

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.125

中图分类号: TM615

文献标志码: A

基于变步长不完全偏微分电导增量法的 MPPT 控制

毛 琳, 任正云

(东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 针对传统最大功率点跟踪算法无法兼顾追踪速度和稳态振荡的问题, 提出 1 种步长可变的改进电导增量法。该改进电导增量法使用分区变步长提高最大功率点追踪速度, 同时利用不完全偏微分理论优化稳态振荡的问题, 提高了光伏发电的效率。通过将传统控制算法和改进电导增量法进行对比分析, 验证了改进电导增量法的可行性和有效性。

关键词: 光伏系统; 最大功率点跟踪算法; 改进型电导增量法; 不完全偏微分

MPPT Control Based on Variable Step Size Incomplete Partial Differential Incremental Conductance Method

MAO Lin, REN Zhengyun

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: An improved incremental conductance method with a variable step size is proposed to solve the problem that the traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithm cannot strike a balance between the tracking speed and steady-state oscillation. The MPPT speed can be increased by the improved incremental conductance method using a zonal variable step size. Meanwhile, the steady-state oscillation problem is optimized by using the incomplete partial differential theory, thus improving the efficiency of photovoltaic power generation. The feasibility and effectiveness of the improved incremental conductance method is verified by comparing the traditional control algorithm with the improved incremental conductance method.

Keywords: Photovoltaic system; maximum power point tracking (MPPT) algorithm; improved incremental conductance method; incomplete partial differential

当今社会对能源的需求量与日俱增, 不可再生资源被不断发掘和利用, 能源危机日益紧迫, 可持续、清洁的可再生能源前景广阔。光伏电池具有非线性特征, 且易受外界环境的影响, 使光伏电池无法稳定运行在最大功率点, 需要研究最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)^[1-4]技术,

以减少功率损耗。

目前常用的 MPPT 控制算法有基于参数选择的恒定电压法、基于采样数据的扰动观察法 P&O (perturbation & observation)和电导增量法 INC (incremental conductance), 以及传统变步长扰动观察法和电导增量法。恒定电压法的控制方法易于实现, 但忽略了温度和光照的影响; 扰动观察法^[5]使用参数少, 易于实现, 但无法稳定运行在最大功率点, 且当环境突变时容易发生误判现象; 电导增量法^[6]稳态精度高, 但难以兼顾追踪速度和稳态精度, 变步长电导增量法^[7]在一定程度上改善了此问题。诸多学者基于电导增量法进行改进^[8-11], 文献^[12]

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-24, 2022-05-06;

录用日期: 2022-05-24; 网络首发日期: 2022-07-06

基金项目: 安徽省教育厅重点资助项目(KJ2021A0866); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

This work is supported by Education Department of Anhui Province under the grant KJ2021A0866; the Fundamental Research Funds for the Central Universities

在变步长的基础上增加了对跟踪比例系数的控制,但是此方法对跟踪比例系数的选择有要求,追踪速度和稳态精度也并未达到最优。

随着更多新颖算法的发展,智能算法^[13-14]也被应用到光伏 MPPT 控制算法中。文献[15]利用反向传播 BP(back propagation)神经网络预测最大功率点,但是 BP 神经网络需要大量数据计算,导致运行效率低,增加工业成本;文献[16]利用改进粒子群算法实现阴影情况下的最大功率点跟踪,但是该方法容易陷入局部峰值。上述智能算法控制策略复杂,不易于工业上的实现。

针对传统电导增量法存在的问题,本文提出了 1 种基于变步长不完全偏微分电导增量法的光伏 MPPT 算法。利用 $P-U$ 曲线的斜率来区分步长大小,大大提高了追踪速度;利用不完全微分来解决理想电导微分 $\Delta I/\Delta U$ 带来的噪声,有效减小了系统振荡。

1 光伏电池数学模型及输出特性

1.1 光伏电池数学模型

在理想状态下,光伏电池等效模型如图 1 所示。图中: I_{ph} 为光子在光伏电池中激发的电流; I_d 为流经 PN 结二极管的电流; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为旁漏电阻。

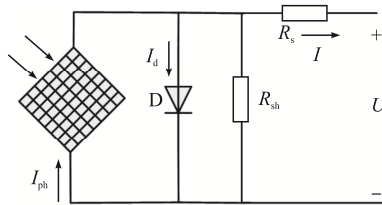


图 1 光伏电池等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of photovoltaic cell

通过光伏电池的等效电路模型,得到光伏电池输出电压、电流的关系为

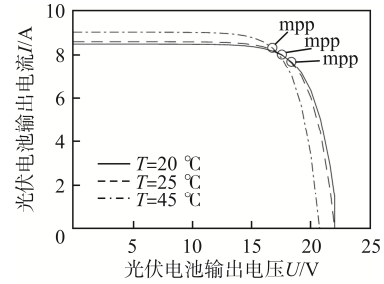
$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AKT} - 1 \right] \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{sh} 为经过旁漏电阻的电流; q 为单位电荷; I_0 为二极管反向电流; A 为二极管的品质因数; K

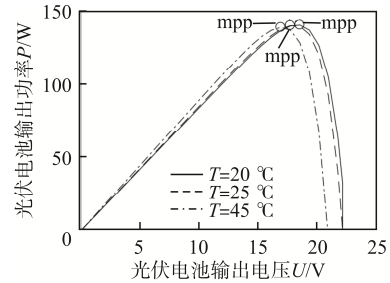
为玻尔兹曼常数; T 为光伏电池板的表面温度。

1.2 光伏电池的输出特性

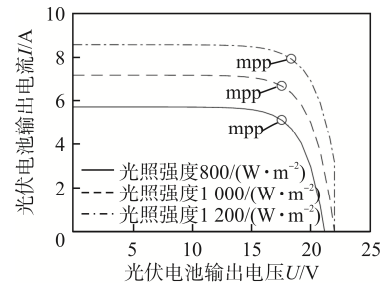
根据光伏电池数学模型搭建 Simulink 模型,设置参数为开路电压 $U_{oc}=22$ V, 短路电流 $I_{sc}=8.58$ A, 最大功率点处电压 $U_m=17.7$ V, 最大功率点处电流 $I_m=7.94$ A。光伏电池的输出特性曲线会受到外界环境的影响,如环境温度和光照强度,如图 2 所示。



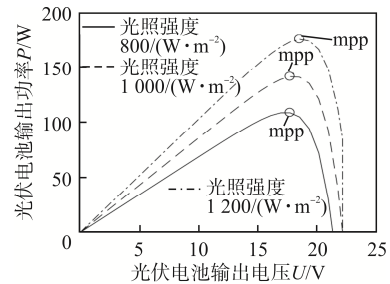
(a) 环境温度改变时, $I-U$ 特性曲线



(b) 环境温度改变时, $P-U$ 特性曲线



(c) 光照强度改变时, $I-U$ 特性曲线



(d) 光照强度改变时, $P-U$ 特性曲线

图 2 改变温度和光照强度时光伏电池特性曲线
Fig. 2 Photovoltaic cell characteristic curves when changing temperature and light intensity

图 2(a)和(b)是当固定光照为 $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 改变环境温度为 20、25、45 °C 下的光伏电池特性曲线。图 2(c)和(d)是固定环境温度为 25 °C 时, 改变光照强度为 800、1 000、1 200 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 下的光伏电池特性曲线。可见: 当光照强度不变时, 环境温度越高, 短路电流越大, 开路电压越小, 最大功率点 mpp 处电压越小; 当环境温度不变时, 光照强度越大, 短路电流越大, 开路电压也越大, 最大功率点 mpp 处电压相近。

2 传统电导增量法

由光伏电池的 $P-U$ 特性曲线可知, 最大功率点位于曲线波峰处, 此时曲线的斜率为 0, 则有

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (2)$$

移项可得

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (3)$$

传统电导增量法的控制策略流程如图 3 所示。

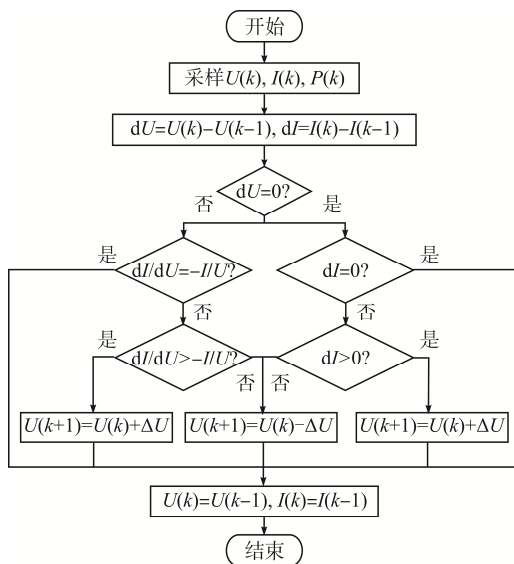


图 3 传统电导增量法的算法流程

Fig. 3 Flow chart of traditional incremental conductance method

电导增量法根据瞬时电导与电导变化量负值的大小决定电压的扰动方向。当 $dI/dU > -I/U$ 时, 工作点位于最大功率点左侧; 当 $dI/dU = -I/U$ 时,

工作点位于最大功率点处; 当 $dI/dU < -I/U$ 时, 工作点位于最大功率点右侧。电压扰动方向的判断条件为

$$\begin{cases} U(k+1) = U(k) + \Delta U & \frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U} \\ U(k+1) = U(k) & \frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \\ U(k+1) = U(k) - \Delta U & \frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k 为某一时刻。

3 改进电导增量法

3.1 不完全微分

不完全微分的概念源于不完全微分比例-积分-微分控制 PID(proportional-integral-derivative)^[17-18]。不完全微分 PID 即在 PID 算法中加入 1 个一阶惯性环节, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{1 + T_f s} \quad (5)$$

式中, T_f 为惯性系数。

微分部分的输入、输出关系为

$$y_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_f s + 1} x(s) \quad (6)$$

式中: y_D 为微分输出; K_D 为微分增益; T_D 为微分时间常数; x 为微分输入。

令式(6)中的 $K_D = 1$, $T_D = 1\text{ s}$, 取采样时间为 T_s , 将式(6)离散化为

$$y_D(k) + T_f \frac{y_D(k) - y_D(k-1)}{T_s} = \frac{x(k) - x(k-1)}{T_s} \quad (7)$$

由式(7)可得

$$y_D(k) = \alpha y_D(k-1) + b(1 - \alpha)[x(k) - x(k-1)] \quad (8)$$

式中: $\alpha = \frac{T_f}{T_s + T_f}$; $b = \frac{1}{T_s}$ 。

将 y_D 的原函数记为 yy_D , 则

$$y_D(k) = \frac{\partial yy_D(k)}{\partial t} = \frac{\Delta yy_D(k)}{T_s} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 整理得

$$\Delta yy_D(k) = \alpha \Delta yy_D(k-1) + (1 - \alpha) \Delta x \quad (10)$$

式中: $\Delta y y_D$ 为数学意义上的不完全微分; $\Delta x = x(k) - x(k-1)$ 。

将电流对电压的不完全偏微分定义为

$$\Delta IV(k) = \alpha \Delta IV(k-1) + (1-\alpha) \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (11)$$

式中, $\Delta IV(k)$ 为电流对电压的不完全偏微分, 与完全偏微分 $dI/dU (\Delta I/\Delta U)$ 对应。

3.2 追踪速度及系统振荡优化

电导增量法的原理本质上是扰动观察法的改进, 虽然稳态振荡的问题得到了较好的解决, 但是与扰动观察法相比, 其追踪速度降低了很多。图 4 为传统 P&O 和传统 INC 方法在同等条件下的功率输出对比曲线, 设置此时环境温度为 25 °C, 光照强度为 1 000 W·m⁻², 仿真时间为 0.3 s。在同等条件下, 传统 P&O 能更快地找到最大功率点, 但是系统振荡较大; 传统 INC 在找到最大功率点后几乎没有系统振荡, 但不能兼顾追踪速度。

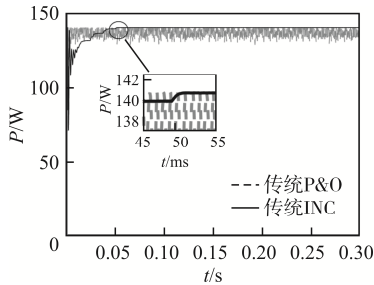


图 4 传统 P&O 和传统 INC 对比曲线

Fig. 4 Curves of traditional P&O method versus traditional INC method

针对传统 INC 无法同时兼顾追踪速度和稳态振荡的问题, 本文首先利用恒定电压法根据最大输出电压与开路电压在环境变化较小情况下存在一定线性关系, 即 $U_m = 0.7U_{oc}$, 快速启动到最大功率点附近, 靠近最大功率点时则采用改进电导增量法。当光伏工作电压位于最大功率点左侧, 即 $\Delta P/\Delta U > 0$ 时, 以当前工作电压与 $0.7U_{oc}$ 的大小关系判断当前工作电压是否远离最大功率点; 当光伏工作电压位于最大功率点右侧, 即 $\Delta P/\Delta U < 0$ 时, 经过计算远离最大功率点时 $P-U$ 曲线斜率均大于 5, 则当 $|\Delta P/\Delta U| \geq 5$ 时, 工作电压远离最大功率点处, 当 $|\Delta P/\Delta U| < 5$ 时, 工作电压靠近最大功率点处。

改进电导增量法进一步利用 $P-U$ 曲线的斜率来区分步长大小, 提高追踪速度, 即

$$\begin{cases} \Delta U_1 = 0.10 & \left| \frac{\Delta P}{\Delta U} \right| > e \\ \Delta U_2 = 0.01 & 0 < \left| \frac{\Delta P}{\Delta U} \right| < e \end{cases} \quad (12)$$

式中, ΔU_1 、 ΔU_2 分别为大步长、小步长。

取 $1.5 \leq e \leq 2.5$, 由 $P-U$ 特性曲线可知, 越靠近最大功率点, 曲线斜率越趋于平稳。若 e 取值偏大, 会降低最大功率点追踪速度; 若 e 取值偏小, 大步长会使工作电压跃过最大输出电压, 增加系统振荡次数。

因为理想微分的存在容易产生系统振荡, 所以当 $P-U$ 曲线斜率 $|\Delta P/\Delta U|$ 较小, 即在最大功率点附近时, 输出功率曲线无法稳定运行在最大功率点处。不完全偏微分具有良好的滤波功能, 可以避免理想微分带来的系统振荡。改进 INC 在原固定小步长 ΔU_2 中结合完全微分和不完全偏微分的判断条件, 自适应扰动步长的判断条件为

$$\Delta U_{20} = [\delta \operatorname{sgn}(C_1) + (1-\delta) \operatorname{sgn}(C_2)] \Delta U_2 \quad (13)$$

式中: $C_1 = \frac{dI}{dU} + \frac{I}{U}$; $C_2 = \Delta IV + \frac{I}{U}$;

$$\operatorname{sgn}(C_1) = \begin{cases} 1 & \frac{dI}{dU} + \frac{I}{U} > 0 \\ 0 & \frac{dI}{dU} + \frac{I}{U} = 0; \\ -1 & \frac{dI}{dU} + \frac{I}{U} < 0 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(C_2) = \begin{cases} 1 & \Delta IV + \frac{I}{U} > 0 \\ 0 & \Delta IV + \frac{I}{U} = 0。 \\ -1 & \Delta IV + \frac{I}{U} < 0 \end{cases}$$

取 $0.55 \leq \delta \leq 0.65$, 由完全偏微分和不完全偏微分同时决定扰动步长的方向和大小。若 δ 取值过小, 不完全偏微分比重过大, 会导致系统振荡次数增加; 若 δ 取值过大, 不完全偏微分比重过小, 不能较好地解决理想微分带来的系统振荡。改进电导增量法的控制策略流程如图 5 所示。

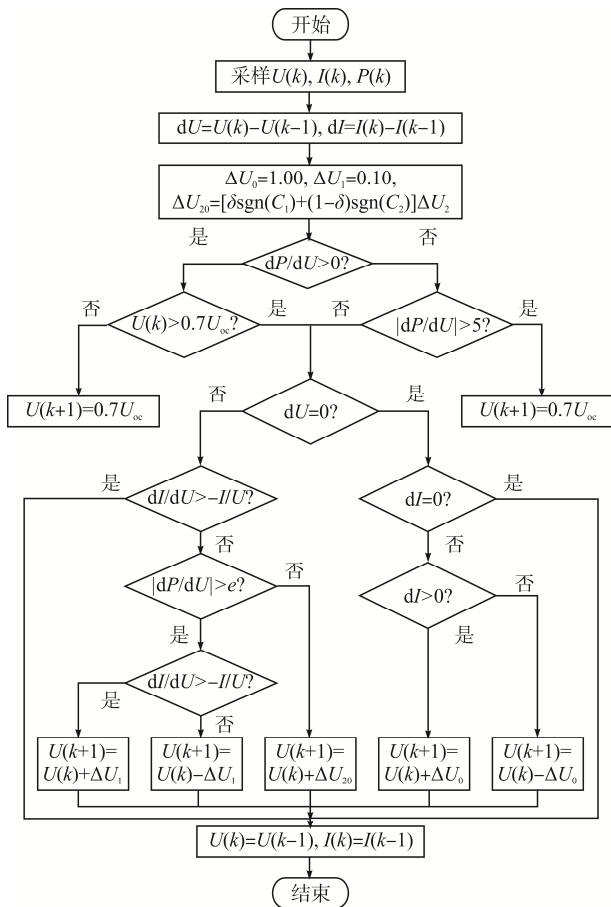


图 5 改进电导增量法的算法流程

Fig. 5 Flow chart of improved incremental conductance method

4 仿真结果与对比分析

为验证所提改进电导增量法的有效性, 在 MATLAB/Simulink 平台中搭建光伏电池模块、Boost 电路模块及 MPPT 控制算法模块, 如图 6 所示。Boost 电路参数见表 1。

表 1 Boost 电路参数

Tab. 1 Boost circuit parameters

参数	数值
滤波电容 $C_1/\mu\text{F}$	100
滤波电容 $C_2/\mu\text{F}$	300
储能电感 L/mH	1
负载 R/Ω	7
开关频率 f/Hz	25 000

固定环境温度为 25°C , 光照强度为 $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $e=2$, $\delta=0.6$ 。在同等仿真条件下, 将传统 P&O、传统 INC、改进 INC 进行对比分析, 光伏电池输出功率及输出电压曲线如图 7 所示。可见, 传统 P&O 在 0.002 s 达到最大功率点, 但系统振荡较大, 传统 INC 和改进 INC 分别在 0.055 和 0.009 s 达到最大功率点并保持稳定。传统 P&O 电压振荡幅度在 15.30~19.39 V 之间, 传统 INC 在找到最大功率点

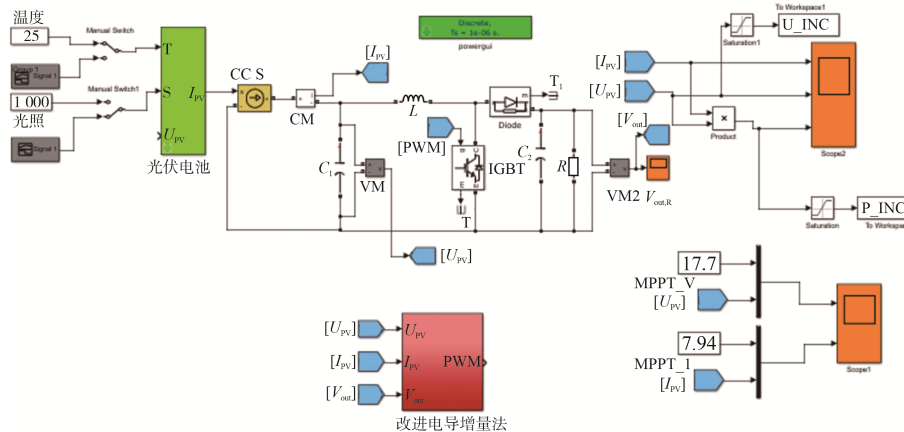


图 6 MPPT 仿真模型

Fig. 6 MPPT simulation model

后产生的电压振荡幅度在 17.82~17.98 V 之间, 改进 INC 产生的电压振荡幅度在 17.90~17.96 V 之间。

为研究不同控制算法下光照强度对光伏电池输出特性的影响, 在仿真过程中, 固定环境温度

为 25°C , 令光照强度在 0.1 s 时从 $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 突升为 $1500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 在 0.2 s 时从 $1500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 突降为 $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在同等仿真条件下, 将传统 P&O、传统 INC、改进 INC 进行对比分析, 光伏电池输出

功率及输出电压曲线如图 8 所示。

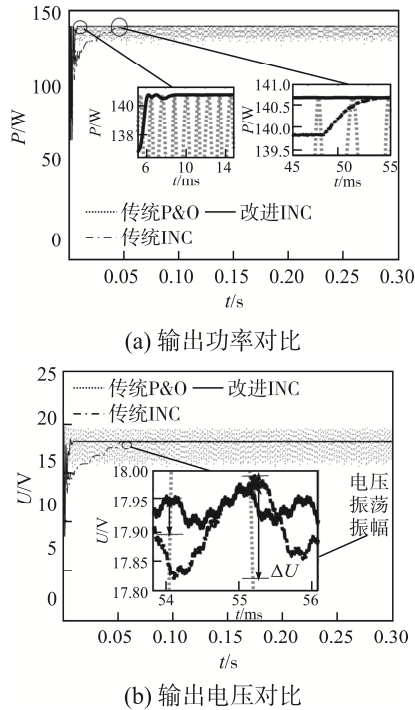


图 7 传统 P&O、传统 INC 及改进 INC 输出功率与输出电压对比
Fig. 7 Comparison of output power and output voltage among traditional P&O, traditional INC and improved INC methods

由图 8 可以看出,当光照强度为 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,传统 P&O 在 $0.002\ 0\ \text{s}$ 即可达到最大功率点,但系统振荡较大,传统 INC 和改进 INC 达到最大功率点分别耗时 $0.055\ 0\ \text{s}$ 和 $0.009\ 0\ \text{s}$ 。在 $0.1\ \text{s}$ 时光照强度从 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 突升为 $1\ 500\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,传统 P&O 在 $0.102\ 0\ \text{s}$ 时重新找到最大功率点,传统 INC 和改进 INC 重新找到最大功率点并保持稳定分别耗时 $0.011\ 0\ \text{s}$ 和 $0.003\ 0\ \text{s}$ 。在光照强度突

表 2 光照强度改变下,不同 MPPT 算法的追踪速度及平均输出功率

Tab. 2 Tracking speed and average output power of different MPPT algorithms under changes in light intensity

算法	追踪速度/s			平均输出功率/W		
	光照强度	光照强度	光照强度	光照强度	光照强度	光照强度
	$1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$1\ 500\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$800\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$1\ 500\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$800\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
传统 P&O	0.002 0	0.002 0	0.001 0	135.04	226.28	101.58
传统 INC	0.055 0	0.011 0	0.018 5	136.28	229.03	107.54
改进 INC	0.009 0	0.003 0	0.005 5	139.60	229.28	107.65

为了研究不同控制算法下环境温度对光伏电池输出特性的影响,固定光照强度为 $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

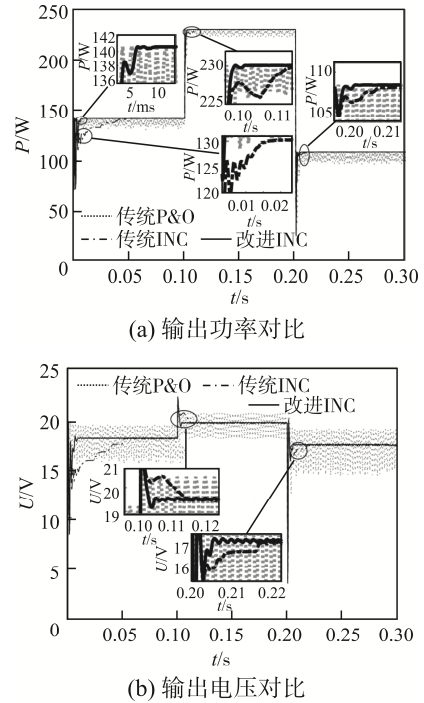


图 8 光照强度改变下,传统 P&O、传统 INC 及改进 INC 输出功率与输出电压对比

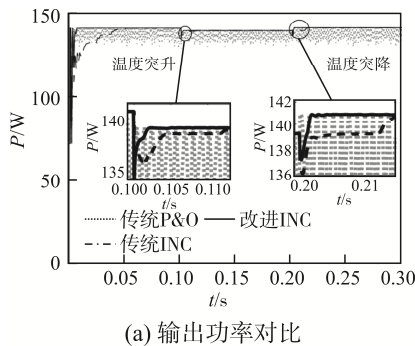
Fig. 8 Comparison of output power and output voltage among traditional P&O, traditional INC and improved INC methods under changes in light intensity

增时,传统 INC 下输出电压会突增到 $22.02\ \text{V}$,然后稳定在 $19.45\ \text{V}$ 附近;改进 INC 下输出电压会突增到 $22.01\ \text{V}$,然后稳定在 $19.50\ \text{V}$ 附近。在 $0.2\ \text{s}$ 时光照强度从 $1\ 500\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 突降为 $800\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,传统 P&O 在 $0.201\ 0\ \text{s}$ 重新找到最大功率点并产生振荡,传统 INC 和改进 INC 重新找到最大功率点并保持稳定分别耗时 $0.018\ 5\ \text{s}$ 和 $0.005\ 5\ \text{s}$ 。为更加直观对比不同控制算法下输出功率的准确性,计算了 3 种 MPPT 算法仿真的平均输出功率,见表 2。

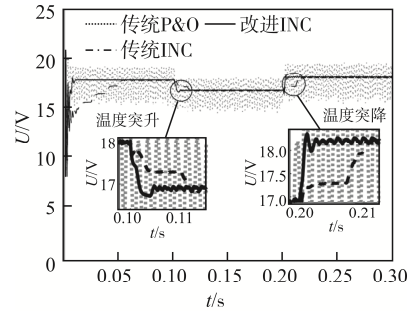
令环境温度在 $0.1\ \text{s}$ 时从 $25\ ^\circ\text{C}$ 突升为 $45\ ^\circ\text{C}$,在 $0.2\ \text{s}$ 时从 $45\ ^\circ\text{C}$ 突降为 $20\ ^\circ\text{C}$ 。在同等仿真条件下,将传

统 P&O、传统 INC、改进 INC 进行对比分析, 光伏电池输出功率及输出电压曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 当环境温度为 25 °C 时, 传统 P&O 在 0.002 0 s 即可达到最大功率点, 但系统振荡较大, 传统 INC 和改进 INC 达到最大功率点耗时 0.055 0 s 和 0.009 0 s。在 0.1 s 时环境温度从 25 °C 突升为 45 °C, 传统 P&O 在 0.101 0 s 时重新找到最大功率点, 传统 INC 和改进 INC 重新找到最大功率点并保持稳定分别耗时 0.013 5 s 和 0.002 0 s。在 0.2 s 时环境温度从 45 °C 突降为 20 °C, 传统 P&O



(a) 输出功率对比



(b) 输出电压对比

图 9 环境温度改变下, 传统 P&O、传统 INC 及改进 INC 输出功率与输出电压对比

Fig. 9 Comparison of output power and output voltage among traditional P&O, traditional INC and improved INC methods under changes in ambient temperature

在 0.201 0 s 重新找到最大功率点并产生振荡, 传统 INC 和改进 INC 重新找到最大功率点并保持稳定分别耗时 0.015 5 s 和 0.004 5 s。为更加直观对比输出功率的准确性, 计算了 3 种 MPPT 算法仿真的平均输出功率, 见表 3。

表 3 环境温度改变下, 不同 MPPT 算法的追踪速度及平均输出功率

Tab. 3 Tracking speed and average output power of different MPPT algorithms under changes in ambient temperature

算法	追踪速度/s			平均输出功率/W		
	环境温度	环境温度	环境温度	环境温度	环境温度	环境温度
	25 °C	45 °C	20 °C	25 °C	45 °C	20 °C
传统 P&O	0.002 0	0.001 0	0.001 0	135.04	135.06	136.12
传统 INC	0.055 0	0.013 5	0.015 5	136.28	139.05	140.64
改进 INC	0.009 0	0.002 0	0.004 5	139.60	139.15	140.85

经计算, 在外界环境条件改变的情况下, 改进 INC 相比于传统 INC 最大功率点追踪耗时最多缩短了 57.5%, 最少缩短了 33.6%, 相比于传统 P&O 平均输出功率提升效率最大达到 6.1%。由此可知, 与传统 P&O 和传统 INC 相比, 改进 INC 在光照强度突变和环境温度突变的情况下, 均能够更快、更稳地再次追踪到最大功率点, 且产生的功率振荡幅度和电压振荡幅度更小, 减少了功率损失, 提高了光伏电池的转换效率。

5 结语

基于传统 P&O 和传统 INC 无法兼顾追踪速度

和稳态振荡的问题, 提出了 1 种基于变步长不完全偏微分电导增量法。改进 INC 首先通过 $P-U$ 曲线斜率区分步长, 以此来提高追踪速度, 再利用不完全偏微分加入到小步长的判断条件中, 来解决理想微分造成最大功率点附近振荡的问题。在 MATLAB/Simulink 中搭建模型进行仿真, 并在变光照强度的情况下, 将传统 P&O、传统 INC 和改进 INC 进行对比分析, 结果表明, 改进 INC 不仅能更快、更稳的达到最大功率点, 而且功率损耗最小, 提高了光伏发电的效率。

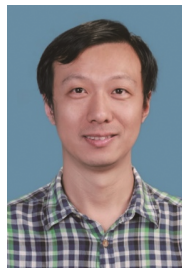
参考文献:

[1] 花赞昊, 朱武, 郭启明. 光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1855-1858.

- Hua Yunhao, Zhu Wu, Guo Qiming. Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(12): 1855-1858. (in Chinese)
- [2] Bollipo R B, Mikkili S, Bonthagorla P K. Critical review on PV MPPT techniques: Classical, intelligent and optimization [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1433-1452.
- [3] Troudi F, Jouini H, Mami A, et al. Comparative assessment between five control techniques to optimize the maximum power point tracking procedure for PV systems [J]. Mathematics, 2022, 10(7): 1080.
- [4] Dahate N, Bhasme N R. Review on MPPT techniques used in PV system [J]. International Journal of Electrical Engineering and Technology, 2019, 10(4): 22-30.
- [5] 付光杰, 暴蕊, 江雨泽, 等. 基于功率预测变步长扰动观察法的最大功率追踪[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(5): 531-538.
Fu Guangjie, Bao Rui, Jiang Yuze, et al. Maximum power tracking based on variable step size perturbation observation method for power prediction [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2021, 39(5): 531-538. (in Chinese)
- [6] 李崎勇, 张伟斌, 武泽中, 等. 基于稳态无振荡INC的MPPT控制策略[J]. 电源技术, 2021, 45(2): 217-221.
Li Jiyong, Zhang Weibin, Wu Zezhong, et al. MPPT control strategy based on steady state non-oscillating conductance increment algorithm [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(2): 217-221. (in Chinese)
- [7] Chai Yingbo, Pu Xie. Variable step-size incremental conductance method used in PV power system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 295(4): 042006.
- [8] 徐建国, 沈建新, 王海新, 等. 基于新型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 可再生能源, 2018, 36(9): 1305-1313.
Xu Jianguo, Shen Jianxin, Wang Haixin, et al. Maximum power point tracking strategy based on novel variable step-size incremental conductance algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(9): 1305-1313. (in Chinese)
- [9] 刘聘凭, 程若发, 许立斌, 等. 基于光伏MPPT采样电流的自适应变步长 INC 算法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 58-66.
- Liu Pingping, Cheng Ruofa, Xu Libin, et al. Adaptive variable-step INC algorithm based on PV MPPT sampling current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 58-66. (in Chinese)
- [10] Djilali A, Yahdou A, Bounadja E, et al. Stopping the drift problem in the tracking of maximum power point for photovoltaic system by using modified variable step size incremental conductance method [J]. European Journal of Electrical Engineering, 2020, 22(3): 273-283.
- [11] Qin Yiheng, Shi Weifeng, Xie Jialing. Research on MPPT control of photovoltaic cells based on the combination of conductance increment method and fuzzy control [J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(6): 78-87.
- [12] 胡可维, 冉峰, 秦嘉琦, 等. 一种优化变步长电导增量法的 MPPT 控制[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(5): 745-754.
Hu Kewei, Ran Feng, Qin Jiaqi, et al. MPPT control of a incremental conductance method with optimized variable step size [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(5): 745-754. (in Chinese)
- [13] 原琳, 程海军, 赵凤贤. 自适应果蝇算法多峰值光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 168-174.
Yuan Lin, Cheng Haijun, Zhao Fengxian. Maximum power point tracking of multi-peak PV array using adaptive fruit fly optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 168-174. (in Chinese)
- [14] Li Jianpo, Dong Pengwei. Global maximum power point tracking for solar power systems using the hybrid artificial fish swarm algorithm [J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 351-360.
- [15] Ye Songpei, Liu Yihua, Liu Chunyu, et al. Artificial neural network assisted variable step size incremental conductance MPPT method with adaptive scaling factor [J]. Electronics, 2021, 11(1): 43.
- [16] 王硕禾, 郑俊观, 陈祖成, 等. 基于改进粒子群优化算法光伏阵列多峰值 MPPT 的研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(6): 879-885.

- Su Jianqiang, Ren Kaibin, Liu Liqiang, et al. Research on secondary-side closed-loop control of LCC-S resonant wireless charging based on ADRC [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 111-119. (in Chinese)
- [23] 彭思敏, 张慧成, 吴铁洲, 等. 基于线性自抗扰控制的无线电能恒压无通信传输方法[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 120-128.
- Peng Simin, Zhang Huicheng, Wu Tiezhou, et al. Constant-voltage no-communication method of wireless power transfer based on linear active disturbance rejection control [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 120-128. (in Chinese)
- [24] Neath M J, Swain A K, Madawala U K, et al. An optimal PID controller for a bidirectional inductive power transfer system using multiobjective genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1523-1531.
- [25] 夏晨阳, 李晓丽, 韩潇左, 等. IPT 系统线性自抗扰恒压输出和最大效率跟踪复合控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6042-6052, 6178.
- Xia Chenyang, Li Xiaoli, Han Xiaozuo, et al. A hybrid

control method for achieving constant voltage output with LADRC and maximum efficiency tracking for IPT systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6042-6052, 6178. (in Chinese)



黄文聪

作者简介:

黄文聪(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授。研究方向: 电力电子与电力传动、无线电能传输、人工智能与智能制造技术。E-mail: hwc@hbut.edu.cn。

蒋焯焱(2001—), 男, 本科。研究方向: 无线电能传输抗偏移研究。E-mail: 1943050014@qq.com。

常雨芳(1980—), 女, 博士, 教授。研究方向: 电力电子、无线电能传输、微电网。E-mail: changyf@hbut.edu.cn。

谭海东(2001—), 男, 本科。研究方向: 无线电能传输。E-mail: haidongtan@126.com。

朱祺浩(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输。E-mail: 1575714814@qq.com。

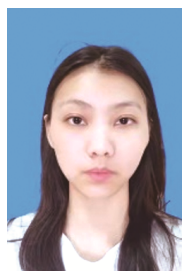
(责任编辑: 郭凯凯)

(上接第 132 页)

- Wang Shuohe, Zheng Junguan, Chen Zucheng, et al. Research on multi-peak MPPT of PV array based on improved PSO algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(6): 879-885. (in Chinese)
- [17] 王超, 杨莲红, 刘红. 基于 MATLAB 的不完全微分 PID 控制的设计与仿真[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2013, 23(4): 47-50.
- Wang Chao, Yang Lianhong, Liu Hong. Design and simulation of incomplete derivation PID control based on MATLAB [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 23(4): 47-50. (in Chinese)
- [18] 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[J]. 太阳能学报, 2016,

37(12): 3022-3029.

Dang Xuanju, Yang Yang, Jiang Hui, et al. MPPT control of adaptive step size perturb & observe method based on incomplete differential [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3022-3029. (in Chinese)



毛琳

作者简介:

毛琳(1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 光伏 MPPT 控制算法。E-mail: 2389522727@qq.com。

任正云(1969—), 男, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 非线性模型预测控制、组合积分系统先进控制。E-mail: renzhengyun@dhu.edu.cn。

(责任编辑: 耿越)