

一种改进 MPPT 的四级充电控制策略<sup>\*</sup>许晓辉 李海虹 张 彬 张延军  
(太原科技大学机械工程学院 太原 030024)

**摘 要:** 针对传统蓄电池三级充电方式存在的功率输入不稳定、随机性大的问题,本研究提出一种基于扰动观察法(POM)的变步长扰动观察法的最大功率点追踪(VSS-POM-MPPT)算法与四级充电算法相结合的光伏储能充电控制策略。通过搭建光伏模型,对 VSS-POM 与 POM 的最大功率点追踪(MPPT)的跟踪速度进行对比,同时以稳压精度和稳流精度作为光伏电池为蓄电池充电时的性能评价指标。完成基于 VSS-POM-MPPT 算法的控制器程序设计,进行光伏电池向蓄电池充电实验验证。实验结果表明,VSS-POM-MPPT 相较于 POM-MPPT 在追踪到最大功率点时的用时减少了 0.008 s,速度提升了 24.3%;实验记录的蓄电池充电数据与本研究设计的充电算法一致,稳压精度和稳流精度分别为 $\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.8\%$ ,满足电力行业标准即 $\pm(0.5\%\sim 1\%)$ 、 $\pm(1\%\sim 2\%)$ 。

**关键词:** MPPT;变步长扰动观察法;四级充电控制策略;蓄电池

**中图分类号:** TM615;TP18;TN713 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Research on four-level charging control strategy  
based on improved MPPT algorithm

Xu Xiaohui Li Haihong Zhang Bin Zhang Yanjun

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of unstable and random power input in the traditional three-stage charging method of battery, this study proposes a photovoltaic energy storage charging control strategy based on the maximum power point tracking (VSS-POM-MPPT) algorithm of variable step perturbation observation method based on perturbation observation method (POM) and the four-stage charging algorithm. By building a photovoltaic model, the tracking speed of maximum power point tracking (MPPT) of VSS-POM and POM is compared. At the same time, the voltage stabilization accuracy and current stabilization accuracy are used as the performance evaluation indexes of photovoltaic cells for battery charging. The controller program design based on VSS-POM-MPPT algorithm is completed, and the charging experiment of photovoltaic cell to battery is carried out. The experimental results show that the time of VSS-POM-MPPT is 0.008 s less than that of POM-MPPT when tracking the maximum power point, and the speed is increased by 24.3%. The battery charging data recorded in the experiment is consistent with the charging algorithm designed in this study. The voltage stabilization accuracy and current stabilization accuracy are  $\pm 0.4\%$  and  $\pm 0.8\%$ , respectively, which meet the power industry standards of  $\pm(0.5\%\sim 1\%)$  and  $\pm(1\%\sim 2\%)$ .

**Keywords:** MPPT;variable step size perturbation observation method;four-stage charging control strategy;battery

## 0 引 言

独立光伏发电系统易受太阳辐射、天气和温度影响,发电不稳定,影响供电并加速蓄电池老化<sup>[1]</sup>,因此采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术以追求功率最大点,提高发电效率。目前常用的 MPPT 算法,如扰动观察法(perturbation and observation method,

POM)<sup>[2]</sup>,实现简单,有非常好的控制性能,但容易在最大功率点附近产生振荡,在光强突变时失去追踪能力。

传统蓄电池的充电方式为三段式,即:恒流充电、恒压充电和浮动充电<sup>[3]</sup>。但固定充电曲线没有考虑光伏输入的不稳定性和高随机性对蓄电池充电过程的影响,不稳定的电源供给会导致充电电压过高或充电电流不足,也会在光伏电池因长时间日照不足而无电源供给时导致蓄电池过放电<sup>[4]</sup>。

在 MPPT 算法和充电策略的研究上,Sharaf 等<sup>[5]</sup>采用神经网络算法寻找最大功率点,优化直流微电网控制,提高了其稳定性与鲁棒性;Chitita 等<sup>[6]</sup>采用电导算法寻找最大功率点并引入基于光伏电池功率变化的步长尺寸,以提高跟踪精度和收敛速度;孟青等<sup>[7]</sup>提出了一种三闭环柔性充放电控制方法,增强了蓄电池的储能效果并延长其使用寿命。但该方法仍沿用连续充电方式;Cheng 等<sup>[8]</sup>提出外部触发与内部自控的电源管理电路,利用半导体开关与电容器充放电,实现智能电源管理;王义等<sup>[9]</sup>利用动力电池能量损耗和充电时间的目标方程,提出一种动力电池多段恒流充电方法,均衡动力电池的充电时间和温升;侯旭刚等<sup>[10]</sup>结合超级电容响应速度快,输出功率高但容量小而蓄电池响应速度慢但容量大的特点提出了一种混合储能功率控制策略,以降低蓄电池输出功率和充放电次数来提高使用寿命;曹杰等<sup>[11]</sup>针对光储直流微电网的不同变换器提出协调控制策略,结合超级电容与蓄电池的互补特性设计混合储能系统,并划分多种运行模式,实现系统在各模式下的平滑稳定切换,并有效管控了随机可再生能源和波动负载;李怡等<sup>[12]</sup>基于虚拟同步发电机(VSG)原理,提出了一种混合储能的功率分配方法,解决了一阶低通滤波器截止频率设计难的问题,并引入荷电状态(SOC)调节系数的虚拟惯性自适应控制策略,优化了储能系统性能,提升了 VSG 技术的实用性;闫承山等<sup>[13]</sup>提出一种直流微电网电压稳定策略,采用多组储能动态调节,结合自适应下垂控制和前馈补偿,根据储能状态及电压自动调整功率分配和变流器状态,确保系统稳定,实现功率平衡。谭喜文等<sup>[14]</sup>提出了一种基于电压倍增器的电压均衡拓扑,通过复用半桥逆变电路集成的方式以减小储能系统的体积和成本;张朝龙等<sup>[15]</sup>提出了一种基于增量能量法和双向门控循环网络(BiGRU)-Dropout 的锂离子电池健康状态估计方法以精确估计锂离子电池健康状态;戴冬冰等<sup>[16]</sup>提出了脉冲宽度调制(PWM)控制和 PID 控制均衡器两种新型均衡器电路以达到对电池的动态均衡充电和放电,延长电池的寿命。

目前在光伏电池为蓄电池充电过程中仍存在功率不稳定、随机性大的问题,本文提出一种基于 POM 的变步长扰动观察法(variable step size perturbation and observation method, VSS-POM)最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法(VSS-POM-MPPT)与四级充电算法相结合的充电控制策略以改善该问题。

## 1 小型独立光伏发电系统设计

### 1.1 小型独立光伏发电系统结构

典型的独立光伏发电系统的结构如图 1 所示。该系统的主要组成部分包括光伏阵列(光伏电池板)、逆变器(直流电转交流电)、储能设备(胶体蓄电池)、控制系统(电力控制系统/MPPT 控制器)等。该系统控制策略包括 MPPT 控制算法和胶体蓄电池的管理系统。

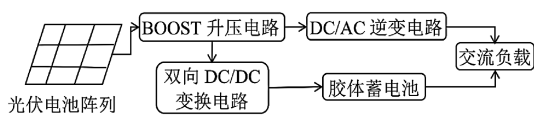


图 1 光伏控制系统组成框图

Fig. 1 The block diagram of photovoltaic control system

### 1.2 光伏电池模型

根据电子学理论,太阳能电池的等效数学模型为:

$$I = I_L - I_0 (O_1 - 1) - \frac{U_0 + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$O_1 = \exp \left[ \frac{q(U_0 + IR_s)}{AKT} \right] \quad (2)$$

式中:  $I_L$  是光电流的反饱和电流;  $I_0$  是二极管的反饱和电流;  $A$  是二极管因子;  $K$  是波尔兹曼常数  $1.23 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  是绝对温度;  $q$  是电子电荷量  $1.6 \times 10^{19}$  C;  $R_s$  是串联电阻;  $R_{sh}$  是并联电阻<sup>[17]</sup>。

式(1)、(2)中的  $I_L$ 、 $I_0$ 、 $R_{sh}$ 、 $R_s$  和  $A$  不仅与电池温度和光照强度有关,而且具体数值难以确定,因此本文在式(1)和式(2)的基础上,进一步简化该数学模型,即:

$$\begin{cases} I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left( - \frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \\ C_2 = \left( \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_{sc}$  是短路电流;  $V_{oc}$  是开路电压;  $I_m$  是最大电流;  $V_m$  是最大电压。由式(3)可知,光伏电池的特性主要与  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$  以及  $V_m$  这 4 个参数有关。通过引入经典补偿系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ <sup>[18]</sup>,可以得到任何温度  $T$  和光照强度  $S$  下的 4 个参数,即:

$$\begin{cases} I_{sc} = I_{sref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ V_{oc} = V_{ocref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \\ I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ V_m = V_{mref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

式中:太阳参考辐射强度  $S_{ref}$  是  $1000$  W/m<sup>2</sup>;  $\Delta T = T - T_{ref}$  是实际温度与参考温度之间的差值;  $e$  是自然对数的底数; 其中  $a = 0.0025$  °C<sup>-1</sup>,  $b = 0.005$  (W/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>,  $c = 0.00288$  °C<sup>-1</sup>。

由式(4)可知,当光伏电池所受到的  $S$  和  $T$  发生变化时,可以近似的计算出  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$  以及  $V_m$ ,同时可由式(3)计算得出光伏电池在任意  $S$  和  $T$  下的输出特性,其输出特性曲线如图 2 所示。因此,为将光伏电池输出功率最大化,需全面考虑多变的外部环境因素<sup>[19-20]</sup>。

## 2 光伏电池最大功率点跟踪分析

由式(3)和式(4)可知,光伏电池阵列的最大功率点受多重复杂且动态变化的外部环境因素制约。因此,本文控

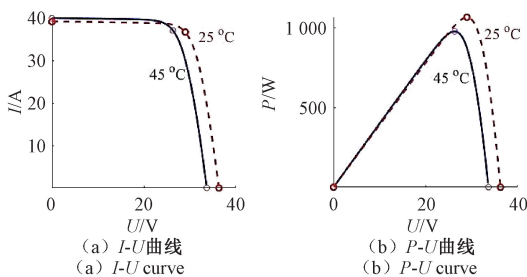


图 2 光强恒定下的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curve under constant light intensity

制策略的关键在于迅速定位光伏电池的最优功率输出点,以应对环境的实时变化。

### 2.1 变步长扰动观察的最大功率点模型

针对 POM 的跟踪精度与跟踪速度成正相关的问题,本文提出 VSS-POM 用来实现 MPPT。由图 2 的  $P-U$  输出特性曲线图可知:功率对电压的导数即  $dP/dU$  为实时变化值,将  $dP/dU$  引入到扰动观察法中,如式(5)所示。

$$U_{ref} = U_{ref} + \alpha \frac{dP}{dU} = U_{ref} + \alpha \frac{P_k - P_{k-1}}{U_k - U_{k-1}} \quad (5)$$

式(5)中,引入了一个变步长速度因子  $\alpha$  作为比例系数,用于衡量变步长的灵活性并优化跟踪速度。由式(5)可知,光伏输出功率与最大输出功率间的差值决定了跟踪步长的调整:差值大则步长增加,差值小则步长减小;设定了一个无限小的正数阈值  $\epsilon$ ,用于判断  $U_k$  与  $U_{k-1}$  之间差值是否接近零,若判断为零,则视为已达最大功率,停止扰动;若不为零,则依据式(5)调整步长及计算策略。VSS-POM-MPPT 的控制实现流程图如图 3 所示。

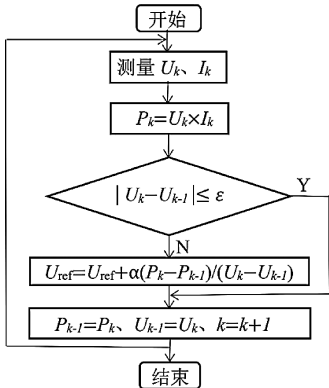


图 3 VSS-POM-MPPT 流程图

Fig. 3 VSS-POM-MPPT flow chart

### 2.2 充电控制策略

本文将 MPPT 与常规分段充电方法相结合,增加第 4 段即预充电阶段。

1)检测电池是否处于过放电状态,若过放电,则采用 0.05 C 的电流对电池执行涓流预充电操作,旨在激活电池。

2)激活电池后,系统即进入恒流充电阶段。由于电池

存在最大充电电流( $I_{max}$ )限制,光伏输出需与电池接收能力相匹配。若光伏功率过剩,则限制充电电流( $I_{bat}$ )至安全阈值,此时系统偏离 MPPT 模式。反之,若光伏功率不足,则启用 MPPT 模式,确保  $I_{bat}$  在限制内,且低于最大值。

3)MPPT 恒流充电期间,电池电压递增至设定最大充电电压( $U_{max}$ )后,转至恒压充电。此阶段,  $I_{bat}$  随充电进程递减。当电流降至特定阈值( $I_{off}$ ),调整充电电压( $U_{bat}$ )至低水平,实施涓流浮充策略,以保证电池状态。上述充电控制策略的充电流程图如图 4 所示。

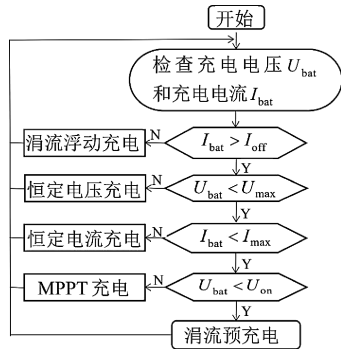


图 4 充电流程图

Fig. 4 Charging flow chart

## 3 仿真与验证

### 3.1 变步长扰动观察法的仿真

在 Matlab/Simulink 中搭建光伏发电模型。以宿迁市润裕电子科技有限公司 100 W 的光伏板为依据,具体参数如表 1 所示。

表 1 100 W 光伏电池参数

Table 1 100 W photovoltaic cell parameters

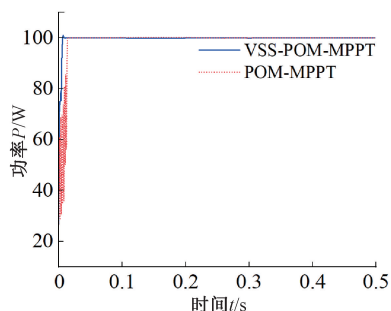
名称	参数
开路电压( $V_{oc}$ )/V	22
短路电流( $I_{sc}$ )/A	5.8
最大功率( $P$ )/W	100
转换效率( $\eta$ )/%	17.8

对搭建的模型设置  $T$  和  $S$  两个环境变量,验证改进算法的最大功率点追踪性能。

$T$  和  $S$  恒定,分别为 25℃ 和 1 000 W/m<sup>2</sup>,追踪结果如图 5 所示。

实验时间为 1 s,由追踪结果可知,在  $T$  和  $S$  恒定的情况下,VSS-POM-MPPT 相较于 POM-MPPT 在追踪到最大功率点时的用时减少了 0.008 s,速度提升了 24.3%。

当环境发生突变时,光伏电池的输出功率亦会随之变动。为了验证 VSS-POM-MPPT 是否具备迅速且稳定地追踪最大功率的能力,首先,在  $T$  恒定为 25℃ 的条件下,当时间达到 0.3 s 时,将  $S$  从 1 000 W/m<sup>2</sup> 调整为 800 W/m<sup>2</sup>,并应用改进后的算法进行对比分析,追踪结果如图 6(a)所

图 5  $T$  恒定,  $S$  恒定的追踪结果Fig. 5  $T$  constant,  $S$  constant tracking results

示;其次,在  $S$  保持在  $1\,000\text{ W/m}^2$  不变的情况下,同样在  $0.3\text{ s}$  时,将  $T$  从  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  提升至  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再次运用改进后的算法进行功率计算,追踪结果如图 6(b)所示。

根据图 6(a)所示的追踪结果,可以得出,当外界  $S$  短时间内减少  $200\text{ W/m}^2$  时,VSS-POM-MPPT 仅需  $0.021\text{ s}$  便能追踪到最大功率点。同样,图 6(b)的追踪结果也显示,当  $T$  上升  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,该方法也仅需  $0.025\text{ s}$  即可追踪到最大功率点。因此,无论是  $S$  还是  $T$  发生突变,VSS-POM-MPPT 都能够迅速追踪到最大功率点,这一结果验证了该算法的可行性和有效性。

### 3.2 稳压和稳流精度测试

光伏电池在为蓄电充电过程中最重要的是控制充电电压( $V_{in}$ )和充电电流( $I_{in}$ ),因此需要进行稳压精度( $\Delta_V$ )和稳流精度( $\Delta_I$ )测试,以验证所采用的控制策略是否满足控制要求。在本项研究中,根据光伏电池的输出电压特性与蓄电池的充电要求,将光伏电池输出电压( $V_{out}$ )设定为 3 个不

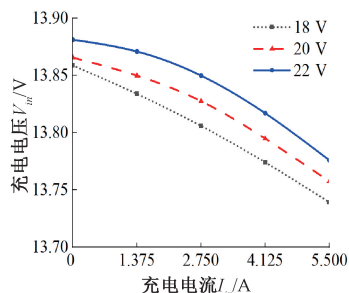
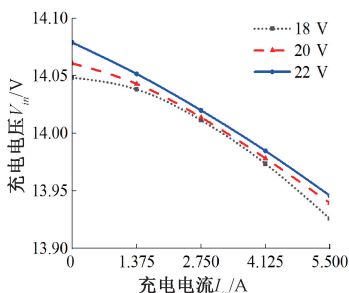
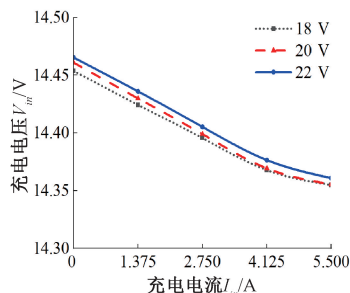
(a) 13.8 V 设定电压  
(a) 13.8 V set voltage(b) 14 V 设定电压  
(b) 14 V set voltage(c) 14.4 V 设定电压  
(c) 14.4 V set voltage

图 7 不同设定充电电压下的实测充电电压

Fig. 7 The measured charging voltage under different setting charging voltage

从图 7 可知,在不同负载条件下,蓄电池的  $V_{in}$  会表现不同的特性:在无负载状态下, $V_{in}$  会小幅度超出预设  $V_{in}$  水平;而当负载达到中等程度时, $V_{in}$  则最为接近标准  $V_{in}$  值;至于高负载运作时, $V_{in}$  则会有所下降,低于原定的设定  $V_{in}$ 。不同预设  $V_{in}$  的  $\Delta_V$  结果如图 8 所示。

由图 8 可知,设定  $V_{in}$  为  $13.8\text{ V}$  时, $\Delta_V$  在  $-0.28\% \sim 0.27\%$  之间,设定  $V_{in}$  为  $14\text{ V}$  时, $\Delta_V$  在  $-0.22\% \sim 0.32\%$  之间,设定  $V_{in}$  为  $14.4\text{ V}$  时, $\Delta_V$  在  $-0.11\% \sim$

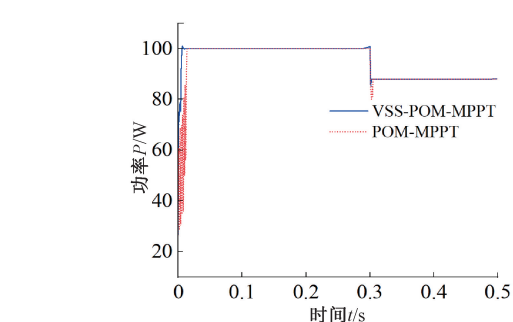
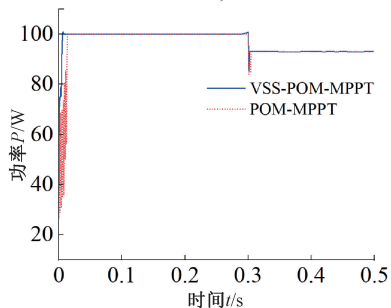
(a)  $T$  恒定,  $S$  突变  
(a)  $T$  constant,  $S$  mutation(b)  $T$  突变,  $S$  恒定  
(b)  $T$  mutation,  $S$  constant

图 6 外界环境突然改变时的跟踪结果

Fig. 6 Tracking results when the external environment suddenly changes

同的水平:  $18\text{ V}$ 、 $20\text{ V}$  以及  $22\text{ V}$ 。同时,通过负载设备,将  $I_{in}$  调节至  $0\text{ A}$ 、 $2.75\text{ A}$  和  $5.5\text{ A}$  这 3 个档位。除此之外,为了进行  $\Delta_V$  的测试,分别将  $V_{in}$  设定为  $13.8\text{ V}$ 、 $14\text{ V}$  和  $14.4\text{ V}$ 。相关的测试结果如图 7 所示。

$0.31\%$  之间,即  $\Delta_V$  在  $\pm 0.4\%$ ,满足电力行业标准即  $\pm(0.5\% \sim 1\%)$ 。

使用直流电源将  $V_{out}$  分别设置为  $18$ 、 $20$ 、 $22\text{ V}$ ,为了进行  $\Delta_I$  测试,将  $V_{in}$  分别设置为  $13.8$ 、 $14$ 、 $14.4\text{ V}$ ,使用负载将  $I_{in}$  设定为  $2.75$ 、 $4.125$ 、 $5.5\text{ A}$ 。结果如图 9 所示。

设定  $I_{in}$  为  $2.75\text{ A}$  时的  $\Delta_I$  在  $-0.79\% \sim 0.78\%$ ;设定  $I_{in}$  为  $4.125\text{ A}$  时的  $\Delta_I$  在  $-0.69\% \sim 0.61\%$ ;设定  $I_{in}$  在  $5.5\text{ A}$  时的  $\Delta_I$  为  $0.19\% \sim 0.61\%$ 。



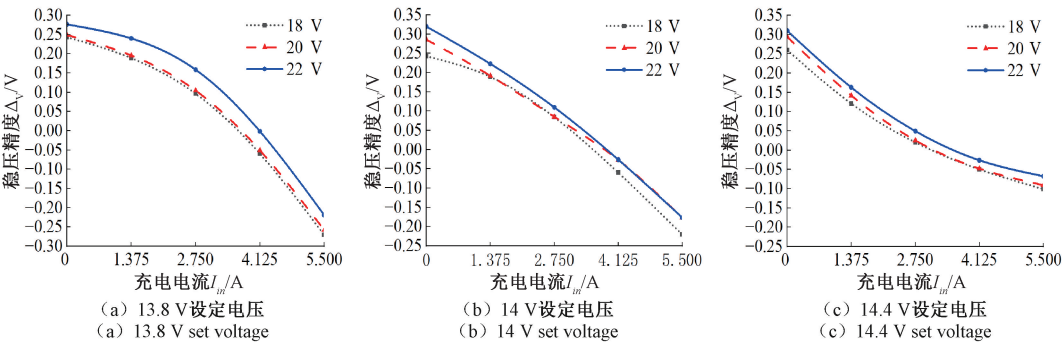


图 8 不同设定电压下稳压精度

Fig. 8 Voltage stabilization accuracy under different set voltages

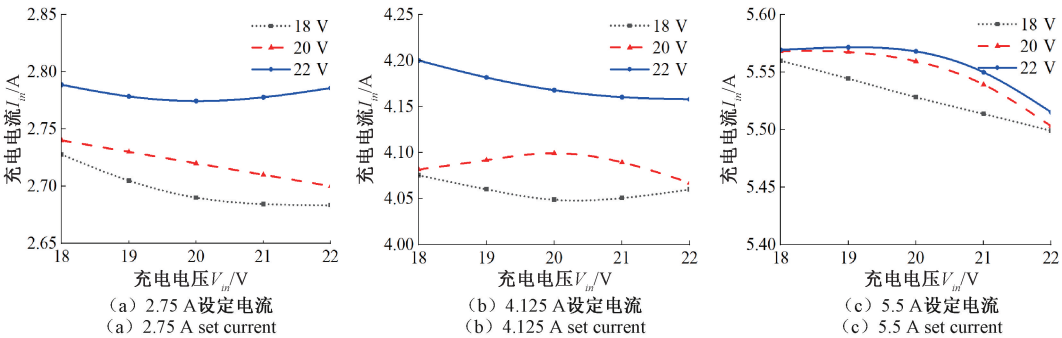


图 9 不同设定充电电流下的实测充电电流

Fig. 9 The measured charging current under different setting charging current

如图 10 所示为不同设定  $I_{in}$  下的  $\Delta_I$ 。结果表明,  $I_{in}$  越高,  $\Delta_I$  越高,  $\Delta_I$  为  $\pm 0.8\%$ , 满足电力行业标准即  $\pm(1\% \sim 2\%)$ 。

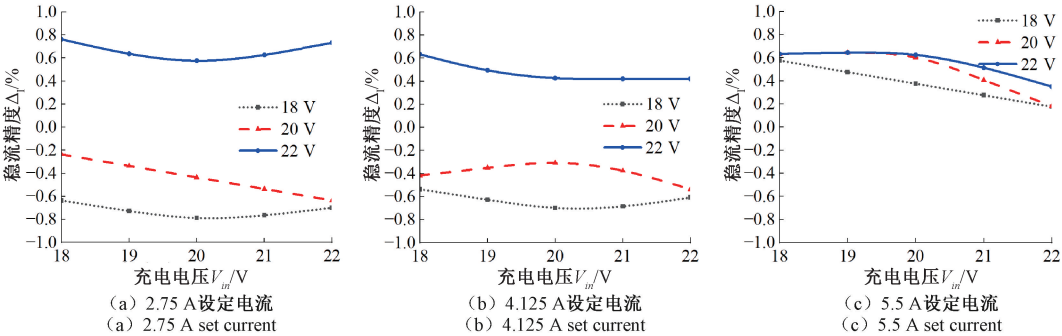


图 10 不同设定电流下稳流精度

Fig. 10 Steady current accuracy under different set current

3.3 实验充电数据采集

为验证本文提出的充电策略,进行户外蓄电池充电实验,该实验系统主要器件有光伏电池、MPPT 控制器、逆变器、万用表、灯泡、蓄电池。实验采用的光伏电池具体参数如表 1 所示,蓄电池具体参数如表 2 所示。实验示意图如图 11 所示。

在上午 11 时到下午 3 时,室外温度在  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,室外空间开阔无遮挡,每 15 min 记录一次蓄电池的充电电压和充电电流,总用时 240 min,记录数据部分如表 3 所示。

表 2 蓄电池参数

Table 2 Battery parameters

名称	参数
容量/Ah	65
电压/V	12
充电电压/V	14.4
浮充电压/V	13.8
终止电压/V	10.8

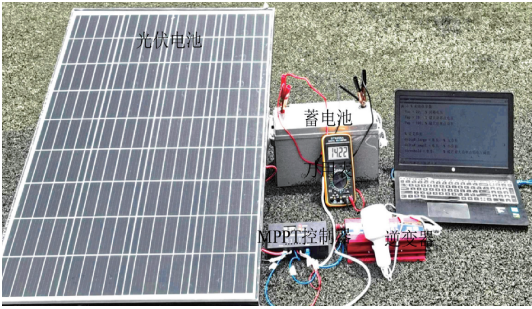


图 11 蓄电池充电实验示意图

Fig. 11 Charging experiment diagram of battery

表 3 充电电压与充电电流

Table 3 Charging voltage and charging current

时间/min	充电电压/V	充电电流/A
0	12.0	5.00
15	13.0	4.80
90	14.4	3.00
150	14.0	1.20
195	13.8	0.50
240	13.8	0.01

将上述记录的充电电压数据和充电电流数据分别进行曲线表达,结果如图 12 所示。

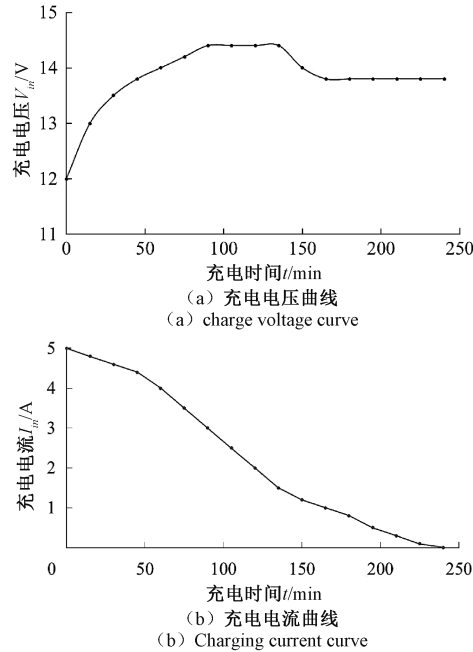


图 12 充电电压和充电电流曲线

Fig. 12 Charging voltage and charging current curve

由图 12 的实验结果可知,随着充电时间的增加,蓄电池处在 MPPT 恒流充电阶段时,电池电压慢慢升高,当充电电压升高到最大充电电压时,进入恒压充电,充电曲线

如图 12(a)所示,充电电流缓慢下降,如图 12(b)所示,在恒压充电阶段,充电电流减小到一定值时,充电电压减小进行涓流浮,如图 12(a)和(b)所示。即实际充电过程与本文设计的四级充电算法一致,说明该充电策略是有效可行的。

4 结 论

为改善光伏储能系统里光伏电池在为蓄电池充电过程中光伏输入不稳定、随机性大的问题,本文基于 POM 提出 VSS-POM-MPPT 算法与四级充电控制算法相结合的四级充电控制策略,通过实验验证表明,VSS-POM-MPPT 相较于 POM-MPPT 在追踪最大功率点方面速度更快;同时,蓄电池充电过程中,稳压与稳流精度均满足电力行业标准,实验记录的蓄电池充电数据与本研究设计的充电算法一致,验证了该策略的有效性和实用性。

参考文献

[1] 高圣伟,祝庆同.一种独立光储发电系统用宽输入范围非隔离三端口变换器[J].电工技术学报,2023,38(4): 970-982.  
GAO SH W, ZHU Q T. A non-isolated three-port converter with wide input range for independent optical storage power generation system [J]. Journal of Electrical Technology, 2023, 38(4): 970-982.

[2] 马永翔,王雨阳,闫群民,等.基于 CSA 算法的光伏阵列多峰最大功率跟踪研究[J].电源技术,2021,45(1): 51-55.  
MA Y X, WANG Y Y, YAN Q M, et al. Research on multi-peak maximum power tracking of photovoltaic array based on CSA algorithm[J]. Power Technology, 2021,45(1): 51-55.

[3] 唐鑫,欧阳权,黄俊卉,等.基于深度强化学习的锂电池快速充电控制策略[J].机械工程学报,2022, 58(22):69-78.  
TANG X, OUYANG Q, HUANG L H, et al. A lithium battery fast charging control strategy based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(22): 69-78.

[4] DEU A C, COULAND T. Control unit for battery charge management in electric vehicles (EVs) [J]. Future Transportation,2024, 4(2):429.

[5] SHARF M A, ARMUGHAN H, ALI N, et al. Hybrid control of the DC microgrid using deep neural networks and global terminal sliding mode control with the exponential reaching law [J]. Sensors, 2023, 23(23):9342.

- [6] CHTITA S, MOTAHHIR S, GHAIZAL A E. A new design and embedded implementation of a low-cost maximum power point tracking charge controller for stand-alone photovoltaic systems [J]. *Energy Technology: Generation, Conversion, Storage, Distribution*, 2024, 12(4): 2301324.
- [7] 孟青, 杨智菲, 许超, 等. 基于离网微电网系统的光伏逆变控制策略研究[J]. *电工技术*, 2024(4): 4-9.
- MENG Q, YANG ZH F, XU CH, et al. Research on photovoltaic inverter control strategy based on off-grid microgrid system [J]. *Electrical Technology*, 2024(4): 4-9.
- [8] CHENG Y Y, YONG C. A power management circuit based on autonomous control[J]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, 1237(4): 042067.
- [9] 王义, 刘欣, 高德欣. 电动汽车大功率充电设备的多段恒流充电方法[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(24): 20-25.
- WANG Y, LIU X, GAO D X. Multi-stage constant current charging method for high-power electric vehicle charging equipment [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(24): 20-25.
- [10] 侯旭刚, 王嘉梅. 混合储能系统平抑光伏功率波动控制策略[J]. *计算机与数字工程*, 2024, 52(7): 2009-2014.
- HOU X G, WANG J M. Control strategy of hybrid energy storage system to stabilize photovoltaic power fluctuation[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2024, 52(7): 2009-2014.
- [11] 曹杰, 王维庆, 王海云. 光储直流微电网系统协调控制策略研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(4): 29-34.
- CAO J, WANG W Q, WANG H Y. Research on coordinated control strategy of optical storage DC microgrid system [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2024, 61(4): 29-34.
- [12] 李怡, 李永丽, 李松, 等. 基于 VSG 的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(7): 27-34.
- LI Y, LI Y L, LI S, et al. Power allocation and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage systems based on VSG [J]. *Power Automation Equipment*, 2023, 43(7): 27-34.
- [13] 闫承山, 邱明泉, 张立军, 等. 基于多组储能动态调节的直流微电网电压稳定控制策略[J]. *电气传动*, 2023, 53(3): 48-55, 63.
- YAN CH SH, QIU M Q, ZHANG L J, et al. Voltage stability control strategy of DC microgrid based on dynamic regulation of multiple sets of energy storage[J]. *Electric Drive*, 2023, 53(3): 48-55, 63.
- [14] 谭喜文, 陈渊睿, 廖武兵, 等. 基于电压倍增器的混合储能系统电压均衡方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 163-171.
- TAN X W, CHEN Y R, LIAO W B, et al. Voltage balancing method of hybrid energy storage system based on voltage multiplier [J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 44(3): 163-171.
- [15] 张朝龙, 罗来劲, 刘惠汉, 等. 基于增量能量法和 BiGRU-Dropout 的锂电池健康状态估计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(1): 167-176.
- ZHANG CH L, LUO L J, LIU H H, et al. Lithium battery health state estimation based on incremental energy method and BiGRU-Dropout [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(1): 167-176.
- [16] 戴冬冰, 冯冬梅, 张军, 等. 动力电池均衡充放电系统的研究和设计[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(11): 111-115.
- DAI D B, FENG D M, ZHANG J, et al. Research and design of balanced charging and discharging system for power battery [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(11): 111-115.
- [17] 吴艳娟, 刘振朝, 王云亮. 基于 IPOA 的太阳电池模型参数辨识[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(1): 1-10.
- WU Y J, LIU ZH CH, WANG Y L. Parameter identification of solar cell model based on IPOA [J]. *Journal of Solar Energy*, 2024, 45(1): 1-10.
- [18] 郭春平, 汤寅琪, 林思伟. 基于模糊控制的变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(19): 145-151.
- GUO CH P, TANG Y Q, LIN S W. Maximum power point tracking strategy of variable step size incremental conductance method based on fuzzy control [J]. *Modern Electronic Technology*, 2022, 45(19): 145-151.
- [19] MHAMMED Z, El K A, El A M. Mathematical models to forecast temporal variations of power law shape parameters of a PV module working in real weather conditions: Prediction of maximum power and comparison with single-diode model[J]. *Solar Energy*, 2023, 266: 112197.

[20] ÇIRAK C R, ÇALIK H. Hotspots in maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems-A comprehensive and comparative review[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal,2023,43: 101436.

作者简介

许晓辉,硕士研究生,主要研究方向为光伏系统与机械系统集成。  
E-mail:1055218090@qq.com

李海虹(通信作者),教授,主要研究方向为机构动力学、机器人学、智能制造技术、测试技术等。  
E-mail:haihongli@tyust.edu.cn

张彬,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人自主导航与路径规划技术。  
E-mail:1154786078@qq.com

张延军,教授,主要研究方向为机电液符合传动、智能控制技术 & 装备、机器人系统工程与控制技术。  
E-mail:hebei0735@126.com