

# 基于功率预测的变步长扰动观察法 MPPT 控制策略研究

林 义, 何通能

(浙江工业大学 信息学院 电子信息与智能系统研究所, 杭州 310023)

**摘要:** 针对传统扰动观察法存在步长选择困难和“误判”问题, 提出了一种基于功率预测的变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略; 该算法首先通过功率预测法判断扰动的方向, 避免“误判”, 然后再通过变步长扰动观察法对最大功率点进行精确定位; 在 Matlab/Simulink 平台上搭建 MPPT 仿真模型, 仿真结果表明: 该算法在追踪最大功率点过程中, 不但具有良好的动态性能, 而且有效改善了传统扰动观察法存在的振荡和“误判”问题, 对提高太阳能的利用率有一定积极意义。

**关键词:** 扰动观察法; 误判; 功率预测; 动态性能

## Research on Variable Step Perturbation and Observation Control Method Based on Power Prediction for MPPT

Lin Yi, He Tongneng

(Information and Intelligent System Institute, College of Information,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In view of the difficulties in the selection of step size and the problem of "miscarriage of justice", a variable step perturbation and observation control method based on power prediction is proposed. Firstly, the algorithm is used to determine the direction of the perturbation by the power prediction method, and then avoid the "miscarriage of justice". Then, the maximum power point is precisely positioned by the variable step perturbation observation method. The simulation model is based on the Matlab/Simulink platform. The algorithm not only has good dynamic performance in tracking the maximum power point, but also effectively improves the oscillation and "miscarriage" problem in the traditional disturbance observation method, which has positive significance to improve the utilization rate of solar energy.

**Keywords:** perturbation observation method; misjudgment; power prediction; dynamic performance

### 0 引言

当下, 传统能源匮乏问题越来越受到关注, 开发绿色新能源迫在眉睫, 其中, 太阳能是可再生能源重要的组成部分<sup>[1-2]</sup>。为了最大限度地开发太阳能, 最大功率点跟踪(MPPT)技术必不可少。针对目前 MPPT 控制技术的研究, 很多专家开发出了一些优越的控制算法, 文献 [3] 和文献 [4] 中所研究的改进型扰动观察法解决了传统定步长扰动观察法存在的步长选择困难问题, 很好的兼顾了动态跟踪速度和稳定精度; 文献 [5] 采用了模糊控制结合扰动观察法的复合 MPPT 控制策略, 有效地增强了光伏系统的跟踪速度和鲁棒性。文献 [6] 提出了一种自适应变步长电导增量法, 此算法可以根据外界环境的变化实时调整扰动步长, 解决了传统电导增量法存在的误判问题。文献 [7] 中提出了新型三点式扰动观察法, 可实现反应迅速, 稳态精度高的目的。文献 [8] 研究了一种基于滞环控制的改进型扰动观察法不但启动特性好、

稳态震荡小, 而且可以防止“误判”。文献 [9] 提出了一种基于外推追赶迭代法 MPPT 控制策略, 有效克服了传统扰动观察法的缺点。另外, 文献 [10-12] 还分别提出了粒子群算法、滑模算法和 Fibonacci 数列算法, 智能化程度较高, 均取得不错的控制效果, 但在硬件中不易实现; 针对上述的问题, 本文提出了一种基于功率预测的变步长扰动观察法 MPPT 复合控制算法, 此算法不但能解决误判问题, 而且具备较快的跟踪速度和较高的稳态精度。

### 1 光伏电池数学模型及其输出特性

#### 1.1 光伏电池的数学模型

光伏电池实质是由若干 P-N 结组成<sup>[13]</sup>, 光伏电池既不是恒流源也不是恒压源, 当外界条件发生变化时, 其输出的  $P$  (输出功率)、 $U$  (输出电压) 和  $I$  (输出电流) 均会发生相应变化, 其等效电路模型如图 1 所示。

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(I \cdot R_s + U)}{AKT} - 1 \right] \right\} - \frac{(I \cdot R_s + U)}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中:  $U_{oc}$  (开路电压)、 $I_{sc}$  (短路电流)、 $I_m$  (最大功率对应电流) 和  $U_m$  (最大功率点对应电压)。且  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $I_m$  和  $U_m$  这 4 个参数是在  $S=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下给出的, 此模型在 Simulink 平台也易实现。可将 (1) 式进一步简

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2018-03-11。

**作者简介:** 林 义(1992-), 男, 浙江温州人, 硕士, 主要从事微电网方向的研究。

何通能(1962-), 男, 浙江义乌人, 副教授, 主要从事模式识别与计算机智能控制方向的研究。

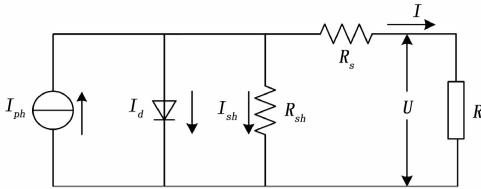


图 1 光伏电池等效电路模型

化为：

$$I = I_{sc} - \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \quad (3)$$

$$C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

### 1.2 光伏电池输出特性

外界环境发生变化时，其输出特性如图 2 所示。由图 2 可以看出，光伏电池输出 P-U 曲线为非线性，且每条曲线存在一个特定电压对应曲线的最大值（峰值），此峰值对应特定电压为  $U_m$ ，当光照强度 (S) 逐渐变强时，输出功率也随着变大；当温度 (T) 逐渐升高时，输出功率逐渐减小。当外界环境变化时，光伏电池不可能时时刻刻都工作在最大功率状态，因此会造成能量损失，降低整个光伏系统的效率，为了让光伏电池实际工作点始终工作在最大功率点处，这里就需要借助于 MPPT 技术。这里基于 Boost 升压电路作为主电路，通过调节 MOS 开关占空比，利用 MPPT 算法对 MPP 进行周期性搜寻，来实现最大功率跟踪。

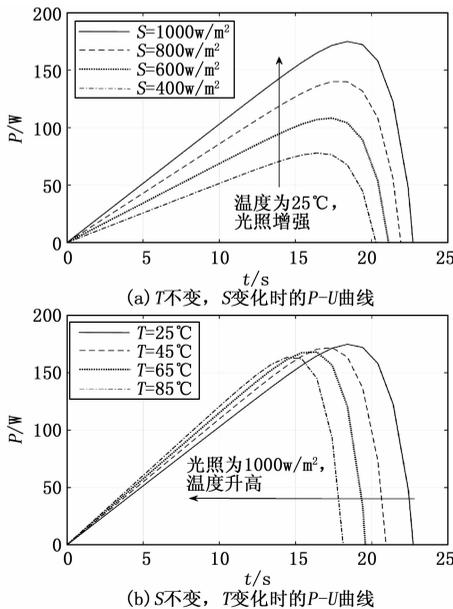


图 2 光伏电池输出 P-U 特性曲线

## 2 传统扰动观察法

常见的一些 MPPT 控制有扰动观察法 (Perturbation Observation)、电导增量法 (INC)、变步长扰动或电导增量法、模糊控制、神经网络控制，这些算法各自具备相应优缺点。其中，常见的扰动观察法就是通过实时地对光伏电池输出电压施

加一个正方向扰动  $\Delta U$ ，判断前后两个相邻时刻输出功率的变化量  $\Delta P$ ，如果  $\Delta P$  是正的，则说明 MPP 位于实际工作点的左侧，需要继续保持正向扰动；反之，则反向扰动，P&O 算法流程图如图 3 所示。

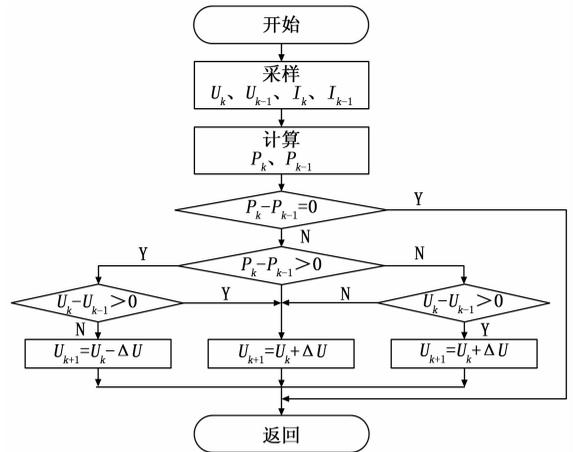


图 3 传统扰动观察法控制流程图

### 2.1 传统扰动观察改进的办法

由以上分析可知，常规定步长扰动观察法在动态响应速度和稳态精度方面难以同时兼顾，因此为了提高定步长算法的性能，改进型变步长扰动算法应运而生。目前最常见的两种 MPPT 控制策略如以下两种：

1) 由图 2 可知，光伏电池输出特性近似为一条抛物线，存在唯一最大功率点。在实际最大功率点处， $|dP/dU| = 0$ ；在最大功率点两侧时， $|dP/dU|$  为一不等于零的数。可以发现，当实际工作点距离最大功率点较远时， $|dP/dU|$  越大，这时系统采用较大步长，便于缩短跟踪时间，加快跟踪速度；当实际工作点距离最大功率点较近时， $|dP/dU|$  越小，此时系统采用较小步长，减弱稳态震荡现象。因此，考虑把步长表示为  $|dP/dU|$  的函数，这里写成： $\Delta U = \alpha \times |dP/dU|$ ，只需通过选择合适的系数  $\alpha$ ，就可以实现变步长算法在 MPPT 中的应用。

2) 由图 2 中光伏电池输出曲线：在最大功率点右侧曲线斜率绝对值约等于左侧斜率绝对值的 4 倍；当实际工作点位于 MPP 左侧时，由于曲线较平缓，需要加快小跟踪速度，故需采用大步长  $k_1$ 。当实际工作点位于 MPP 右侧时，由于曲线较陡峭，需要减小跟踪速度，故需采用小步长  $k_2$ 。两者关系： $k_1 = 4k_2$ 。此种改进办法在 MPPT 中取得了不错效果。

在前人研究基础上，本文研究了一种基于功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略。

### 2.2 误判问题分析

由图 3 可以看出，传统扰动观察算法存在步长  $\Delta U$  选择困难的问题。若步长选择过大，跟踪速度会变快，但是待功率曲线稳定后，会存在稳态震荡，使实际工作点在 MPP 附近来回波动，这样会导致光伏系统效率降低；若步长  $\Delta U$  选择过小，虽然提高了跟踪精度，可以减小稳态震荡，但是存在跟踪速度缓慢问题，跟踪速度缓慢同样会降低系统效率。所以，定步长扰动观察法难以同时兼顾跟踪速度和稳态精度问题。另外，

“误判”问题也是当前定步长 P&O 算法的不足。例如, 当外界光照强度不断变化时(夏季的多云天气), P-U 特性曲线会不断变化, 当光照强度突变时, 就可能导致“误判”问题。其中, 误判分析如图 4 所示。

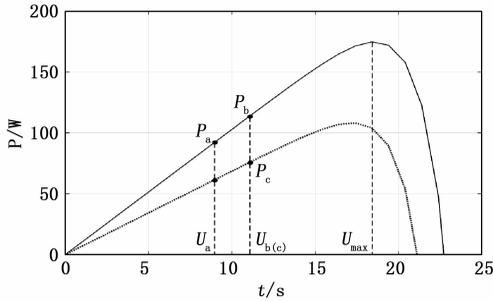


图 4 误判分析示意图

由图 4 可以看出, 假设光伏系统实际工作点在 MPP 左侧时, 此时工作电压为  $U_a$ , 对应功率为  $P_a$ 。当电压经过施加扰动移动到  $U_b$  时, 对应功率为  $P_b$ , 如果外界环境条件不变化, 光伏电池的输出功率  $P_b > P_a$ , 即  $\Delta P > 0$ , 扰动方向正确; 但是实际中会存在光照强度变化的问题, 例如, 如果外界光照强度减弱, 则  $U_b$  对应的功率为  $P_c$ , 此时  $P_c < P_a$ , 此时  $\Delta P < 0$ , 根据扰动判断规则, 系统会认为此时 MPP 位于实际工作点左侧, 因此会反向扰动, 而事实上 MPP 位于实际工作点的右侧, 因此, 造成“误判”。试想如果光照强度持续变小, 则会一直出现“误判”, 严重时会造成能量的大量损失和并网电流的失控<sup>[14]</sup>。

为了改善上述传统算法的缺陷, 本文研究了一种基于功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略, 该种算法不但能解决跟踪速度与稳态精度之间的矛盾, 最大限度的保证光伏电池时时刻刻都工作在 MPP 处, 而且还能克服传统算法存在的“误判”问题, 从而减小“误判”所带来的能量的损失, 提高光伏系统的效率。

### 3 基于功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 控制策略

由第 2 节分析可知, 定步长扰动观察法存在两个缺陷: 一个是动态速度与稳态精度之间的矛盾, 另一个是“误判”问题。首先考虑动态速度与稳态精度之间的矛盾, 这就需要变步长扰动观察法, 其原理为: 在离 MPP 较远时, 采用大步长可以提高跟踪速度, 当实际工作点离 MPP 较近时, 采用小步长来对 MPP 进行精确定位, 避免了稳态震荡, 变步长扰动观察法可有效解决跟踪速度和稳态精度之间的矛盾。由图 2 的光伏输出 P-U 特性曲线可以看出, 在实际工作点远离 MPP 时,  $|\Delta P/\Delta U|$  较大, 当实际工作点越来越靠近 MPP 时,  $|\Delta P/\Delta U|$  越来越小, 在 MPP 处,  $|\Delta P/\Delta U| = 0$ 。因此, 根据这一规律, 设变步长扰动观察法的步长  $\Delta U = \beta |\Delta P/\Delta U|$ , 这里, 令变步长系数  $\beta = 0.002$ 。

另一方面, 为了解决误判问题, 需要引入功率预测, 其工作原理如图 5 所示。设采样频率足够高, 且光照强度满足在一个采样周期内均匀变化, 图 5 中, 光伏电池在  $kT$  时刻的输出电压为  $U(k)$ , 对应功率为  $P(k)$ , 此时不进行扰动, 经过

半个采样周期 ( $k+0.5$ )  $T$  时刻测得功率为  $P(k+0.5)$ , 则可得一个采样周期的预测功率  $P^*(k)$ :

$$P^*(k) = 2P(k+0.5) - P(k) \quad (5)$$

在 ( $k+0.5$ )  $T$  时刻增加一次扰动步长, 则可得到 ( $k+1$ )  $T$  时刻的电压  $U(k+1)$ , 对应功率为  $P(k+1)$ 。这个过程中,  $kT$  时刻对应的预测功率  $P^*(k)$  和 ( $k+1$ )  $T$  时刻对应的  $P(k+1)$  可以看出同一光照强度下, P-U 曲线扰动前后的两个功率, 因此通过比较  $P^*(k)$  和  $P(k+1)$  便可以避免“误判”问题。

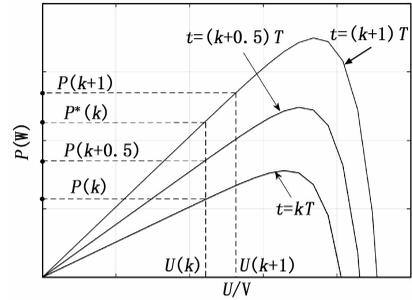


图 5 功率预测原理示意图

根据以上理论分析, 基于功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 控制策略流程图如图 6 所示。

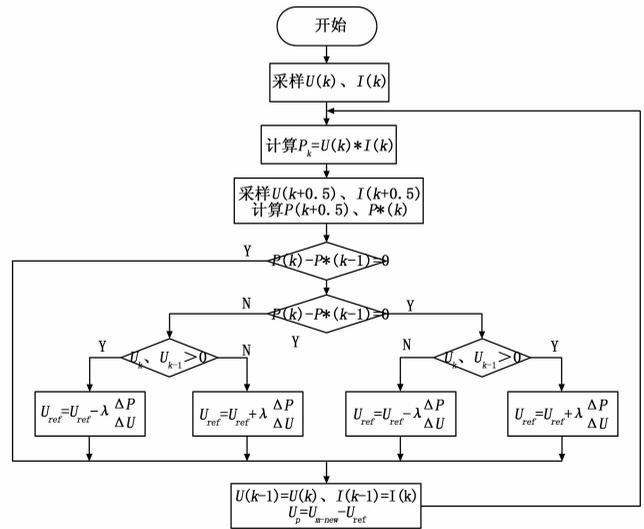


图 6 基于功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 控制策略流程图

其中,  $U_{m-new}$  为 PV 电池理论值,  $U_{ref}$  为每次扰动后所得电压值, 两者的差值通过 PI 控制器后得到的输出量, 作用于 PWM 模块; 因此, 当外界环境发生变化时, 光伏电池运行的实际电压可以跟随环境改变后的理论 MPP 对应电压。

### 4 Simulink 仿真分析

在 Matlab R2014b/Simulink 平台上搭建光伏系统 MPPT 控制仿真模型, 基于 Simulink 的 MPPT 总体仿真模型示意图如图 7 所示。其中 Boost 电路主要参数设置如下:  $C1 = 150 \mu F$ ,  $C2 = 350 \mu F$ ,  $L = 8 \text{ mH}$ ,  $R = 10 \Omega$ 。PV 电池参数: 开路电压  $U_{oc} = 25.11 \text{ V}$ , 短路电流  $I_{sc} = 12.02 \text{ A}$ , MPP 对应最大功率电压  $U_m = 19.31 \text{ V}$ , MPP 对应最大功率电流  $I_m = 9.05$

A.  $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25\ \text{C}$  时, PV 电池的输出功率  $P=174.76\ \text{W}$ ;  $S=400\ \text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25\ \text{C}$  时, 输出功率  $P=77.8\ \text{W}$ ;  $S=800\ \text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25\ \text{C}$  时, 输出功率  $P=139.6\ \text{W}$ ; 仿真时间设置  $t=1.5\ \text{s}$ 。图 7 中分别包含了大步长扰动观察法模块、小步长扰动观察法模块和基于功率预测结合变步长扰动观察法实现模块, 对 3 种控制条件下的输出波形进行对比来验证功率预测结合变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略的优越性。其中, 基于功率预测结合变步长扰动观察法控制模块 Simulink 实现如图 8 所示。

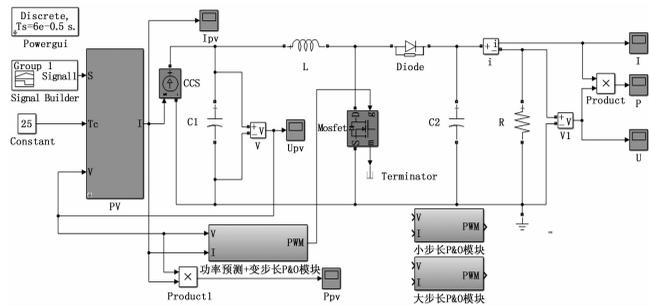


图 7 基于 Simulink 的 MPPT 总体仿真模型

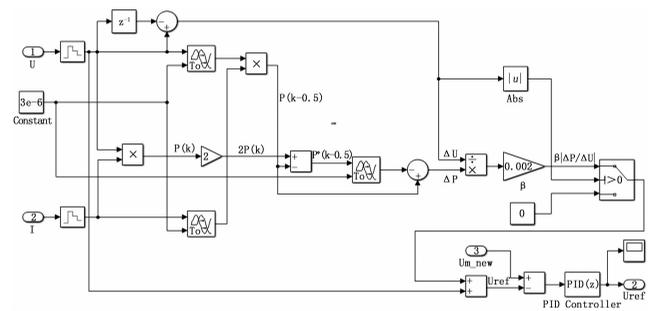
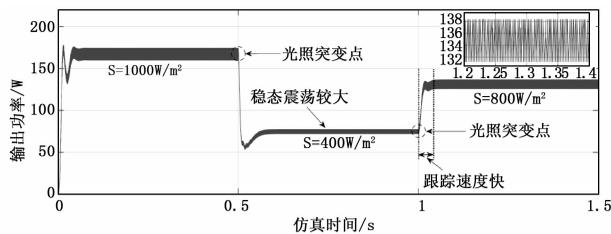


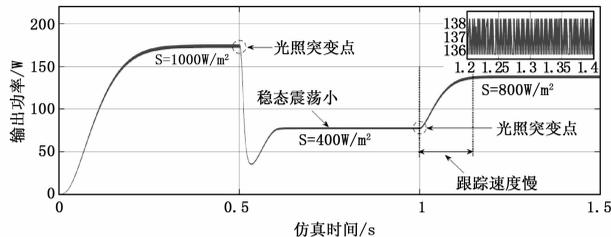
图 8 基于预测功率的变步长扰动观察法模块 Simulink 实现模型

运用 Signal Builder 模块来模拟外界光照强度变化, 光照强度  $S$  变化情况: 在  $0\sim 0.5\ \text{s}$  时间段, 光照强度  $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ; 在  $0.5\ \text{s}$  时刻, 光照强度  $S$  从  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  突变为  $400\ \text{W}/\text{m}^2$ ; 在  $1.5\ \text{s}$  时刻, 光照强度  $S$  从  $400\ \text{W}/\text{m}^2$  突变为  $800\ \text{W}/\text{m}^2$ 。在此种光照变化条件下, 得到大步长 ( $\Delta U=0.03$ ) 扰动观察法、小步长 ( $\Delta U=0.001$ ) 扰动观察法和预测功率结合变步长扰动观察法复合算法 (变步长系数  $\beta=0.002$ ) 条件下的输出功率波形如图 9 所示。

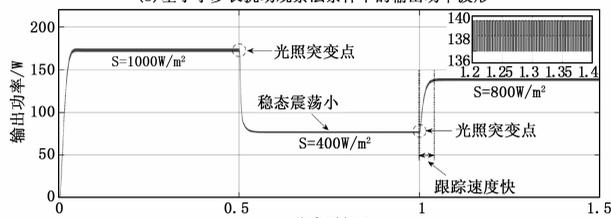
从图 9 中可以看出, 当采用大步长扰动观察法时, 开始 (启动) 阶段速度快, 在  $t=1\ \text{s}$  时刻, 光强照度由  $400\ \text{W}/\text{m}^2$  突变到  $800\ \text{W}/\text{m}^2$ , 输出功率达到新的稳态仅用  $0.051\ \text{s}$ , 显然在外界光强照度变化时, 响应速度较快, 但从图 9 (a) 中  $1.2\sim 1.4\ \text{s}$  的局部放大图可以看出, 稳定后输出功率波形在  $131.2\sim 138.3\ \text{W}$  之间来回震荡, 稳态震荡幅度较大, 造成这种现象的原因是当实际工作在到达 MPP 附近时, 会出现工作点跨过 MPP 的情况, 改变扰动方向后, 工作点的电压和 MPP 对应电压还是小于步长, 导致大幅度震荡且无法稳定在 MPP 处。由图 9 (b) 可以看出, 在  $t=1\ \text{s}$  时刻, 光强照度由  $400\ \text{W}/\text{m}^2$  突变到  $800\ \text{W}/\text{m}^2$ , 输出功率达到新的稳态仅用  $0.148$



(a) 基于大步长扰动观察法条件下的输出功率波形



(b) 基于小步长扰动观察法条件下的输出功率波形



(c) 基于预测功率结合变步长扰动观察法条件下的输出功率波形

图 9 3 种控制条件下的输出功率仿真波形

s, 跟踪速度远慢于大步长扰动观察法, 从图 9 (b) 中  $1.2\sim 1.4\ \text{s}$  的局部放大图可以看出, 此时实际工作点在 MPP 附近以小幅度来回波动, 波动范围为  $135.2\sim 138.5\ \text{W}$ , 震荡幅度较大步长控制明显减小; 当采用预测功率结合变步长扰动观察法时, 如图 9 (c) 所示, 在启动阶段, 跟踪速度快, 在  $t=1\ \text{s}$  时刻, 光照强度此时由  $400\ \text{W}/\text{m}^2$  突变为  $800\ \text{W}/\text{m}^2$ , 输出功率达到新的稳态仅用  $0.057\ \text{s}$ , 动态响应速度与大步长扰动观察法不相上下, 从图 9 (c) 中  $1.2\sim 1.4\ \text{s}$  的局部放大图可以看出, 稳定后输出功率在  $137.1\sim 139.4\ \text{W}$  范围波动, 范围波动范围小, 跟踪精度高。

因此, 采用本文提出的基于预测功率的变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略时, 无论从跟踪速度和稳态精度方面, 基本能够同时兼顾, 满足系统设计要求。

### 5 总结

针对定扰动观察法的不足, 本文提出的基于预测功率的变步长扰动观察法 MPPT 复合控制策略, 不但有效地解决了跟踪速度和稳态精度之间的矛盾, 而且可以避免误判问题, 最大限度地使光伏电池时时刻刻以最大功率输出, 提高了光伏系统的效率, 通过 Simulink 仿真结果验证了所提出复合控制算法的优越性, 具有良好的工程推广价值。

### 参考文献:

[1] Elobaid L M, Abdelsalam A K, Zakzouk E E. Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: a survey [J]. Renewable Power Generation Iet, 2015, 9 (8): 1043-1063.