667/PSPC162043

一种基于功率闭环控制的改进全局 MPPT 方法

吴志程, 江智军, 杨晓辉

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 在部分阴影的条件下, 光伏阵列的 P-U 特性曲线呈现多峰值。针对现有方法在多峰值情况下最大功率点追踪的速度和准确度的不足, 提出了一种基于功率闭环控制的改进方法。该方法首先采用功率闭环控制确定最大功率点所在电压范围, 其次通过分析粒子群法和 0.8 倍开路电压法, 选取适合算法对该电压范围进行精确的追踪。最后以两种典型的阴影条件为例, 对现有的基于功率闭环的方法和所提方法进行对比仿真。结果证明了两种方法均能精确地追踪最大功率点, 所提方法在追踪速度上有显著提升。

关键词: 多峰值; 最大功率点追踪; 功率闭环控制; 粒子群算法; 0.8 倍开路电压法

An improved global MPPT method based on power closed-loop control

WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Under partially shaded condition, the P-U characteristic curve of PV array shows the multi-peak value. In view of existing methods being lacking in speed and precision in the case of multi-peak maximum power point tracking, this paper puts forward an improved method based on power closed-loop control. Firstly, this method adopts power closed-loop control to determine the maximum power point voltage range. Then by analyzing the particle swarm method and 80% of open-circuit voltage algorithm, this method selects suitable algorithm for accurately tracking the voltage range. Finally, by taking two typical shadow conditions for example, this paper takes the existing method based on power closed-loop and the proposed method to make compared simulation. The final results show that the two methods can accurately track the maximum power point and the proposed method has significant improvement on the tracking speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61662044), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20132BAB211039), and Science and Technology Support Plan of Jiangxi Province (No. 20142BBE50037 and No. 20151BBE50050).

Key words: multi-peak value; maximum power point tracking (MPPT); power closed-loop control; particle swarm optimization (PSO) algorithm; 80% of open-circuit voltage algorithm

0 引言

在光伏发电系统中, 最大功率追踪(MPPT)就是控制光伏阵列始终保持最大的输出功率, 以此来保证光伏发电系统的利用效率。有许多传统的方法能实现 MPPT, 如扰动观测法、电导增量法、功率回馈法等^[1]。然而在实际中, 由于遮蔽光伏阵列会出现局部的阴影, 此时其 P-U 特性不再是单峰值情况,

它会根据光伏阵列的特性和阴影的分布情况呈现多峰值特性。传统的 MPPT 方法在处理多峰值问题时往往会陷入局部最优解, 导致了光伏发电系统的效率低下。所以, 对于多峰值的 MPPT 问题的研究具有相当重要的理论意义和现实意义^[2]。

目前, 针对部分阴影条件下的最大功率追踪, 已有诸多学者展开了大量的研究。文献[3]提出了一种改进的全局功率扫描法(POC), 此方法的变步长虽然可在一定程度内减小追踪时间, 但此方法的追踪速度会受到极值点出现位置的影响, 追踪耗时不稳定。文献[4]指出两个相邻峰值点之间的最小电压差约为光伏组件开路电压的 0.8 倍, 文献[5]以此为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61662044); 江西省自然科学基金项目(20132BAB211039); 江西省科技支撑计划项目(20142BBE50037, 20151BBE50050)

基础了提出了 0.8 倍开路电压法, 加快了在多个波峰间的追踪速度。粒子群法(PSO)^[6-7]、遗传算法^[8-9]、萤火虫算法^[10]等仿生算法也被广泛运用于解决最大功率追踪问题上, 它们在增加步长提高追踪速度的同时容易使算法不能收敛于全局峰值。文献[11]提出了基于功率闭环控制(BPC)的全局 MPPT 方法, 该方法通过功率闭环控制快速扫描 P-U 曲线, 再通过 POC 和 PSO 进行精确追踪, 由于算法对部分 P-U 特性曲线进行了多次扫描, 耗时过长, 降低了算法的效率。

针对该问题, 本文通过比较分析 0.8 倍开路电压方法和 PSO 法在多峰值追踪中各自的优势和适用范围, 提出一种基于功率闭环控制的改进 MPPT 方法。该算法首先启用 BPC 法快速缩小全局峰值所在的电压区间, 当所得电压区间较小时则采用 PSO 法进行 MPPT。当所得电压区间超出了 PSO 法的适用范围时则采用 0.8 倍开路电压法追踪该区间。与已有的方法相比, 本文提出的方法既保持了 BPC 的快速性, 又充分利用了 PSO 和 0.8 倍开路电压法各自的优势, 简化了算法的过程, 提高了算法的效率。最后本文通过仿真实验在不同的遮蔽情况下对已有的基于功率闭环控制方法和本文的方法进行比较, 验证了本文所提方法的优越性, 进一步完善了部分阴影条件下多峰值全局最大功率追踪方法。

1 基于功率闭环控制的改进 MPPT 方法的基本控制结构

基于功率闭环控制的改进 MPPT 法的控制系统结构图如图 1 所示。本文采用双极式并网系统, 系统由光伏阵列、boost 升压斩波电路、并网逆变器和控制环节组成。并网逆变器通过调节占空比使 U_{dc}

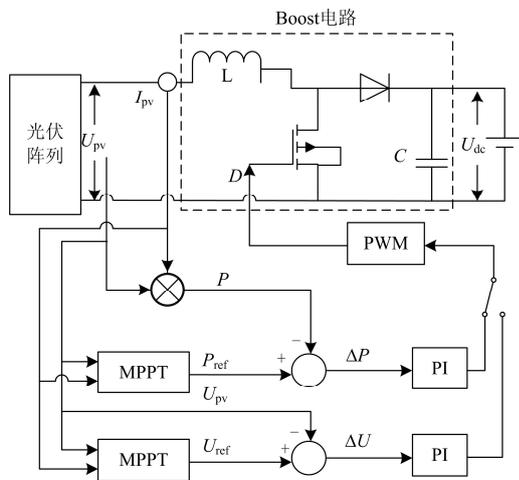


图 1 控制系统结构图

Fig. 1 Structure of control system

保持稳定, 鉴于逆变器控制环节不是本文的研究对象, 可把输出电容、并网逆变器和电网近似等效为一个电压为 U_{dc} 的直流电源。此时, U_{pv} 和 U_{dc} 满足式(1)。

$$\frac{U_{dc}}{U_{pv}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

式中, D 为 boost 电路 IGBT 的占空比。由式(1)可知通过调节占空比 D 可以控制光伏阵列的输出电压 U_{pv} 。控制环节采用双闭环控制, 即功率闭环和电压闭环。在本文方法的第一个阶段采用功率闭环控制算法, 此时控制环节转入功率闭环。在第二个阶段本文算法采用 PSO 或 0.8 倍开路电压法时, 控制环节转入电压闭环。

2 基于功率闭环控制的改进 MPPT 方法的原理和过程

2.1 功率闭环控制的原理

结合图 1 和图 2, 功率闭环控制策略的基本思路如下: 启用算法时, MPPT 模块给定 P_{ref} 初始值为一个较小的数值, 光伏阵列的初始电压为开路电压, 光伏阵列的输出电压 $P=0$ W, 即光伏系统运行在 a 点。当 $\Delta P=P_{ref}-P$ 大于 0 时, ΔP 经过 PI 环节的调节使占空比 D 增大(反之则使 D 减小), 光伏阵列电压降低, 运行点左移到达 b 点, 此时输出功率 $P=P_b=P_{ref}$, 即完成了一次算法周期, 更新 P_{ref} 的值, $P_{ref}=P_{ref}+P_{step}$, 算法开始下一个周期。当运行点到 c 点, $P_{ref}=P_c+P_{step}$ 时, 随着工作点左移, ΔP 迅速增加, 工作点快速掠过 P-U 特性曲线右边的波峰和波谷到达 d 点, 避免了在此区间内无用的搜索。当运行点到达 e 点时, $P_{ref}=P_e+P_{step}$ 大于最大功率点 m, 工作点迅速左移到达允许电压最小值点 f, 算法结束。此时, 可根据式(2)和式(3)分别确定最大功率 P_{max} 的范围和最大功率点 U_{max} 存在的电压范围。

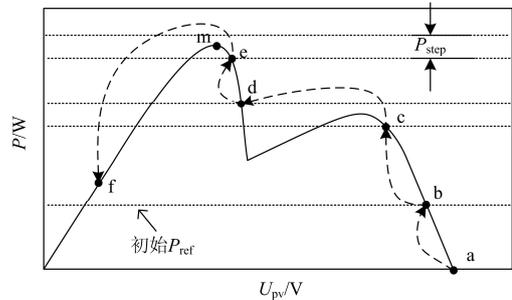


图 2 功率闭环控制追踪示意图

Fig. 2 Searching process based on power closed-loop control

$$P_{ref} - P_{step} \leq P_{max} \leq P_{ref} \quad (2)$$

$$P_{ref} / I_f \leq U_{max} \leq U_e \quad (3)$$

2.2 0.8 倍开路电压法的原理

由图 3 可知, 当光伏阵列的 P-U 特性曲线呈现多峰值状态时, 其 I-U 特性曲线呈现多个台阶, 每个台阶对应 P-U 特性曲线中的一个波峰, 且每个台阶可分为恒流段和恒压段。在台阶的恒流段, 随着电压的升高, 电流基本不变, 此时, 功率随着电压的升高线性增加, 这对应 P-U 特性曲线中的“上山坡”(dP/dU 为正的部分)。在台阶的恒压段, 随着电压的升高, 电流急剧减小, 此时, 功率迅速降低, 这对应 P-U 特性曲线中的“下山坡”(dP/dU 为负的部分)。“上山坡”与“下山坡”相比, “上山坡”较为平缓, 适合以较大的步长进行追踪, “下山坡”较为陡峭, 本文采用扰动观测法对其追踪。

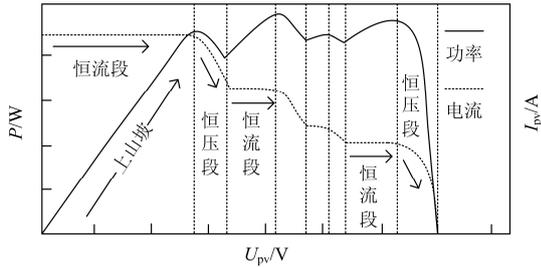


图 3 光伏阵列的 P-U 特性和 I-U 特性曲线

Fig. 3 P-U and I-U characteristic curves of photovoltaic array

根据文献[4]所得的结论: 两个相邻峰值点之间的最小电压差约为光伏组件开路电压的 0.8 倍, 即 $\Delta U = 0.8U_{oc_module}$ 。算法的启动和追踪过程如下: 算法从开路电压开始追踪, 采用扰动观测法搜索出第一个峰值点, 并记录其功率和电压(P_a, U_a)。随后算法以 ΔU 为步长减小电压进行搜索, 为避免错过峰值点, 可取 $\Delta U = (0.6 \sim 0.7)U_{oc_module}$ 。电压值每次更新后, 算法引入小扰动检测 dP/dU, 当 dP/dU 为正时, 说明此时 P-U 特性曲线处于“上山坡”, 则继续以 ΔU 为步长搜索; 当 dP/dU 为负时, 说明此时 P-U 特性曲线处于“下山坡”, 曲线斜率较大, 若再以固定步长搜索易使算法掠过峰值点, 因此采用扰动观测法精确搜索出第二个峰值点, 并记录其功率和电压(P_b, U_b)。以相同方法往 P-U 特性曲线左侧继续搜索并记录各个峰值点的功率和电压, 直到电压小于最小允许电压 U_{min} 为止。比较已记录的各个峰值点, 即可得到最大值点电压。由于算法分析了 P-U 特性曲线, 对“上山坡”和“下山坡”采取不同的追踪策略, 极大加快了追踪时间。

2.3 PSO 算法的原理及其与 0.8 倍开路电压法的比较

粒子群算法(PSO)是模拟鸟类觅食行为而发展起来的一种非线性迭代寻优算法^[12-16], 算法在寻优区间中均匀地设置几个工作点, 通过式(4)和式(5)的迭代不断优化工作点的位置。

$$\Delta U_i(n+1) = \omega \Delta U_i(n) + C_1 rand[0,1](P_{ibest} - U_i(n)) + C_2 rand[0,1](G_{best} - U_i(n)) \quad (4)$$

$$U_i(n+1) = U_i(n) + \Delta U_i(n+1) \quad (5)$$

由 PSO 算法的特点和已有实验结果^[17]可知, PSO 算法在较小的电压区间范围内能很快收敛, 且稳态跟踪精度高。然而, 当电压区间范围扩大, 且在此范围内 P-U 曲线存在多个波峰, PSO 算法所设置的粒子处于不同的波峰周围, 这极大降低了粒子间相互学习的价值, 导致算法收敛慢甚至不收敛。相反, 0.8 倍开路电压法的追踪特点使其适合追踪长范围、多峰值的电压区间, 所以, 在 PSO 算法和 0.8 倍开路电压法间存在一个适用界线。

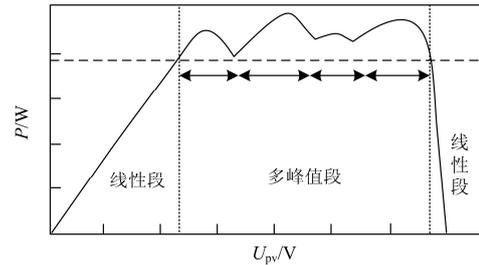


图 4 P-U 特性曲线的分段

Fig. 4 Segment of P-U characteristic curve

本文采用[6×4]SUNPOWER SPR-350-WHT 光伏阵列, 其每个光伏组件开路电压 $U_{oc_module} = 64.2$ V。由式(2)和式(3)可知, 闭环功率控制法所确定的电压区间只可能在 P-U 特性曲线的多峰段内。如图 4 所示, 此段内各峰值点之间的距离差距不大, 经实验测量峰值点电压间距约为 50 V (约等于 $0.8U_{oc_module}$), 并以此为电压比较单位, 把 PSO 算法和 0.8 倍开路电压法进行比较, 结果见表 1。由表 1 可知, 只有在 50 V 的电压范围内(即 P-U 特性曲线单波峰范围内), PSO 算法具有优势, 其余情况下 0.8 倍开路电压法均较快, 且电压范围越大, 优势越明显。所以, 可以将 PSO 算法和 0.8 倍开路电压法的适用界线整定为 $(0.7 \sim 0.8)U_{oc_module}$, 本文选取 50 V 作为适用界线, 具体论述见 2.4 节。

表 1 两种方法在不同电压范围内的耗时比较

Table 1 Time-consuming comparison of two kinds of methods in different voltage range

| 电压范围 | 50 V | 100 V | 150 V | 200 V |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| PSO | 0.09 s | 0.23 s | 0.35 s | 0.51 s |
| 0.8 倍开路电压 | 0.13 s | 0.2 s | 0.27 s | 0.35 s |

2.4 基于功率闭环控制的改进 MPPT 控制策略

本文所提方法以功率闭环控制为基础, 结合了 0.8 倍开路电压法和 PSO 算法, 相较于已有的基于

功率闭环控制方法^[9], 本文所提方法去掉了已有方法中采用 POC 法追踪的过程, 引入了新的方法, 即 0.8 倍开路电压法, 在结构上则从过去的 3 层结构简化为两层结构。本文算法的主程序流程图见图 5。

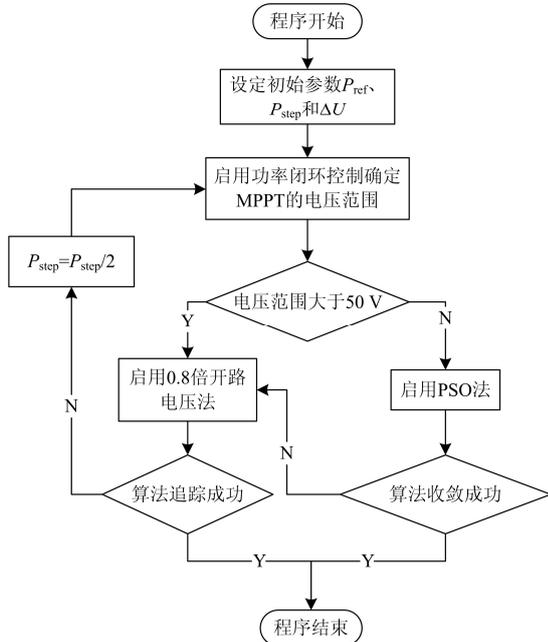


图 5 主程序流程图

Fig. 5 Flow chart of main program

算法首先启用功率闭环控制快速确定最大功率点所在的电压范围, 在此步骤中, 参数 P_{step} 的选取有着重要意义。当 P_{step} 取值较大, 功率闭环控制算法速度加快, 但所确定的电压范围较大; 当 P_{step} 取值较小时则相反, 本文取 P_{step} 为 300 W。在确定了电压范围后则判断电压范围的大小是否超过了 50 V, 若是则采用 0.8 倍开路电压法在该电压范围内追踪, 否则采用 PSO 算法追踪。由于 0.8 倍开路电压法最后一个步骤采用的是扰动观测法, 使追踪结果产生小幅振荡, 这与采用 PSO 算法的稳态追踪结果不一致。所以当采用 0.8 倍开路电压法产生的追踪结果在连续 0.5 s 内振荡幅度小于 $0.002P_{max}$ 时, 则转入 PSO 算法进行稳态追踪。在极端情况下, PSO 算法收敛失败, 即超过最大预定时间, 则采用 0.8 倍开路电压法重新追踪已有的电压范围。当 0.8 倍开路电压法追踪失败, 即所追踪得到的最大功率 P_m 远小于 P_{ref} , 则使 $P_{step} = P_{step} / 2$, 重新启用功率闭环控制并确定一个更小的电压范围。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

本文采用 Simulink 对光伏发电系统进行仿真。

系统采用 $[6 \times 4]$ SUNPOWER SPR-350-WHT 光伏阵列, 在标准测试条件下 (温度 $t=25^\circ\text{C}$, 照度 $G=1000 \text{ W/m}^2$) 每一个光伏组件的开路电压 $U_{oc_module}=64.2 \text{ V}$, 光伏组件的短路电流 $I_{sc_module}=5.96 \text{ A}$, 最大功率 $P_{max_module}=305.2 \text{ W}$ 。Boost 升压电路的参数如下^[4]: 电容 $C=3000 \mu\text{F}$, 电感 $L=6 \text{ mH}$, IGBT 的开关频率 $f_s=2 \text{ kHz}$, 负载端接直流电源 $U_{dc}=500 \text{ V}$ 。0.8 倍开路电压法的 $\Delta U=0.7U_{oc_module}=45 \text{ V}$ 。PSO 算法的参数设置和粒子的初始化设置如表 2 所示^[17]。

表 2 PSO 算法的参数设置

Table 2 Parameters setting of PSO algorithm

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------|-----|---------|--------------------------|
| m | 4 | U_1/V | $0.2(U_c - P_{ref}/I_t)$ |
| ω | 0.4 | U_2/V | $0.4(U_c - P_{ref}/I_t)$ |
| c_1 | 0.6 | U_3/V | $0.6(U_c - P_{ref}/I_t)$ |
| c_2 | 1.2 | U_4/V | $0.8(U_c - P_{ref}/I_t)$ |

局部阴影条件下光伏阵列的 P-U 特性曲线取决于阵列的结构、阴影的分布与照度等因素^[18]。本文以一个光伏组件为阴影单位, 在不同阴影条件下测量光伏阵列的 P-U 特性曲线, 如图 6 所示。

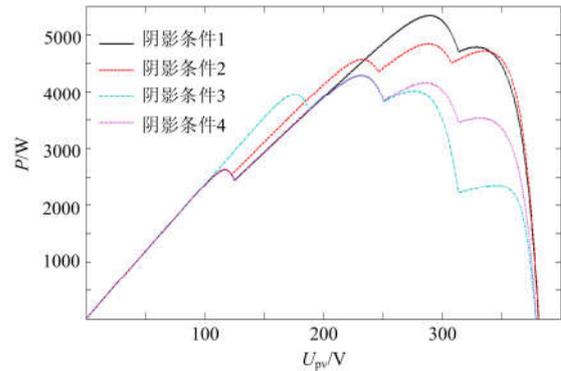


图 6 不同阴影条件下的 P-U 特性曲线

Fig. 6 P-U characteristic curve under the shadow of different conditions

- 1) 阴影条件 1。第一列取 1 个光伏组件置于阴影, 第二列取 4 个组件置于阴影, 阴影的照度为 300 W/m^2 。(其余光伏组件均为标准测试条件, 下同。)
- 2) 阴影条件 2。第一、二、三列分别取 1、2、4 个光伏组件置于阴影, 阴影照度为 500 W/m^2 。
- 3) 阴影条件 3。第 1、2、3、4 列分别取 1、2、3、4 个光伏组件置于阴影, 阴影照度为 300 W/m^2 。
- 4) 阴影条件 4。第 1、2、3 列分别取 1、2、4 个光伏组件置于阴影, 阴影照度为 300 W/m^2 。

3.2 两种阴影条件下本文算法与现有方法的仿真对比
根据图 6 的结果, 本文选取阴影条件 1 和阴影

条件 2 这两种较典型的情况对系统进行仿真。在阴影条件 1 和阴影条件 2 下对本文方法与现有方法^[11]的仿真情况分别见图 7 和图 8。

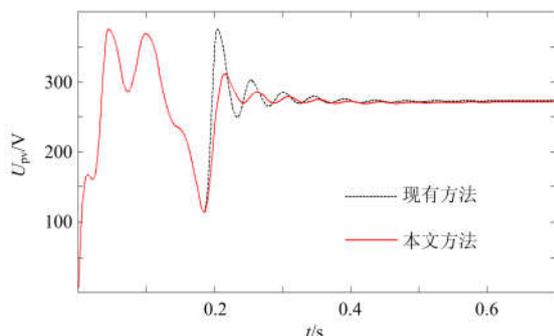


图 7 阴影条件 1 下两种方法的对比仿真

Fig. 7 Simulation of the two methods under the No. 1 shadow condition

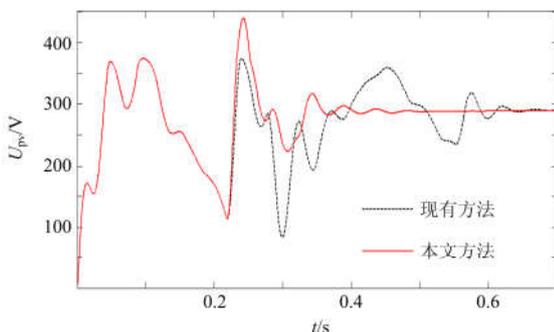


图 8 阴影条件 2 下两种方法的对比仿真

Fig. 8 Simulation of the two methods under the No. 2 shadow condition

在阴影条件 1 中, 3 个各峰值点间功率差距均大于 500 W, 远远大于所设的 $P_{\text{step}}=300$ W, 所以功率闭环控制只消耗了 0.18 s 就扫描完全部 P-U 曲线。由于所确定的电压范围较小, 本文方法直接选用了 PSO 进行精确追踪, 该算法在 0.08 s 内就达到了 95% 的精确度。相比现有方法(消耗 0.164 s)快了约 50%。且在功率闭环控制转入 POC 法时带来了 38% 的超调量, 现有方法在追踪的过程中能量损失较大。由于阴影条件 1 的 P-U 特性曲线近似于单峰值情况, 追踪难度不大, 本文方法消耗了 0.32 s 就达到 98% 的精确度, 现有方法则消耗 0.35 s, 总的追踪速度差距不大。

在阴影条件 2 中, P-U 特性曲线右端的 3 个峰值点间功率相差均小于 250 W, 电压越过最右端的峰值点后就开始滑向允许最小电压 U_{min} 。功率闭环控制消耗了 0.22 s 扫描全部 P-U 曲线, 与阴影条件 1 的耗时相当, 阴影条件的改变对功率闭环控制影

响较小。在第二阶段本文方法采用 0.8 倍开路电压法进行精确追踪, 该算法消耗 0.28 s 就达到 98% 的精确度, 现有方法仍然采用 POC 与 PSO 的组合, 消耗了 0.61 s 达到 98% 精确度, 较本文方法慢了 118%, 总耗时慢了 66%, 差距明显。虽然从功率闭环控制到 0.8 倍开路电压法的过程中带来了较大的超调, 但追踪过程中本文方法的平均超调量远小于现有方法, 追踪过程中的能量损耗较小, 由式(6)计算可得, 本文方法较现有方法能量损耗减少 32%。

$$Q_{\text{loss}} = \int_0^T P_{\text{max}} - P(t) dt \quad (6)$$

4 结论

本文提出的基于功率闭环控制的改进全局 MPPT 算法, 通过仿真分析验证, 得到以下结论:

- 1) 在追踪精度上, 本文方法和现有方法均能适应不同的阴影条件, 准确追踪最大功率点。
- 2) 在追踪速度上, 相比现有方法, 本文方法有显著优势, 且当 P-U 特性曲线出现峰值接近的连续波峰时, 本文方法的速度优势更加明显。
- 3) 在适用性上, 由于功率闭环控制的追踪性能与光伏阵列的峰值分布关系不大, 使本文方法能适用于追踪不同阴影条件下的 P-U 特性曲线。

针对 PSO 法与 0.8 倍开路电压法的选取, 本文只从电压范围的角度进行分析, 若考虑光伏组件的参数和阴影分布的位置, 会有更好的效果, 这也是本课题将要研究的方向。

参考文献

- [1] 鞠平. 可再生能源发电系统的建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [3] ALONSO R, IBASE P, MARTINEZ V, et al. An innovation perturb, observe and check algorithm for partially shaded PV systems[C] // IEEE Conference Publications, Barcelona, 2009: 1-8.
- [4] 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.
- [5] 张芳, 陈嘉. 部分遮挡条件下光伏阵列全局最大功率

- 点追踪控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 64-72.
- ZHANG Fang, CHEN Jia. Maximum power point tracking control for photovoltaic array under shaded conditions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 64-72.
- [6] 吴俊娟, 姜一达, 王强, 等. 一种改进的光伏系统 MPPT 控制算法[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 478-484.
- WU Junjuan, JIANG Yida, WANG Qiang, et al. An improved MPPT control algorithm of PV system[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2012, 33(3): 478-484.
- [7] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [8] 姬伟超, 殷时蓉, 刘朝涛. 基于 Buck-Boost 拓扑的新量子遗传算法在 MPPT 技术中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 92-96.
- JI Weichao, YIN Shirong, LIU Zhaotao. Maximum power point tracking based on Buck-Boost topology with new quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 92-96.
- [9] 肖俊明, 王东云, 李燕斌, 等. 基于遗传算法的占空比扰动法在 MPPT 中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 43-46.
- XIAO Junming, WANG Dongyun, LI Yanbin, et al. Research on a maximum power point tracking with DRP based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 43-46.
- [10] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.
- CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.
- [11] 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): 4809-4816.
- LI Shanshou, ZHANG Xing, ZHANG Hongkai, et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4809-4816.
- [12] 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.
- 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.
- [13] LIU Y H, HUANG S C, HUANG J W, et al. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 1027-1035.
- [14] MIYATAKE M, TORIUMI F, ENDO T, et al. A novel maximum power point tracker controlling several converters connected to photovoltaic arrays with particle swarm optimization technique[C] // European Conference on Power Electronics and Applications, Denmark, 2007: 1-10.
- [15] MASAFUMI M, VANXAY P, YUTA K, et al. The demonstration experiments to verify the effectiveness of the improved PSO-based MPPT controlling multiple photovoltaic arrays[C] // 5th Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition for the Asia/Pacific Region, Melbourne, 2013: 86-92.
- [16] MASAFUMI 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.
- [17] 陈晓静, 张兴, 刘淳, 等. 光伏系统 2 种多峰值 MPPT 算法对比研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(5): 551-557.
- CHEN Xiaojing, ZHANG Xing, LIU Chun, et al. Comparative studies on two multi-peak MPPT algorithm of photovoltaic system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(5): 551-557.
- [18] 肖景良, 徐政, 林崇, 等. 局部阴影条件下光伏阵列的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 119-124.
- XIAO Jingliang, XU Zheng, LIN Chong, et al. Optimal design of photovoltaic arrays under partial shading[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 119-124.

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-05-11

作者简介:

吴志程(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: abcsjsa@126.com

江智军(1963—), 男, 学士, 教授, 研究方向为电力电子技术在微电网中的应用;

杨晓辉(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源在电力系统中的应用。

(编辑 周金梅)