应用于光储系统中的改进型扰动观察MPPT算法

郑含博^{1,2†}, 杜齐^{1,2}, 郭文豪³, 唐钰本², 崔耀辉², 覃团发³

(1. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004;

2. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘要:本文提出了一种改进的步长可变、稳态时无振荡的扰动观察MPPT算法,该改进算法在保持基本的扰动观察法简单以及便于实现特点的同时,还能停止稳态振荡并具备良好的追踪速度.该算法首先通过变步长实现快速跟踪最大功率点,当确定到达稳态之后,停止人工扰动,实现无振荡稳定输出功率,从而减少因振荡造成的功率损耗,提高了整个系统的效率.当外界环境突变时,该算法运用三点测量法可以根据电压、电流值的突变检测出工作条件的变化,并重置参数,从而降低重新追踪最大功率点的时间.由于光伏发电的随机性与波动性,通常将储能电池与光伏组件相结合,构成光储混合系统.为了结合实际,本文在MATLAB/Simulink中进行了光储混合系统的仿真与试验,试验结果验证了所提算法的性能.

关键词:最大功率点跟踪;可变步长;稳态无振荡;光储混合系统

引用格式: 郑含博, 杜齐, 郭文豪, 等. 应用于光储系统中的改进型扰动观察MPPT算法. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 491-498

DOI: 10.7641/CTA.2021.10663

Improved perturbation and observation MPPT algorithm applied to a hybrid photovoltaic energy storage system

ZHENG Han-bo^{1,2†}, DU Qi^{1,2}, GUO Wen-hao³, TANG Yu-ben², CUI Yao-hui², QIN Tuan-fa³

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment,

Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

3. College of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

Abstract: An improved perturbation and observation MPPT algorithm with variable step size and no oscillation in steady state is proposed in this paper. The improved algorithm not only keeps the basic perturbation and observation method simple and easy to implement, but also stops the steady-state oscillation and has good tracking speed. The proposed algorithm firstly achieves fast tracking of the maximum power point by changing the step size. When the steady state is determined, the artificial perturbation is stopped to achieve stable output power without oscillation, so as to reduce the power loss caused by oscillation and improve the efficiency of the whole system. When there is an abrupt change in the external environment, the algorithm can detect the change of working conditions according to the abrupt change of voltage and current values by using the three-point measurement method, and reset the parameters, so as to reduce the time of retracing the maximum power point. Due to the randomness and volatility of photovoltaic power generation, energy storage batteries and photovoltaic modules are usually combined to form a hybrid photovoltaic energy storage system. In order to match the actual situation, the simulation and experiment of the hybrid photovoltaic energy storage system are carried out in MATLAB/Simulink in this paper, and the experiment results verify the performance of the proposed algorithm.

Key words: MPPT algorithm; variable step size; steady state without oscillation; hybrid photovoltaic energy storage system

Citation: ZHENG Hanbo, DU Qi, GUO Wenhao, et al. Improved perturbation and observation MPPT algorithm applied to a hybrid photovoltaic energy storage system. *Control Theory & Applications*, 022, 39(3): 491 – 498

收稿日期: 2021-07-25; 录用日期: 2021-10-21.

[†]通信作者. E-mail: hanbozheng@163.com; Tel.: +86 19968011211.

本文责任编委:张潮海.

国家自然科学基金项目(51907034), 广西科技基地和人才专项科技资助项目(2020AC19010) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51907034) and the Specific Research Project of Guangxi for Research Bases and Talents (2020AC19010).

1 引言

近年来,为了应对化石能源日益枯竭、环境污染以 及气候变化等问题,清洁能源越来越受到国际社会的 重视.由于太阳能具有能源总量大、资源易开发、清洁 无污染等优点,光伏发电技术正在成为各国研究和利 用的重点^[1-2].由于光伏电池本身的输出特性受环境 条件(如太阳辐照度与温度)的影响,并且其伏安特性 曲线为非线性.为了提高光伏电池的发电效率,本文 引入了最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术^[3],使光伏电池获得最大功率输出.

MPPT算法种类繁多,其中目前使用最为广泛的为 扰动观察法(perturbation and observation method, P&O)^[4-7], 与电导增量法 (incremental conductance method, INC)^[8-11], 这是因为其算法简单易实现, 且可 以较好地达成追踪效果. 文献[12]通过理论和试验证 明了在静态和动态条件下, P&O和INC的跟踪性能基 本相同,考虑到它们具有相同的原理,表现出相同的 行为和性能,可以得出两种方法是等价的.由于传 统P&O与INC步长固定,导致其无法兼顾快速追踪最 大功率点以及稳态时保持低振荡. 当步长过大时, 稳 态振荡也会很大,系统稳定性变差且造成能量的损失; 当步长过小时,追踪最大功率点时间会增加,追踪效 果变差[13]. 此外,这两种方法在外界环境突变时会产 生较大波动,重新追踪到(maximum power point, MPP)耗时较长^[14].本文提出了一种改进型扰动观 察MPPT算法,该算法较之传统P&O和INC有着如下 优势:1) 通过变步长实现快速追踪MPP, 同时实现稳 态时无振荡; 2) 不需要额外增加传感器, 只通过电 压、电流变化情况感知外界条件突变; 3) 可以快速响 应外界环境突变时的最大功率点追踪; 4) 贴近实际情 况,在光储混合系统中可以良好运行.

2 光伏电池输出特性

图1为通过MATLAB中光伏(photovoltaic, PV)模 块得到的单个光伏电池的*I-U*和*P-U*特性曲线,它表 示了在特定的光照强度和温度条件下,光伏电池的输 出电流*I*(功率*P*)与输出电压*U*之间的关系.

其中,图1(a)为25°C时不同光照下*I*--U曲线图, (b)为25°C时不同光照下*P*--U曲线图,(c)为1000 W/m²光强时不同温度下*I*--U曲线图,(d)为1000 W/m²光强时不同温度下*P*--U曲线图.

由图1(b)和(d)可知,在同一光照强度与温度条件下,光伏电池的P-U曲线类似于一条抛物线,假设当光伏电池输出最大功率Pm时,输出电压为Um,输出电流为Im,则当光伏电池输出电压在0到Um时,输出功率随着输出电压的增大而增大,并且其斜率 dP/dU 先是接近于一条直线,然后逐渐减小直至变为0(此时输出功率为最大值Pm),之后斜率由0继续减小为负值,输

出功率开始逐渐降低.此外,随着光照强度的增加,光 伏电池输出的最大功率Pm也随之增加,随着外界温 度的增加,光伏电池输出的最大功率Pm随之减小,并 且光照强度较温度而言对最大功率Pm的影响更大.



由图1(a)和(c)可以看出,在同一光照与温度条件

电压在最大功率点电压Um的左侧,此时应该增大输

下.光伏电池的理论输出电压与输出电流可以是I-U特性曲线上的任意一点的情况,那么光伏电池的实 际输出电压与输出电流要怎么确定呢? 这取决于外部 负载阻抗的情况. 下面简单分析一下光伏电池的输出 原理[15]. 图2为光伏电池功率输出等效电路图, 可以把 光伏电池看作是一个有内阻 R_0 的电压为 U_0 的电压源, 其外部负载为可变电阻RL,则可以根据以下公式求出 实际输出电压与输出电流的值:

$$I = \frac{U_0}{R_0 + R_{\rm L}},$$
 (1)

$$U = U_0 \times \frac{R_{\rm L}}{R_0 + R_{\rm L}},\tag{2}$$

其中: U0表示该时刻光伏电池的内电压; R0表示光伏 电池的内电阻; RL表示外部负载的电阻; I表示光伏 电池的实际输出电流;U表示光伏电池的实际输出电 压.



power output

基于光伏电池的工作特性,引入了最大功率点跟 踪技术,在不同环境下通过控制算法及外部电路来调 节外部等效电阻的阻值,以此改变光伏电池的输出电 压与输出电流,从而让光伏电池持续保持最大功率输 出,并提高光伏电池的发电效率,将光伏能源最大化 转化为电能.

3 传统P&O介绍

传统P&O的原理就是引入一个小的变量,然后对 当前工作点状态进行观测,并与前一个状态进行比较, 根据比较的结果调节光伏电池的工作点[16].具体来说 就是,当增大(或减小)光伏电池的输出电压,然后对光 伏电池的输出电压和输出电流进行采样,并计算出对 应时刻的输出功率,将该功率与电压变化前的功率进 行比较,如果本次控制使功率增大,则继续增大(或减 小)光伏电池输出电压;如果本次控制使功率减小,则 反向减小(或增大)光伏电池输出电压,以此来使光伏 电池的输出功率一直向增大的方向变化,通过反复扰 动与观察,最终输出功率将达到最大值Pm,实现最大 功率输出[17].

基于以上原理,用 $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}$ 的值可以更方便地了解光伏 电池的工作状态并作出调节:1)当dP/dI/大于0时,输出

出电压; 2) 当 $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}$ 等于0时,输出电压即为最大功率点 电压 $U_{\rm m}$,此时应该保持输出电压不变; 3)当 $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}$ 小 于0时,输出电压在最大功率点电压Um的右侧,此时 应该减小输出电压[18].

图3为传统P&O的算法流程图.



Fig. 3 Flow chart of traditional P&O algorithm

图4为外界环境不变时,传统P&O的P-U曲线中 相应的工作点移动图.图4(a)为第1种情况,当工作点 由A点移动到B点时,此时电压增大,功率也增大, $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}$ 大于0,则工作点由B点继续向右移动至C点,此时 电压增大,而功率减小, dP/dU小于0,则工作点由C点向 左移动.由于传统P&O步长固定,所以最终稳态时工 作点按照A-B-C-B-A循环移动, 而输出功率同样在 $P_A, P_B, P_C之间波动, 最大波动范围为(P_B ~ P_C). 图$ 4(b)为第2种情况,当工作点由A点移动到B点时,此时 电压增大,而功率减小, $\frac{dP}{dU}$ 小于0,则工作点由B点向 左反向移动至A点,此时电压减小,而功率增大, $\frac{dP}{dU}$ 小于0,则工作点由A点继续向左移动至C点,此时 电压减小,功率也减小, $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}$ 大于0,则工作点由C点 向右反向移动至A点.最终稳态时工作点按照A-B-

A-C-A循环移动,输出功率在 P_A , P_B , P_C 之间波动, 最大波动范围的大小为($P_A \sim P_C$) ($P_B > P_C$ 时)或者 ($P_A \sim P_B$) ($P_C > P_B$ 时). 图4(c)为第3种情况,当工作 点由A点移动到B点时, B点刚好为最大功率点电压 U_m ,此时工作过程与第1种情况类似,最终稳态时工 作点按照A-B-C-B-A循环移动,最大波动范围为 ($P_B \sim P_C$),此时 P_B 为 P_m .





4 改进型P&O

改进型P&O在传统P&O的基础上作了一系列优化,弥补了传统P&O的诸多不足,以下对各种优化改进及其原理进行介绍.

4.1 追踪速度及稳态振荡优化

通过对传统P&O的原理了解,可以发现其追踪速

度与稳态时的振荡幅度都与步长有关, 当步长较大时, 系统可以更快速地追踪到最大功率点附近,但最终稳 态时其波动范围也会很大; 当步长较小时, 最终稳态 时的波动幅度会减小,但追踪到最大功率点附近花费 的时间会较长.为了解决这个矛盾,改进型P&O采用 了三段式自适应变步长的方法,为此本文引入了步长 变化系数k. 由光伏电池的P-U特性曲线, 可以发现光 伏电池的输出功率由0升至Pm的过程中,前面绝大部 分时间斜率 dP 近似于一个常量,并且其值非常接近 于此时的电流I,于是可以在这段时间令k > 1(具体 取值可以根据情况而定),使追踪速度大大加快.当工 作点在最大功率点附近时, 斜率 $\frac{dP}{dU}$ 在0附近变化, 于 是可以在 $\left|\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}\right| < n(n$ 为常数,具体取值可以根据情况 而定)时间段内令k < 1, 使稳态时功率波动幅度大幅 减小.在中间那段时间可以令k = 1.防止由于前期大 步长导致工作点直接越过最大功率点. 通过三段式自 适应变步长可以从整体上缩短追踪时间,并且大幅降 低稳态时振荡幅度.振荡幅度足够小后,光伏电池输 出功率已经非常接近于最大功率点,此时停止扰动, 让系统保持无振荡运行.

4.2 感知外界环境变化

传统P&O在外界环境发生突变后,会产生非常大 的波动,之后重新追踪最大功率点要花费很长的时间. 改进型P&O可以在不加入额外传感器设备的情况下, 仅通过电压,电流的变化情况识别出外部环境的变化, 并重新调节步长,使得系统可以更快的重新追踪到最 大功率点.图5为系统达到稳定时,光照环境由 1000 W/m²突变为500 W/m²时光伏电池的工作点变 化情况(A点到B点),以及光照环境由500 W/m²突变 为1000 W/m²时光伏电池的工作点变化情况(C点到D 点). 在第1章中本文分析了光伏电池的输出特性, 由 其可以得知当光照条件发生变化时,因为系统外部等 效电阻保持不变,所以外部等效电阻的I-U特性曲线 不变,所以光伏电池工作点将由A点变化到B点,由 C点变化到D点.由图5可以很容易地看出来,当环境 突变时,工作点的电压、电流、功率都随之发生了突 变.于是,本文利用三点测量法来判断外界环境是否 发生突变,其具体方法如下:假设a点时系统处于稳定, 其电流为I_a,随后的两次测量分别为b点和c点,电流 分别为 I_b 和 I_c , ΔI_1 为 I_b 与 I_a 差值的绝对值, ΔI_2 为 I_c 与 $I_{\rm b}$ 差值的绝对值, 令 ε 为一个较小的常数. 当环境没 有发生突变时, $\Delta I_1 < \varepsilon$, $\Delta I_2 < \varepsilon$. 当环境在b点之后 发生突变时, $\Delta I_1 < \varepsilon$, 但 $\Delta I_2 > \varepsilon$. 总的来说, 用前两 个点的电流差值来判断系统处于稳态,用后两个点的 电流差值来判断外界环境突变,这就是三点测量法. 可以用来判断出外部环境的突变情况.

第3期

4.3 改进型P&O算法流程图

基于以上的分析,改进型P&O的算法流程图如 图6.

5 仿真与分析

为了验证算法的可靠性,本章在MATLAB/Simulink中搭建了光储混合系统的仿真模型,如图7所示, 该模型主要由光伏阵列、Boost变换器、负载、储能锂



在仿真过程中,设定温度为25°C不变,光照强度 刚开始为800 W/m²,在1 s时从800 W/m² 跃变为 1 kW/m²,为了探究更大幅度的光照变化,在2 s 时 从1 kW/m² 跃变为400 W/m².在相同的仿真条件下 分别对传统P&O与改进型P&O进行仿真并对比. 图8为传统P&O与改进型P&O的输出电压与输出功率 的对比图.

电池以及MPPT控制器组成.其仿真参数如表1所示.



图 5 环境突变情况下工作点移动图





图 6 改进型P&O算法流程图 Fig. 6 Flow chart of improved P&O algorithm

Table 1 Optical storage hybrid system parameter table							
光伏阵列参数	数值	Boost变换器参数	数值	储能电池参数	数值		
最大输出功率Pm	100.2 kW	滤波电容 C_1	1000 uF	滤波电容C3	1000 uF		
最大功率点电压Um	290 V	储能电感 L_1	3.66 mH	电池电压 $U_{\rm b}$	350 V		
最大功率点电流 Im	345.45 A	滤波电容 C_2	3200 uF	电池容量 $Q_{\rm b}$	500 Ah		
开路电压 U_{oc}	363 V	负载R	6 Ω	初始荷电状态	45%		
短路电流 I_{sc}	368.48 A	开关频率f	5000 Hz	电池响应时间	1 s		



图 7 光储混合系统仿真模型图 Fig. 7 Simulation model of optical storage hybrid system





从图8可以得出以下数据,传统P&O与改进型 P&O在光照强度为800 W/m²时,从开始运行到追踪 到最大功率点耗时分别为0.046 s和0.034 s, 最终平均 输出功率分别为80.40 kW和 80.71 kW; 当光照强度 从800 W/m²跃变为1 kW/m²时,重新追踪到最大功率 点耗时分别为0.020 s和0.016 s, 最终平均输出功率分 别为99.71 kW和100.02 kW; 当环境发生更严重突变. 光照强度从1 kW/m²跃变为400 W/m²时,重新追踪到 最大功率点耗时分别为0.033 s和0.031 s, 最终平均输 出功率分别为40.45 kW和40.47 kW. 经过计算, 改进 型P&O相较于传统P&O输出功率提升效率最大达 到0.39%,追踪所耗时间最多缩短了26%.其仿真比较 结果如表2所示.由以上数据可以明显看出改进型 P&O相较于传统P&O能更快追踪到最大功率点,同时 追踪到最大功率点附近后能停止振荡,持续以较高功 率输出,从而减少功率损失,大大提高发电效率,并且 经过数据分析,提升效果随着光照强度的增加而愈发 显著.

图9为改进型P&O应用于光储混合系统时的储能 电池(state of charge, SOC)变化图,由图可知,储能电 池的SOC由初始的45%近线性地增长到45.0042% (1 s时);然后又以更大斜率近线性地增长到45.0113% (2 s 时);最后又近线性地减小到45.0093% (3 s时).之 所以会有如此变化,首先是因为当光照强度在 800 W/m²和1 kW/m²时,光伏阵列的发电功率大于负 载的用电功率,所以剩余电能会用于给储能电池充电, 曲线呈上升趋势,并且光照强度越大时,发电功率越大,因此充电速率更快,曲线斜率更大.然而当光照强度在400 W/m²时,光伏阵列输出功率不足以单独供应负载用电,此时储能电池同时给负载供电,所以在

2 s到3 s之间储能电池SOC下降.此外由于光照强度 不变时,光伏阵列稳态时输出功率恒定,所以储能电 池SOC变化情况接近线性.该仿真结果证实了改进型 P&O可以应用于实际光储混合系统中,具有实用价值.

表 2 仿真结果 Table 2 The simulation results

	平均输出功率/kW			追踪速度/s		
MPPT类型	光照强度 800 W/m ²	光照强度 1000 W/m ²	光照强度 400 W/m ²	启动	光照强度从800 W/m ² 阶跃到1000 W/m ²	光照强度从1000 W/m ² 阶跃到400 W/m ²
传统P&O 改进型P&O	80.40 80.71	99.71 100.02	40.45 40.47	0.046	0.020	0.033



Fig. 9 SOC change diagram of energy storage battery

6 结论

基于传统P&O无法同时兼顾追踪最大功率点速度 与稳态振荡,提出了一种改进的步长可变、稳态时无 振荡的扰动观察MPPT算法.改进型P&O通过三段式 自适应变步长来提高追踪速度,再通过检测输出功率 在最大功率点附近而停止扰动,达到消除稳态振荡的 目的,最后通过电压、电流的突变情况检测外界环境 的突变,之后通过变步长达到快速恢复追踪的目的. 本文还将该算法应用于光储混合系统之中,证明了其 在实际工程中的实用价值.

参考文献:

- XIN P Y. Comprehensive evaluation and application prospect of solar power generation technology. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [2] LI Fei, LI Canbing, SUN Kai, et al. Integrated configuration method of planning and operation for hybrid energy storage system in microgrid. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 453 460.
 (李斐, 黎灿兵, 孙凯, 等. 微电网中混合储能系统的规划运行一体化 配置方法. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 453 460.)
- [3] YANG Bo, ZHONG Linen, ZHU Dena, et al. Maximum power tracking of photovoltaic system with improved salp group algorithm under partial shading. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 339 –

352.

(杨博,钟林恩,朱德娜,等.部分遮蔽下改进樽海鞘群算法的光伏系 统最大功率跟踪.控制理论与应用,2019,36(3):339-352.)

- [4] WANG Shuzheng, LI Xianyun. Application of a new adaptive disturbance observation method in photovoltaic power generation MPPT strategy. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(9): 2393 2400.
 (王书征,李先允. 一种新型自适应扰动观察法在光伏发电MPPT策略中的应用. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2393 2400.)
- [5] AHMED J, SALAM Z. A modified P&O maximum power point tracking method with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(4): 1506 – 1515.
- [6] LI Xiangli, YAN Chaoyang, GAO Yanni, et al. Study on MPPT for observation of steady state without oscillation disturbance of photovoltaic system. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(12): 3014 – 3021.

(李向丽, 闫朝阳, 高燕妮, 等. 光伏系统稳态无振荡扰动观察MPPT 研究. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3014 – 3021.)

[7] DANG Xuanju, YANG Yang, JIANG Hui, et al. Adaptive step size disturbance observation method MPPT control based on incomplete differentiation. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(12): 3022 – 3029.

(党选举,杨阳,姜辉,等.基于不完全微分的自适应步长扰动观察法 MPPT控制.太阳能学报,2016,37(12):3022-3029.)

- [8] WEI Dong, WANG Yangkang, CHANG Yawen. A variable step size MPPT algorithm based on incremental conductance method. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(5): 1277 – 1283.
 (卫东, 王央康, 常亚文. 一种基于增量电导法的变步长MPPT算法. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1277 – 1283.)
- [9] RAMOS-HERNANZ J A, LOPEZ-GUEDE J M, ZULUETA-GUERRERO E, et al. Study of the behavior of the incremental conductance algorithm for MPPT. *The 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI).* Ploiesti: IEEE, 2016, 7: 1 – 6.
- [10] ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on improved variable step length conductance increment method. *Power System Technology*, 2015, 39(6): 1491 – 1498.
 (周东宝,陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪 策略. 电网技术, 2015, 39(6): 1491 – 1498.)
- [11] ALI M N, MAHMOUD K, LEHTONEN M. An efficient fuzzylogic based variable-step incremental conductance MPPT method for

grid-connected PV systems. *IEEE Access*, 2021, DOI: 10.1109/AC-CESS.2021.3058052.

- [12] SERA D, MATHE L, KEREKES T. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(3): 1070 – 1078.
- [13] ABOUADANE H, FAKKAR A, SERA D. Multiple-power-sample based P&O MPPT for fast-changing irradiance conditions for a simple implementation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, 10(5): 1 – 8.
- [14] BHATTACHARYYA S, PATNAM D, SAMANTA S. Steady output and fast tracking MPPT (SOFT MPPT) for P&O and InC algorithms. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 12(1): 293 – 302.
- [15] KONG F. Research on maximum power point tracking control strategy of photovoltaic power generation system. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [16] WANG J P. Research on MPPT optimization technology of photovoltaic power generation system. Lanzhou: Lanzhou University Of Technology, 2020.
- [17] ALKHAWALDEH L, BHUIYA M A, EID M. An enhanced EPP-MPPT algorithm with modified control technique in solar-based inverter applications: analysis and experimentation. *IEEE Access*, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049517.

[18] MOHAMMADINODOUSHAN M, ABBASSI R, JERBI H. A new MPPT design using variable step size perturb and observe method for PV system under partially shaded conditions by modified shuffled frog leaping algorithm-SMC controller. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45(10): 101056.

作者简介:

郑含博 副教授,博士生导师,目前研究方向为电力设备在线监测 与智能诊断、电工绝缘新材料和智能配电网, E-mail: hanbozheng@ 163.com;

杜 齐 硕士研究生,目前研究方向为智能配电网,E-mail: d_q 1573149783@163.com;

郭文豪硕士研究生,目前研究方向为智能微电网信息工程, E-mail: wenhaoguo@st.gxu.edu.cn;

唐钰本硕士研究生,目前研究方向为智能配电网, E-mail: yuben_tang@163.com;

崔耀辉 硕士研究生,目前研究方向为电力设备智能诊断,E-mail: lpcyh123@163.com;

覃团发 教授,博士生导师,目前研究方向为智能电网信息工程、 无线多媒体通信, E-mail: tfqin@gxu.edu.cn.