

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.020

基于 ESO 和分数阶 PID 的改进 P&O 控制策略

施昕昕, 李冠飞

(南京工程学院自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 为了提高光伏电池转换效率、降低能量损失, 有必要研究最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 方法。针对传统扰动观察法 (perturbation observation method, P&O) 存在无法兼顾跟踪速度与稳态精度、在光照度发生较大变化时会产生误判现象的问题, 文中提出一种能适应环境变化的变步长 P&O 控制策略。首先, 利用光伏电池刚启动时类似恒流源的特性获取当前光照度下的短路电流, 通过固定电流法推导出最大功率点 (maximum power point, MPP) 的参考电压; 其次, 当光照度突变时, 提出功率修正方法, 并给出突变时的变步长调整策略; 最后, 设计基于线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 的分数阶比例积分微分 (fractional order proportion integration differentiation, FOPID) 控制器, 可以对算法输出的参考电压进一步进行跟踪补偿。仿真结果表明, 所提控制策略可以提高稳态精度和跟踪速度, 有效提高光伏电池的输出功率。

关键词: 变步长; 扰动观察法 (P&O); 线性扩张状态观测器 (LESO); 功率修正; 分数阶比例积分微分 (FOPID) 控制; 最大功率点 (MPP)

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0179-09

0 引言

目前, 全球都面临着传统能源日益短缺、环境污染愈发严重的问题, 绿色可再生能源的开发与利用获得越来越多国内外学者的关注^[1]。太阳能因其分布广且可持续、无污染的特点成为研究重点。光伏电池是一种基于光生伏特效应, 将太阳光能转换为电能的装置。为了提高光伏电池的转换效率, 光伏发电系统须尽可能地工作在系统的最大功率点 (maximum power point, MPP) 处。

常用的最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 算法^[2-3] 主要有电导增量法 (incremental conductance method, INC)^[4]、扰动观察法 (perturbation observation method, P&O)^[5-9]、固定电压法 (constant voltage method, CVT) 等。其中 P&O 由于控制逻辑简单且硬件实现方便, 在工程上得到大量应用, 但其存在扰动步长的设定无法兼顾跟踪速度和稳态精度、在较大光照度变化下会产生方向误判的问题。为了提高传统 P&O 的跟踪效率, 很多学者对其进行了改进。常见的改进方向为算法结合, 如文献[10]将 CVT 与 P&O 相结合, 可以加快跟踪速度, 但须额外采集开路电压或者短路电流, 并且当光伏组件变化时, 算法须进行一定的改动, 算法移植性很差。另外, 文献[11]在 P&O 中加入功率预测法也是一种改进方向, 其可以防止算法在光照度突变时发生误判, 但这种方法须在 2 次采样周

期中间增加 1 次采样, 增加了算法运行时间, 并且无论当前光照度是否产生较大变化都会额外进行采样, 导致跟踪速度变慢。

文中针对传统 P&O 存在的缺点, 提出一种能适应环境的变步长 P&O 控制策略。该控制策略分为启动阶段和运行阶段。首先, 启动阶段利用光伏电池刚启动时类似恒流源的特性获取当前光照度下的短路电流, 通过固定电流法推导出 MPP 处的参考电压。其次, 在光照强度发生突变时引入功率修正法, 避免了算法发生误判^[12], 并给出光照度发生突变时的变步长调整策略。当算法进入运行阶段, 对 MPP 处电压进行分区, 以便系统在出现故障后能快速重新到达 MPP 处。最后, 设计基于线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 的分数阶比例积分微分 (fractional order proportion integration differentiation, FOPID) 控制器对当前环境下的参考电压进一步跟踪修正, 并在 Matlab/Simulink 平台中进行仿真, 验证了该方法具有良好的动稳态性能, 同时能快速应对外界环境的变化。

1 光伏电池模型及其输出特性

光伏电池的等效物理模型^[13] 如图 1 所示。图中, I 为光伏电池的输出电流; U_d 为二极管端电压; U_o 为光伏电池的输出电压; I_g 为光生电流; I_d 为二极管电流; I_p 为 R_p 所在支路电流; R_s 、 R_p 分别为串、并联电阻, R_p 往往远大于 R_s 。

以图 1 中电流所示方向作为参考方向, 则由基尔霍夫电流定律可得:

收稿日期: 2022-11-05; 修回日期: 2023-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61873120)

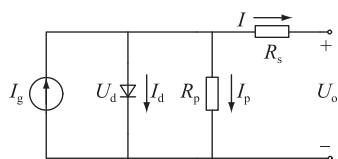


图1 光伏电池等效模型

Fig.1 Equivalent model of photovoltaic cell

$$I_g = I_d + I_p + I \quad (1)$$

由基尔霍夫电压定律可得:

$$I_p = (IR_s + U_o)/R_p \quad (2)$$

$$U_d = U_o + IR_s \quad (3)$$

由二极管电流方程可知:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{qU_d}{NKT}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: I_o 为二极管反向饱和电流; q 为电子电荷; N 为光伏电池的理想因子; K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。

将式(2)一式(4)代入式(1),则可得到光伏电池的输出电流^[14-15]为:

$$I = I_g - I_o \left[e^{\frac{q(U_o + IR_s)}{NKT}} - 1 \right] - (IR_s + U_o)/R_p \quad (5)$$

由式(5)可以看出,光伏电池的输出特性呈非线性,其输出会受到光照辐射度、外界温度以及电池本身特性的影响。

为更好地观察光伏电池输出特性,在 Simulink 中搭建光伏电池模型,其在光照度 1000 W/m^2 、温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 标准条件下(标况)的特性参数为:最大输出功率为 200.143 W ,开路电压为 32.9 V ,短路电流为 8.21 A ,MPP 处电压为 26.3 V ,MPP 处电流为 7.61 A , R_s 为 $0.34483 \text{ } \Omega$, R_p 为 $150.6921 \text{ } \Omega$, A 为 0.97736 , I_o 为 $2.3246 \times 10^{-10} \text{ A}$, I_g 为 8.2288 A 。通过 Simulink 仿真可得标况下光伏电池的 $U-P$ 和 $U-I$ 曲线,分别如图 2、图 3 所示。

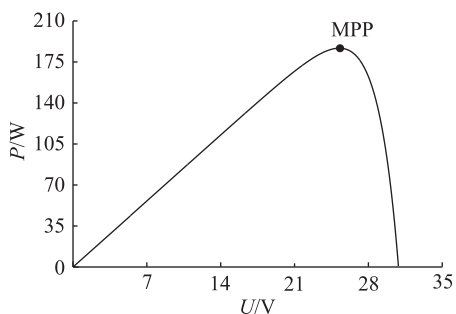


图2 光伏电池输出 $U-P$ 曲线

Fig.2 $U-P$ curve of photovoltaic cell output

2 传统扰动观察法优缺点分析

目前 P&O 是工程上经常使用的算法之一,其工作原理是周期性地给光伏电池输出电压一个扰动,

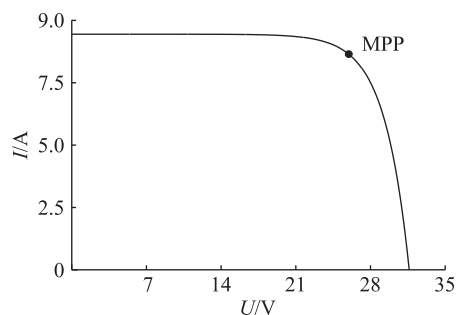


图3 光伏电池输出 $U-I$ 曲线

Fig.3 $U-I$ curve of photovoltaic cell output

判断前后 2 个时刻的功率变化情况,若当前时刻功率较前一个时刻的功率增加,则扰动方向不变,反之则改变扰动方向。持续性地给输出电压扰动,则能跟踪到 MPP 处,其优点为算法简单、被测参数少、工程易实现等。

P&O 在被广泛使用的同时也暴露出一些问题,比如:

(1) 扰动步长的选择。步长选择过大,跟踪速度会提高,但跟踪精度降低,会造成光伏系统的稳态振荡;步长选择过小,稳态性能会提升,但动态性能降低,表现为跟踪速度变低。

(2) 光照度突变造成的误判。如图 4 所示,当前工作点在 A 点,此时电压为 $U(t)$,功率为 $P(t)$,在下一个采样时刻,光照度从 1.0 kW/m^2 变为 0.8 kW/m^2 ,工作点从 A 点跳变为 B 点,此时电压为 $U(t+1)$,功率为 $P(t+1)$ 。由图 4 可以看出, $U(t) < U(t+1)$, $P(t) > P(t+1)$ 。按照 P&O 的原理,下一个扰动方向将会改变,改变后的扰动方向将与 MPP 所在的方向相反,这就造成了误判现象。算法误判会造成能量损失,严重时甚至会导致跟踪失败。

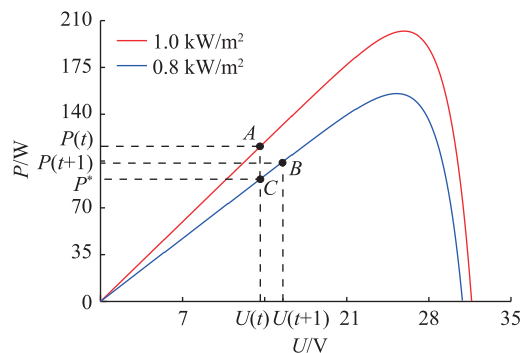


图4 误判现象示意

Fig.4 Schematic diagram of misjudgment

3 改进型 P&O

3.1 改进型 P&O 流程

改进型 P&O 流程如图 5 所示。图 5 中, $U(t)$ 、

$I(t)$ 分别为当前周期的电压和电流; $U(t-1)$ 、 $I(t-1)$ 分别为上个周期的电压和电流; V_{ref} 、 I_{ref} 分别为 MPP 处的参考电压、参考电流; V_{rold} 为上个周期 MPP 处的参考电压; d 为光照度无较大变化时的步长; d_1 为光照度发生较大变化时的步长。该控制策略分为启动阶段和运行阶段, 其中 V_{ref} 的初始值为 0, 算法运行时, 判断 V_{ref} 值即可知道算法处于启动阶段还是运行阶段。

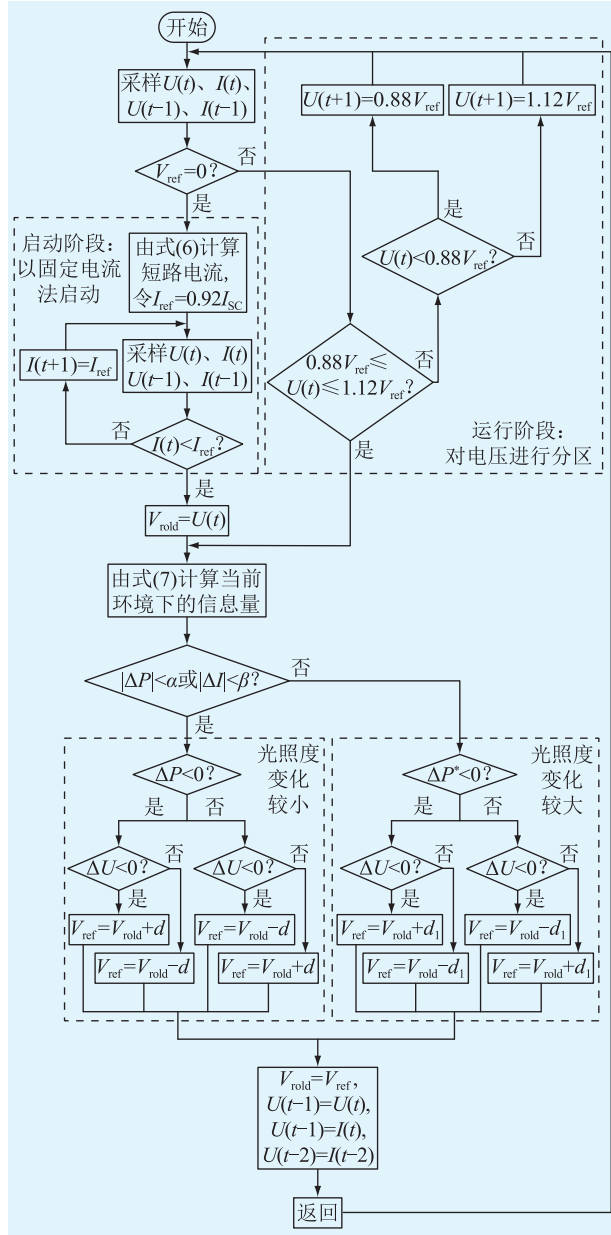


图5 改进型 P&O 控制流程

Fig.5 Control flow of improved P&O

启动阶段引用了 CVT 的思想, 不同的是该算法是动态获取 MPP 处的参考电压, 其可以由算法本身去计算当前环境下的 MPP 处参考电压。动态获取 MPP 处参考电压的依据为: 算法刚启动时, 光伏电池输出的电流变化很小, 相当于恒流源^[16-19], 因此

可以通过式(6)计算出当前环境下的短路电流 I_{sc} , 由此推导出 MPP 处的参考电压。

$$I_{\text{sc}} = I(t) + \frac{I(t) - I(t-1)}{U(t) - U(t-1)}U(t) \quad (6)$$

当获取到 MPP 处参考电压后, 算法进入运行阶段, 运行阶段对参考电压的左右 12% 进行分区^[20-22], 其目的是为了保证在外界干扰下电压出现跳变情况时算法可以快速将工作点拉回 MPP 附近。为了得知扰动方向和扰动步长大小, 须进行计算获取一些信息量, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta I = I(t) - I(t-1) \\ \Delta I_{\text{old}} = I(t-1) - I(t-2) \\ \Delta P = U(t)I(t) - U(t-1)I(t-1) \\ \Delta P^* = U(t)I(t) - U(t-1)(I(t) - \Delta I_{\text{old}}) \\ \Delta U = U(t) - U(t-1) \\ k = \Delta P / \Delta U \\ k_1 = \Delta P^* / \Delta U \end{cases} \quad (7)$$

式中: ΔI 为当前周期与上个周期的电流差; ΔI_{old} 为前 2 个周期电流差; ΔP 为当前周期与上个周期功率差; ΔP^* 为光照度发生较大变化时的功率差; ΔU 为当前周期与上个周期的电压差; k 、 k_1 分别为光照度没有较大变化与有较大变化时的斜率值。

然后判断光照度是否发生突变, 当前后两时刻功率差或者电流差小于阈值 α 、 β 时, 认为当前环境光照度变化小, 反之则认为光照度变化大。光照度变化大时要对前一时刻的功率进行修正, 防止算法逻辑产生误判。其中阈值 α 、 β 的取值与步长有关, 步长越大, 阈值 α 、 β 越大。经仿真实验, 文中阈值 α 、 β 分别取 $10\%I(t-1)$ 、 $5\%P(t-1)$ 。

3.2 电压分区依据

当算法进入运行阶段, 正常情况下此时工作点电压应该处于参考电压 V_{ref} 的左右 12% 区域内 (12% 是对 MPP 附近的一个量化表示)。电压分区依据示意图 6, 假设当前环境光照度是 1.0 kW/m^2 , 算法跟踪 MPP 到 A_1 点, V_{ref} 的值即为 A_1 点的电压值, 所以 V_{ref} 的左右 12% 分别是图中 B_1 点和 C_1 点处所在的电压值。从图 6 中可以看出, 即使光照度从 1.0 kW/m^2 依次降为 0.6 kW/m^2 , MPP 仍然处于 V_{ref} 的左右 12% 的范围内。由此可见, 即使光照度有较大的变化, MPP 处电压值波动也不大。因此, 当光伏系统受到外界扰动导致电压突然跌落时, 算法会快速将当前电压拉回 MPP 所在区间, 缩短重新搜索 MPP 的时间。

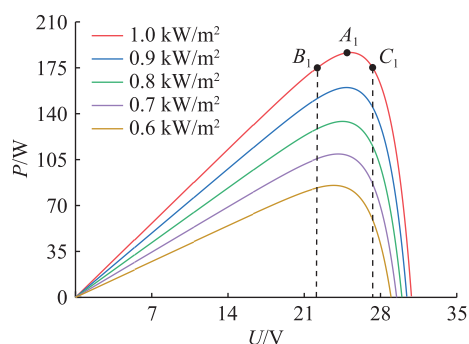


图6 电压分区依据示意

Fig.6 Schematic diagram of voltage partition

3.3 功率修正原理

第2章分析了传统 P&O 的优缺点,其中产生误判现象的主要原因是在光照度变化下,前后两时刻的功率比较不在同一条 $U-P$ 曲线上^[23-26]。图4中,当光照度从 1.0 kW/m^2 变为 0.8 kW/m^2 ,工作点从 A 点跳变为 B 点,那么防止其误判的重点是找到 C 点的功率,此时 B 点和 C 点处于同一条 $U-P$ 曲线上, B 点功率与 C 点功率比较则不会产生误判。图4中, C 点的电压与 A 点电压均为 $U(t)$, C 点的电流值是未知的,但可以通过光照度变化前 2 个周期的电流变化值做一个预测。

功率修正示意如图7所示。

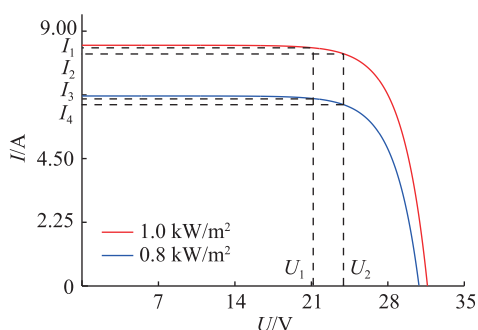


图7 功率修正示意

Fig.7 Schematic diagram of power correction

在 1.0 kW/m^2 和 0.8 kW/m^2 的光照度下,在一个变化时刻,电流的变化值相差不大,即有:

$$\frac{I_1 - I_2}{U_1 - U_2} \approx \frac{I_3 - I_4}{U_1 - U_2} \quad (8)$$

则根据式(8)可得光照度变化前一个周期的电流变化值,使用该变化值则可对光照度突变下的功率进行修正,修正后功率差为 ΔP^* ,由式(7)进行计算修正。

3.4 变步长调整策略

由于定步长扰动无法兼顾系统动静态性能,因此引入变步长思想^[27-29],即远离 MPP 处采用大步长,靠近 MPP 处采用小步长的策略。将斜率 k, k_1 作

为自变量,扰动步长 d, d_1 作为因变量,定义以下函数:

$$\begin{cases} d = \frac{k^2}{1 + k^2} \\ d_1 = \frac{k_1^2}{1 + k_1^2} \end{cases} \quad (9)$$

函数曲线特性如图8所示。

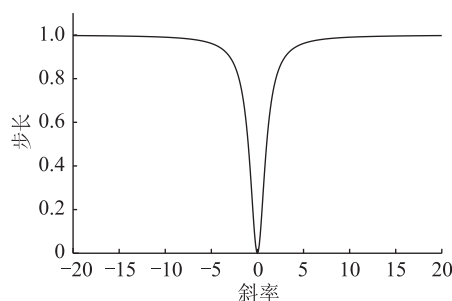


图8 扰动步长示意

Fig.8 Schematic diagram of disturbance step

以光照度无较大变化的情况为例,当 $|k|$ 很大时,步长也会很大,最大接近于 1;当 $|k|$ 为 0 时,步长为 0,此时跟踪到 MPP 处。考虑到算法在光照度突变下的跟踪速度和稳定后的频率振荡幅度,设定一个步长最大值 ΔU_{\max} ,让其在光照度突变下以 ΔU_{\max} 为步长快速跟踪新的 MPP。综上,自适应变步长调整公式为:

$$\begin{cases} d = \Delta U_{\max} \frac{k^2}{1 + k^2} \\ d_1 = \Delta U_{\max} \frac{k_1^2}{1 + k_1^2} \end{cases} \quad (10)$$

4 光伏系统电压闭环控制器设计

为了提高光伏系统在环境突变下的抗干扰能力,在改进型 P&O 的基础上设计了基于 LESO 的 FOPID 控制器来进一步跟踪补偿经 MPPT 之后输出的参考电压 V_{ref} ,光伏系统及控制器结构如图9所示。图中, U_{PV} 为光伏电池输出电压; I_{PV} 为光伏电池输出电流; I_L 为电感电流; U_0 为负载电压; L, C_1, C_2 分别为电感、电容; D 为二极管; IGBT 为绝缘栅双极型晶体管; e 为光伏电池输出电压与 LESO 跟踪其输出电压的误差; Z_1 为 LESO 中跟踪 U_{PV} 的状态; Z_2 为跟踪总扰动 f 的状态; b 为扰动因子; u 为控制量。

4.1 线性扩张状态观测器

由图9光伏系统结构可知,光伏电池输出电压和输出电流的关系表达式如下:

$$I_{\text{PV}} - I_L = C_1 \frac{dU_{\text{PV}}}{dt} \quad (11)$$

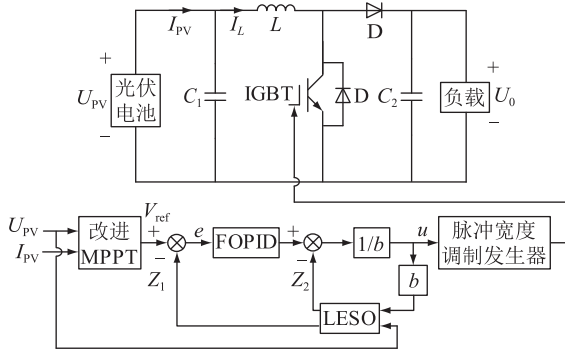


图9 光伏系统及电压闭环控制结构

Fig.9 Structure of photovoltaic system and voltage closed-loop control

若考虑变换器的参数不确定性及外界扰动,将该不确定性扰动定义为 ω ,则式(11)可以表示为:

$$\dot{U}_{PV} = -\frac{1}{C_1}I_L + \frac{1}{C_1}I_{PV} + \omega \quad (12)$$

对式(12)再进行分解,可表示为:

$$\begin{cases} f = -\frac{1}{C_1}I_L + \omega \\ \dot{U}_{PV} = f + bu \\ \dot{f} = h = \frac{1}{L}U_{PV} - \frac{R}{L}I_L + \frac{g-1}{L}U_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: \dot{U}_{PV} 为 U_{PV} 的一阶导数; \dot{f} 为总扰动的一阶导数; U_0 为负载电压; g 为占空比。

因此对于光伏一阶系统,令 $Z_1 = \dot{U}_{PV}$, $Z_2 = f$,

$\dot{f} = h$,则二阶 LESO 可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 - \alpha_1(Z_1 - U_{PV}) + bu \\ \dot{Z}_2 = -\alpha_2(Z_1 - U_{PV}) \end{cases} \quad (14)$$

将观测器的极点配置在 $-\omega_0$ 处,即:

$$s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2 = (s + \omega_0)^2 \quad (15)$$

可得:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 2\omega_0 \\ \alpha_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: α_1, α_2 为控制器参数; ω_0 为观测器带宽。由式(16)可知, $\alpha_2 = 0.25\alpha_1^2$, 确定 α_1 和 α_2 值之后再凑凑法确定扰动因子 b 的值。

4.2 FOPID 控制器

为了提高系统的调节范围和自由度,采用了 FOPID 控制器。严格意义上讲,分数阶微积分应该称为非整数阶微积分,而整数阶微积分是一个特例。FOPID 传递函数如式(17)所示,分数阶微积分算子 s^μ 的近似计算是 FOPID 控制器实现的核心,文中采用 Oustaloup 滤波器^[30]实现分数阶微分算子 s^μ

的离散和近似。

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (17)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

FOPID 控制系统结构如图 10 所示。

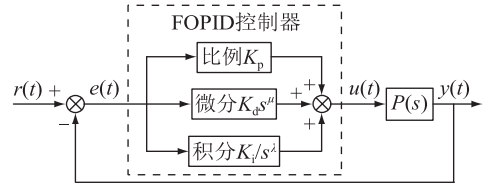


图10 FOPID 控制系统结构框图

Fig.10 Structure block diagram of FOPID control system

图 10 中, λ, μ 分别为积分阶次和微分阶次,一般取值范围为 $[0, 2]$, 当 λ, μ 都为 1 时,该控制器即为传统的 PID 控制器; $r(t)$ 为需要跟踪的信号; $e(t)$ 为系统的误差信号; $u(t)$ 为控制对象的输入信号; $y(t)$ 为系统的实际输出; $P(s)$ 为被控对象的传递函数。

5 仿真分析

为了验证文中所提改进型 P&O 的有效性,在 Matlab/Simulink 平台下对所提控制策略进行仿真分析,并与传统 P&O 以及传统 P&O 结合 CVT 算法进行仿真对比。如图 9 所示,主电路使用 Boost 升压电路,光伏电池在标况下输出的最大功率 P_{max} 为 200.143 W, MPP 处电压 U_m 为 26.3 V, MPP 处电流 I_m 为 7.61 A。设定传统 P&O 步长为 1 V, 传统 P&O 结合 CVT 的步长为 2 V, MPP 处参考电压设为 0.78 倍的开路电压,改进型 P&O 的最大步长 ΔU_{max} 经过仿真测试设为 4 V, 最大仿真步长为 $5e^{-6}$ s, 仿真时间为 1 s。

5.1 给定光照度下 3 种算法对比分析

设定当前环境温度为 25 °C, 光照度为 1 kW/m², 3 种算法在标况下输出功率对比如图 11 所示。从图 11 的①中可以看出, 3 种算法搜索到 MPP 处的时间分别为 0.019 s, 0.038 s, 0.027 s, 其中传统 P&O 结合 CVT 的速度最快, 这是由于其按照经验直接给出了 MPP 处电压。传统 P&O 在算法刚启动时有一个很大的波动, 并且出现了误判现象, 导致跟踪速度下降; 改进型 P&O 的跟踪速度相比 P&O 结合 CVT 在标况下不占优势, 这是由于改进算法考虑了跟踪到 MPP 处的稳态性能。从图 11 的②中可以看出, 3 种算法在跟踪到 MPP 后会在 MPP

左右振荡,这是因为 P&O 基于扰动来跟踪 MPP,其中传统 P&O 结合 CVT 在 MPP 处的振荡幅度最大,传统 P&O 振荡幅度次之,文中所提改进型 P&O 的振荡幅度最小。

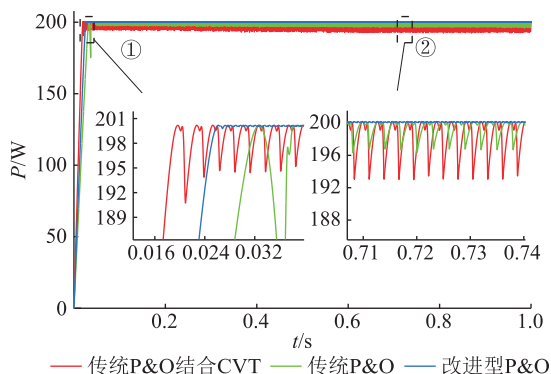


图 11 标况下输出功率波形对比

Fig.11 Comparison of output power waveforms under standard condition

通过以上分析可以看出,在标况下改进 P&O 的动静态性能都有一定的提升。为更直观地体现 3 种算法在标况下的稳态功率数据,定义 P_{max} 为光伏系统稳定下来时输出的最大功率值, P_{min} 为对应的最小功率值,系统稳定下来后的功率平均值为 P_{ave} ,则 3 种算法对应的各项参数指标见表 1。可以看出,受步长影响,传统 P&O 结合 CVT 以及传统 P&O 的稳态功率波动很大,而改进型 P&O 几乎无功率损失。

表 1 标况下 3 种算法的参数对比

Table 1 Parameter comparison of three algorithms under standard condition W

算法	P_{max}	P_{min}	P_{ave}
传统 P&O 结合 CVT	200.2	192.6	196.4
传统 P&O	200.2	197.0	198.6
改进型 P&O	200.2	200.0	200.1

5.2 光照度突变下 3 种算法对比分析

为了验证所提算法在光照度突变下的有效性,设定初始仿真环境温度为 25 ℃,初始光照度为 1.0 kW/m²,0.3 s 时从 1.0 kW/m²变为 0.8 kW/m²,0.6 s 时又从 0.8 kW/m²变为 0.9 kW/m²。图 12 为光照度突变下 3 种算法输出功率的对比波形。从图 12 的①中可以看出,在光照度突然变化下,3 种算法的功率均有很大的跌落,这是因为当前的工作电压为光照度变化之前的 MPP 处电压。其中传统 P&O 结合 CVT 在 1 ms 时重新跟踪到 MPP,而传统 P&O 出现了误判现象,导致向 MPP 处反方向跟踪,到 2.4 ms 时重新跟踪到 MPP。从图 12 的③中可以看出,改进型 P&O 步长会自适应改变,光照度突变时,当前工作电压远离 MPP 处电压,因此其步长会变大,

并且由于引进功率修正法,避免了误判现象,其在 0.07 ms 就重新跟踪到了 MPP。从图 12 的②中可以看出,3 种算法在光照度突变下都可以重新跟踪到 MPP,而受步长影响,在搜索到 MPP 时,步长最大的传统 P&O 结合 CVT 的功率波动最大,而改进型 P&O 在 MPP 附近步长可以自适应变小,因此其在 MPP 处的功率波动很小。

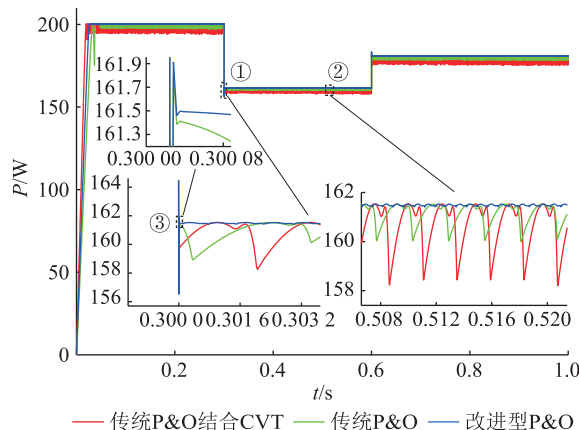


图 12 光照度突变下输出功率波形对比

Fig.12 Comparison of output power waveforms under sudden illumination change

为更清楚地体现 3 种算法在光照度突变下的参数对比,定义在光照度突变下系统重新达到稳定状态的时间为恢复时间 t_0 ,则 3 种算法在光照度突变下的各参数指标见表 2 与表 3。

表 2 光照度下降时 3 种算法的参数对比

Table 2 Parameter comparison of three algorithms when illuminance decreases

算法	P_{max}/W	P_{min}/W	P_{ave}/W	t_0/ms
传统 P&O 结合 CVT	161.50	157.70	159.60	1.00
传统 P&O	161.50	159.90	160.70	2.40
改进型 P&O	161.50	161.40	161.45	0.07

表 3 光照度上升时 3 种算法的参数对比

Table 3 Parameter comparison of three algorithms when illuminance rises

算法	P_{max}/W	P_{min}/W	P_{ave}/W	t_0/ms
传统 P&O 结合 CVT	181.00	175.20	178.10	1.100
传统 P&O	181.00	178.10	179.55	2.000
改进型 P&O	181.00	180.90	180.95	0.067

对比分析表 2、表 3 中的数据可得,在光照度突变下,改进型 P&O 可以快速重新跟踪到 MPP,并且在跟踪到 MPP 后功率波动较小。

5.3 模拟真实环境光照度变化下 3 种算法对比分析

为验证改进型 P&O 在现实环境的有效性,模拟

一天光照度变化的情况,见图 13。00:00—06:00 以及 18:00—24:00 的光照度为 0,06:00—13:00 光照度呈上升趋势,13:00—18:00 光照度呈下降趋势,图中出现的不规则尖波表示云朵飘过的状况。

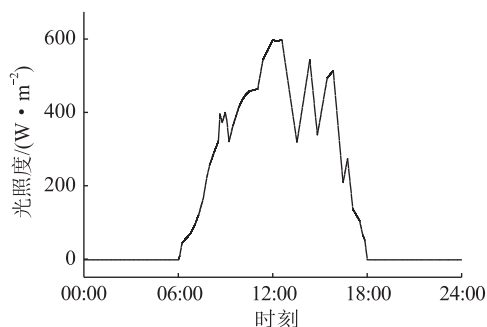


图 13 一天的光照度变化曲线

Fig.13 The daily light intensity curve

设定当前环境温度为 25 ℃,光照度变化情况按图 13 曲线模拟一天的光照度变化,则 3 种算法跟踪 MPP 的功率对比如图 14 所示。

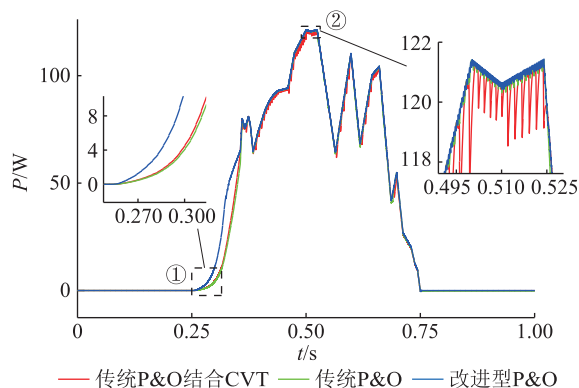


图 14 一天光照度变化下输出功率波形对比

Fig.14 Comparison of output power waveforms under daily illuminance change

从图 14 的①中可以看出 3 种算法的跟踪速度对比情况,改进型 P&O 明显快于其他 2 种算法,其原因是相较于其他 2 种算法,改进型 P&O 在远离 MPP 时步长较大。从图 14 的②中可以看出,在跟踪 MPP 过程中,改进型 P&O 功率波动一直很小,而其他 2 种算法,尤其是传统 P&O 结合 CVT 的功率波动很大,这是由于 MPP 虽然一直在变化,但当前工作电压一直处于 MPP 附近,传统 P&O 结合 CVT 无法调整步长导致波动很大。经过仿真分析,改进型 P&O 可以快速适应 MPP 一直变化的情况,其可以很好地适应现实环境,在跟踪速度和稳态精度上较传统 P&O 和传统 P&O 结合 CVT 都有一定提升。

6 结语

文中以传统 P&O 为基础,针对其无法兼顾跟踪

速度和稳态精度的问题,提出了自适应于环境变化的变步长 P&O 控制策略。首先,以动态的方法获取 MPP 处的参考电压,增加了算法的可移植性,减少了参数的采集。其次,针对传统 P&O 在光照度突变下产生的误判现象,提出了功率修正法,并给出了相应的变步长调整策略。最后,为了提高系统的抗干扰能力,设计了基于 LESO 的 FOPID 控制器对当前环境下的参考电压进一步跟踪修正。

在 Matlab/Simulink 平台上与传统 P&O 以及传统 P&O 结合 CVT 进行了仿真对比,仿真结果表明,在给定光照度下改进型 P&O 跟踪速度无明显提升,在光照度突变下以及模拟真实环境光照度变化下的跟踪速度有很大提升,并且无论哪种仿真场景下改进型 P&O 系统的稳态功率波动都很小,有效提高了光伏系统的输出功率。

致谢

本文得到南京工程学院校级科研基金创新基金重大项目(CKJA201903)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 朱玥,顾洁,孟璐. 基于 EMD-LSTM 的光伏发电预测模型[J]. 电力工程技术,2020,39(2):51-58.
ZHU Yue, GU Jie, MENG Lu. Photovoltaic power generation forecasting model based on EMD-LSTM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 51-58.
- [2] 吴繁言,李田泽,徐亚南,等. 基于权重指数递减粒子群算法在光伏 MPPT 中的应用[J]. 电测与仪表,2019,56(21):81-87.
WU Fanyan, LI Tianze, XU Yanan, et al. Application of weighted index declining particle swarm optimization algorithm in photovoltaic MPPT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 81-87.
- [3] 李世光,夏杰,李雪杨,等. 改进 APSO 算法在光伏 MPPT 控制中的应用[J]. 电测与仪表,2019,56(22):19-24.
LI Shiguang, XIA Jie, LI Xueyang, et al. Application of improved APSO algorithm in photovoltaic MPPT control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 19-24.
- [4] 卫东,王央康,常亚文. 一种基于增量电导法的变步长 MPPT 算法[J]. 太阳能学报,2018,39(5):1277-1283.
WEI Dong, WANG Yangkang, CHANG Yawen. A variable step-size MPPT algorithm based on incremental conductance method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1277-1283.
- [5] 高淑萍,汪凯昌,贡保记,等. 基于综合阻抗的孤岛检测新方法[J]. 太阳能学报,2019,40(2):556-562.
GAO Shuping, WANG Kaichang, YUN Baoji, et al. A novel islanding detection method based on integrated impedance[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 556-562.
- [6] PRIYADARSHI N, PADMANABAN S, HOLM-NIELSEN J B, et al. An experimental estimation of hybrid ANFIS-PSO-based MPPT for PV grid integration under fluctuating sun irradiance

- [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 1218-1229.
- [7] DEGHANI M, TAGHIPOUR M, GHAREHPETIAN G B, et al. Optimized fuzzy controller for MPPT of grid-connected PV systems in rapidly changing atmospheric conditions[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 9(2): 376-383.
- [8] GUO K, CUI L C, MAO M X, et al. An improved gray wolf optimizer MPPT algorithm for PV system with BFBIC converter under partial shading [J]. IEEE Access, 2020, 8: 103476-103490.
- [9] ABDULHASAN SALIM J, ALBAKER B M, SHYAA ALWAN M. Hybrid MPPT approach using cuckoo search and grey wolf optimizer for PV systems under variant operating conditions [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 627-644.
- [10] 齐洁莹, 周明, 史文秀, 等. 基于分区域控制法的 MPPT 研究与仿真[J]. 黑龙江电力, 2016, 38(6): 529-532, 536. QI Jieying, ZHOU Ming, SHI Wenxiu, et al. Research and simulation of MPPT based on the regional control method [J]. Heilongjiang Electric Power, 2016, 38(6): 529-532, 536.
- [11] 赵鹏飞, 赵庆生, 王旭平, 等. 基于改进功率预测算法的变步长光伏 MPPT 研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(9): 1318-1323. ZHAO Pengfei, ZHAO Qingsheng, WANG Xuping, et al. Variable step disturbance observation based on the improved power prediction algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(9): 1318-1323.
- [12] BENDIB B, BELMILI H, KRIM F. A survey of the most used MPPT methods: conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 637-648.
- [13] 龚瑞昆, 刘昊晟, 张堪傲, 等. 基于 PSO-BFO 混合算法的 MPPT 优化研究[J]. 电源技术, 2022, 46(1): 98-101. GONG Ruikun, LIU Haosheng, ZHANG Kan'ao, et al. Research on MPPT optimization based on PSO-BFO hybrid algorithm [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(1): 98-101.
- [14] GUO L, MENG Z, SUN Y Z, et al. A modified cat swarm optimization based maximum power point tracking method for photovoltaic system under partially shaded condition [J]. Energy, 2018, 144: 501-514.
- [15] 张继勇, 马一鸣, 李旺, 等. 基于一种改进的二分法的 MPPT 算法[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(22): 15-18. ZHANG Jiyong, MA Yiming, LI Wang, et al. MPPT algorithm based on an improved dichotomy [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(22): 15-18.
- [16] 尹立敏, 吕莉莉, 雷钢, 等. 基于复合控制算法的局部阴影下的 MPPT [J]. 电力电子技术, 2017, 51(10): 95-97. YIN Limin, LYU Lili, LEI Gang, et al. MPPT under partial shading condition based on composite control algorithm [J]. Power Electronics, 2017, 51(10): 95-97.
- [17] 吴子牛, 孟润泉, 韩肖清. 基于改进多种群遗传算法的光伏阵列多峰值 MPPT 研究 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 102-109. WU Ziniu, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic array based on improved multi-population genetic algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 102-109.
- [18] 陈景文, 张文倩, 李晓飞. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 控制 [J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 47-55. CHEN Jingwen, ZHANG Wenqian, LI Xiaofei. Photovoltaic MPPT control based on improved conductance increment method [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 47-55.
- [19] 孙立明, 杨博. 基于自适应罗盘搜索的集中式温差发电系统 MPPT 设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 140-148. SUN Liming, YANG Bo. MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 140-148.
- [20] 黄礼万, 李明. 分区定步长扰动观察算法的 MPPT 研究 [J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 21-23, 27. HUANG Liwan, LI Ming. MPPT research based on fixed-step sub-area perturbation & observation method [J]. Electrical Automation, 2020, 42(4): 21-23, 27.
- [21] 张洋, 陈荣. 一种分区的 MPPT 变步长扰动观察法 [J]. 信息技术, 2018, 42(5): 34-38. ZHANG Yang, CHEN Rong. A novel region partition MPPT method based on variable step-size perturbation and observation [J]. Information Technology, 2018, 42(5): 34-38.
- [22] 陈庚, 董秀成, 代莎, 等. 分区自适应变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用 [J]. 科技通报, 2018, 34(10): 134-139. CHEN Geng, DONG Xiucheng, DAI Sha, et al. Application of subarea self-adaption variable step size MPPT algorithm in photovoltaic system [J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(10): 134-139.
- [23] 魏立明, 吴扬驹. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 策略研究 [J]. 电源技术, 2021, 45(6): 791-796. WEI Liming, WU Yangjun. Research on maximum power point tracking of photo-voltaic power system based on improved conductance increment method [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(6): 791-796.
- [24] 张林, 陈荣, 刘超. 基于双模式功率预测扰动观察法的 MPPT 策略 [J]. 电子器件, 2021, 44(2): 386-392. ZHANG Lin, CHEN Rong, LIU Chao. MPPT strategy based on dual-mode power prediction disturbance observation method [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(2): 386-392.
- [25] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91. WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.
- [26] 周立, 谢磊, 李杰, 等. 功率预测变步长扰动法在光伏 MPPT 中的研究 [J]. 电源技术, 2020, 44(2): 230-234. ZHOU Li, XIE Lei, LI Jie, et al. Research on power prediction

- variable step size perturbation method in photovoltaic MPPT [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(2): 230-234.
- [27] 苏有功, 王大成, 王毅, 等. 基于改进型变步长电导增量法的 MPPT 控制策略仿真[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(10): 11-15.
- SU Yougong, WANG Dacheng, WANG Yi, et al. Simulation of MPPT control strategy based on improved variable step conductance increment method[J]. Techniques of Automation and Applications, 2019, 38(10): 11-15.
- [28] 郑年伟, 吉培荣, 刘浩, 等. 自适应变步长扰动观察法在光伏系统 MPPT 中的运用[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(9): 9-14.
- ZHENG Nianwei, JI Peirong, LIU Hao, et al. Application of an adaptive variable step disturbance observation method in photovoltaic system MPPT[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(9): 9-14.
- [29] 王珩, 赵世伟, 杨向宇. 基于电压闭环滑模控制的变步长电导增量法 MPPT 策略[J]. 可再生能源, 2018, 36(4): 506-511.
- WANG Gan, ZHAO Shiwei, YANG Xiangyu. MPPT strategy of variable step-size incremental conductance algorithm based on voltage closed-loop sliding mode control[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(4): 506-511.
- [30] 王东, 宋保业, 徐继伟. 永磁同步电机的分数阶 PI 控制器设计[J]. 煤炭技术, 2018, 37(11): 265-268.
- WANG Dong, SONG Baoye, XU Jiwei. Design of fractional order PI controller for permanent magnet synchronous motor[J]. Coal Technology, 2018, 37(11): 265-268.

作者简介:



施昕昕

施昕昕(1985), 女, 博士, 教授, 研究方向为机器人控制、分数阶控制(E-mail: sxx@njit.edu.cn);

李冠飞(1995), 男, 硕士在读, 研究方向为微电网控制。

Improved P&O control strategy based on extended state observer and fractional order PID

SHI Xinxin, LI Guanfei

(School of automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to improve the conversion efficiency of photovoltaic cells and reduce the energy loss, the maximum power point tracking (MPPT) method needs to be studied. Aiming at the problem that the tracking speed and steady-state accuracy of the traditional perturbation observation method (P&O) cannot be balanced, and misjudgment occurs when the environment changes greatly, a variable-step P&O control strategy that can adapt to the environmental changes is proposed. Firstly, the short-circuit current under current illumination is obtained by using the characteristics of the photovoltaic cell similar to the constant current source when it first starts, and the reference voltage of the maximum power point (MPP) is derived by the fixed current method. Secondly, when the illuminance changes abruptly, the power correction method is proposed, and the variable step size adjustment strategy is given. Finally, a fractional order proportion integration differentiation (FOPID) controller based on linear extended state observer (LESO) is designed, which can further track and compensate the reference voltage output by the algorithm. Simulation results show that the proposed control strategy can improve the steady-state accuracy and tracking speed, and effectively improve the output power of photovoltaic cells.

Keywords: variable step-size; perturbation observation method (P&O); linear expansion state observer (LESO); power correction; fractional order proportion integration differentiation (FOPID) control; maximum power point (MPP)

(编辑 钱悦)