

基于双曲正切函数的光伏/温差自适应 MPPT 控制策略研究

王立舒¹, 白 龙^{1,2}, 房俊龙^{1*}, 李欣然¹, 李 闯¹, 董宇擎¹

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 牡丹江师范学院物理与电子工程学院, 牡丹江 157011)

摘 要: 为了提高光伏/温差联合发电系统的效率, 需要进行最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制。针对传统电导增量法步长固定不变导致跟踪速度慢和稳态误差大的缺点, 该研究提出一种恒定电压法和双曲正切型自适应变步长算法结合的 MPPT 控制策略。该策略利用双曲正切函数单调递增、变化速度快的特点, 使步长可以根据光强等外界环境条件的变化, 自适应地快速调整, 同时利用恒定电压法加快追踪的响应速度。Matlab/Simulink 软件仿真和硬件试验表明, 该研究所提方法在光照强度剧烈变化时, 系统能够在 15 ms 内快速跟踪到最大功率点, 同时稳态误差低于 0.3%, 实现了 MPPT 控制在跟踪速度和稳态精度方面的同步优化。

关键词: 光伏; 温差; 自适应; 双曲正切函数; MPPT

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.023

中图分类号: TK514; TM615; TM617

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0184-08

王立舒, 白龙, 房俊龙, 等. 基于双曲正切函数的光伏/温差自适应 MPPT 控制策略研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 184-191. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.023 http://www.tcsae.org

Wang Lishu, Bai Long, Fang Junlong, et al. Self-adaptive photovoltaic/temperature difference MPPT control strategy based on hyperbolic tangent function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 184-191. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.023 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着温室内传感器等装置的增多, 传统供电方式安装复杂、维护不便、性价比低的弊端日益显现, 环保、便捷的太阳能逐渐受到人们重视^[1-3]。但是光伏电池的发电效率会随着工作温度的升高而大幅降低^[4-6], 为了解决这个问题, Vorobiev 等^[7]提出了光伏/温差联合发电技术, 将光伏电池产生的多余热量作为温差发电系统的热源, 实现二次发电, 从而提高整个系统的发电效率。然而在实际使用中, 需要光伏/温差联合发电系统尽可能工作在最大功率点, 使系统发挥最大潜力。

目前, 常用的 MPPT 算法包括恒定电压法^[8] (Constant Voltage Tracking, CVT)、扰动观察法^[9] (Perturbation and Observation Method, P&O) 和电导增量法^[10-11] (Incremental Conductance, INC) 等, 此外, 一些智能启发式算法也被应用到最大功率点跟踪控制之中, 例如: 模糊控制^[12]、人工神经网络^[13]、粒子群算法^[14]等。其中, 电导增量法原理简单、实现容易, 但该方法有着比较明显的缺陷, 即采用固定步长, 选择不当会导致算法无法及时找到最大功率点或发生振荡。针对这个问题, 文献[15]将粒子群算法与电导增量法相结合, 首先利用粒子群算法预测最大功率点附近电压和电流, 然后利用电导增量

法根据这两个值来寻找最大功率点, 取得较好的跟踪效果。但该方法计算复杂度较高, 需要较高的硬件代价; 文献[16]将恒定电压法和电导增量法相结合, 在起始阶段利用恒定电压法快速定位到最大功率点附近, 然后利用电导增量法寻找最大功率点, 并通过改变比例因子 K 使步长可以动态变化。但是该方法仅仅只是利用传统电导增量法中的步长最大值对比例因子进行简单限制, 并没有真正实现自适应; 文献[17]采取了同样的控制策略, 不同的是比例因子 K 采用试凑法给定, 该方法的灵活性和鲁棒性较差; 文献[18]提出一种可根据外界环境变化自动调整步长的自适应电导增量法, 采用了一种新的步长调整系数, 提高了算法的响应速度。但该方法的实质与文献[16]和文献[17]相同, 只是步长调整因子的形式略有变化, 仍然无法做到真正意义上的自适应。

基于上述分析, 为了更好的实现光伏/温差联合发电系统的最大功率点跟踪控制, 本文提出一种自适应变步长电导增量算法与恒定电压法结合的控制策略。该方法利用双曲正切函数的特性, 使电导增量法的步长可以真正实现自适应变化, 有效提高了算法的跟踪速度和稳态特性。并通过实验证明了该方法的正确性和有效性。

1 系统结构

光伏/温差联合发电系统中, 光伏电池与温差发电片相连, 电池内多余的热量与冷却系统构成一个温差装置, 使温差发电片持续产生电能, 从而实现了太阳能的二次利用, 提高系统的输出效率。光伏/温差联合发电系统的结构如图 1 所示, 主要包括: 槽式抛物线形聚

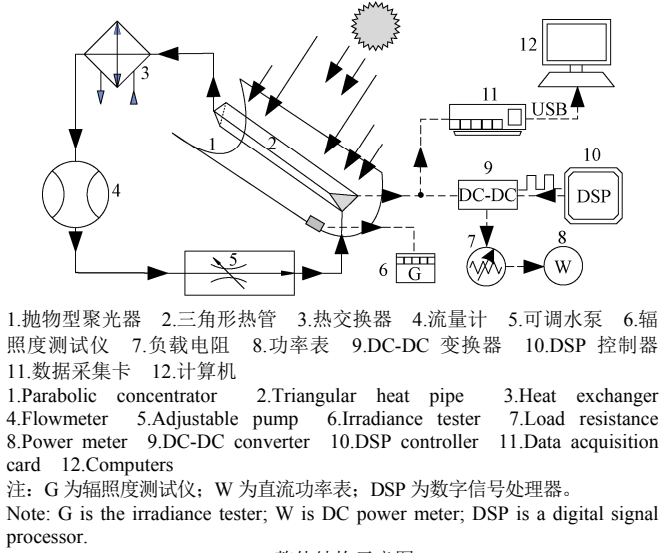
收稿日期: 2021-04-26 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 黑龙江省教育厅科技课题 (12521038); 黑龙江省教育厅基本科研业务费支持项目 (1353MSYYB015)

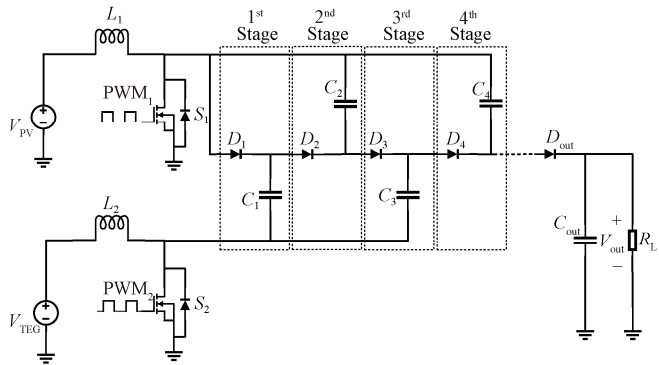
作者简介: 王立舒, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为农业电气化与自动化; 电力新能源开发与利用。Email: wanglishu@neau.edu.cn

*通信作者: 房俊龙, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为农业电气化与自动化; 电力新能源开发与利用。Email: junlongfang@126.com

光器, 三角形热管^[19-21] (两侧由内向外依次为温差发电片组和光伏电池)、热交换器、流量计、可调水泵、MPPT 控制器、数据采集卡、双输入 DC-DC 变换器 (如图 1b 所示) 和负载等。如图 1a 所示, 太阳光经抛物型聚光器反射到光伏电池上, 被光伏电池吸收的光能一部分转换为电能, 另一部分转换成热能传递给温差发电片组的热端, 温差发电片组的冷端经热管中的水冷却, 形成温差发电。



a. 整体结构示意图
a. Schematic diagram of the whole structure



b. 双输入高增益 DC-DC 变换器电路
b. Double input high gain DC-DC converter circuit

图 1 光伏/温差联合发电系统的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the photovoltaic / thermoelectric power generation system

如图 1b 所示, 双输入 DC-DC 变换器电路中, 二极管和电容组成电压倍增器 (VM 级) 与 2 个升压级集成在输入端。VM 级用于帮助升压级实现更高的整体电压增益。电压转换比率取决于 VM 级的数目和输入升压级的开关占空比。图 1b 显示了所提出的具有 4 个 VM 阶段的转换器。为了简单和更好的理解, 这里解释具有 4 个乘法器阶段的转换器的操作。类似分析可以扩展到 N 级变换器。

当通过 VM 级给电容器充电时, 电荷逐渐从输入转移到输出, L_1 两端电源可近似为 0。

$$V_{L1} = 0 \quad (1)$$

电容 C_1 和 C_2 两端电压如公式 (2) 和 (3)。

$$V_{C1} = V_{C3} - V_{C2} = V_{out} - V_{C4} = \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} \quad (2)$$

$$V_{C2} - V_{C1} = V_{C4} - V_{C3} = \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)} \quad (3)$$

式中 d_1 和 d_2 分别为场效应管 S_1 和 S_2 的开关占空比, V_{C3} 和 V_{C4} 为电容 C_1 和 C_2 两端电压, V。由式 (2) 和式 (3) 可得四 VM 级变换器的电容器电压如公式 (4) 所示。

$$\begin{cases} V_{C1} = \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} \\ V_{C2} = \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} + \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)} \\ V_{C3} = \frac{2V_{PV}}{(1-d_1)} + \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)} \\ V_{C4} = \frac{2V_{PV}}{(1-d_1)} + \frac{2V_{TEG}}{(1-d_2)} \end{cases} \quad (4)$$

由式 (2) 可得输出电压如公式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{C4} - \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} \\ &= \frac{3V_{PV}}{(1-d_1)} + \frac{2V_{TEG}}{(1-d_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

类似分析可以推广到具有 n 个 VM 级的变换器, 因此 VM 级电容器电压如公式 (6) 所示。

$$\begin{cases} V_{cn} = \left(\frac{n+1}{2}\right) \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} + \left(\frac{n-1}{2}\right) \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)}, & n \text{ 为奇数} \\ V_{cn} = \left(\frac{n}{2}\right) \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} + \left(\frac{n}{2}\right) \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

具有 n 个 VM 级变换器的输出电压方程如公式 (7) 所示。

$$\begin{cases} V_{out} = V_{cn} + \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)} \\ = \left(\frac{n+1}{2}\right) \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} + \left(\frac{n+1}{2}\right) \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)}, & n \text{ 为奇数} \\ V_{out} = V_{cn} + \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} \\ = \left(\frac{n+2}{2}\right) \frac{V_{PV}}{(1-d_1)} + \left(\frac{n}{2}\right) \frac{V_{TEG}}{(1-d_2)}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

2 自适应变步长 MPPT 控制

电导增量法诞生之初, 由于算法性能非常依赖于电压和电流检测的精度和速度^[22-24], 因此使用的较少。但是随着微电子、集成电路以及传感技术的飞速发展, 高速、高精度数模转换器和高性能 DSP 等大量出现, 使得电导增量法的推广使用成为可能^[25-27]。

2.1 电导增量法的基本原理

图 2 所示为不同温度、不同光照情况下, 光伏/温差联合发电系统的输出特性曲线。从图中可知, 电压-功率曲线是一个单峰曲线, 因此必然存在一个唯一的最大功率, 使得 $dP/dU = 0$ 。由功率 P 和电压 U 、电流 I 之间的关系可得:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (8)$$

由于只有一个最大功率 U_{\max} , 因此可以分 3 种情况考虑:

- ① $\frac{dP}{dU} > 0$, 即 $\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}$, 此时所得功率 $U < U_{\max}$;
- ② $\frac{dP}{dU} < 0$, 即 $\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$, 此时所得功率 $U > U_{\max}$;
- ③ $\frac{dP}{dU} = 0$, 即 $\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}$, 此时所得功率 $U = U_{\max}$ 。

由此可见, 通过比较 $\frac{dI}{dU}$ 与 $-\frac{I}{U}$ 之间的关系就可判断当前所得功率 U_{ref} 是否为最大功率。如果为情况①, 则

$$U_{\text{ref}} = U + \Delta U \quad (9)$$

如果为情况②, 则

$$U_{\text{ref}} = U - \Delta U \quad (10)$$

电导增量法的明显缺陷就是步长 ΔU 固定且需要凭借经验或试凑法给定。选择不当, 会对算法性能产生较大影响。如果 ΔU 过大, 最大功率点的跟踪性能较好, 但是存在严重振荡现象, 稳态误差较大; 相反, 如果 ΔU 过小, 振荡现象减弱, 但跟踪速度又会变慢。因此, 固定步长电导增量法在实际使用中效果并不好。

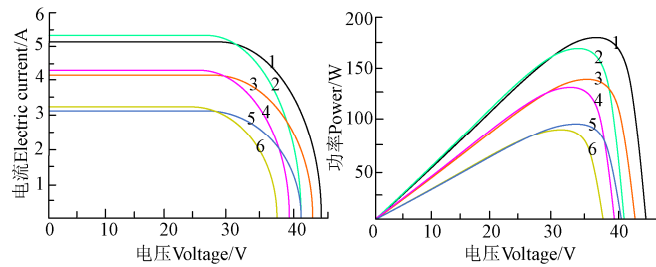


图 2 不同温度、不同光照下系统输出特性
a. 电压-电流特性曲线 b. 电压-功率特性曲线
a. Voltage-current characteristic curve b. Voltage-power characteristic curve
注: 1、3、5 为光照强度分别为 800、600、400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 电压-电流和电压-功率曲线; 2、4、6 为光照强度分别为 800、600、400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 电压-电流和电压-功率曲线。
Note: 1, 3 and 5 are the voltage-current and voltage-power curves when the light intensity is 800, 600 and 400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, at 25 $^{\circ}\text{C}$; 2, 4 and 6 are the voltage-current and voltage-power curves when the light intensity is 800, 600 and 400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, and the temperature is 50 $^{\circ}\text{C}$.

Fig.2 Output characteristics of the system under different temperatures and lighting conditions

2.2 自适应变步长电导增量法

考虑常规电导增量法的缺陷, 一个很自然的改进思路就是动态的调整步长。当系统输出功率距离最大功率点较远时, 步长应设置的大一些, 使系统动态响应速度加快; 当系统输出功率接近最大功率点时, 减小步长降低系统的稳态误差, 防止系统出现振荡。从电导增量法的基本原理可知, 步长的变化与 dI/dU 之间存在较强的

关系, 因此可将 dI/dU 作为步长调整的一个系数。

定义如下的双曲正切型函数:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

其特性曲线如图 3 所示。

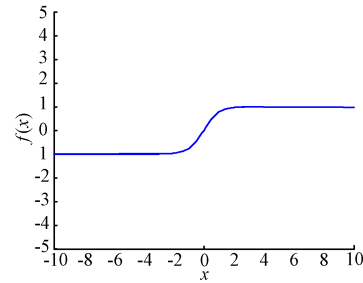


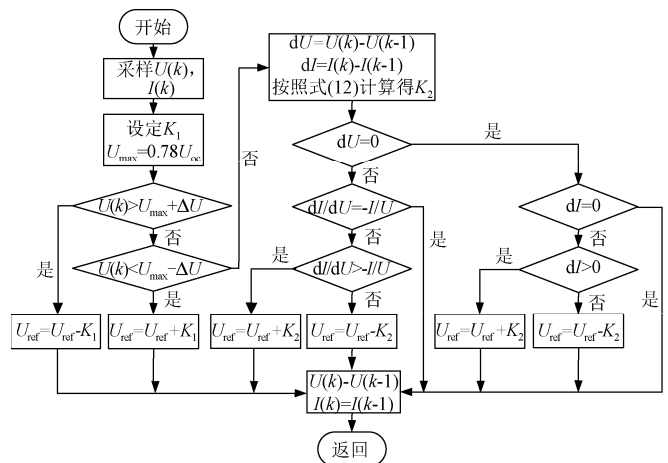
图 3 双曲正切函数特性

Fig.3 characteristics of hyperbolic tangent function

由图 3 可知, 双曲正切函数是一个单调递增函数, $f(x)$ 取值范围为 $[-1, 1]$, 且当 $x \in [-\infty, -2]$ 及 $x \in [2, \infty]$ 时, $f(x)$ 几乎取正负最大值; 而当 $x \in [-2, 2]$ 时, x 以单调递增方式快速变化。这与所期望的步长变化特性完全一致, 因此考虑将 $dI(k)/dU(k)$ 作为函数自变量, 将步长 $\Delta U(k)$ 作为函数变量。此外, 从大量的实践经验可知, 固定步长电导增量法一般都存在一个步长设定的最大值 ΔU_{\max} , 变步长电导增量法的步长变化时也不应超过此值。综合考虑这些因素, 本文提出的步长自适应调整公式为

$$\Delta U(k) = \Delta U_{\max} \times \frac{e^{\frac{dI(k)}{dU(k)}} - e^{-\frac{dI(k)}{dU(k)}}}{e^{\frac{dI(k)}{dU(k)}} + e^{-\frac{dI(k)}{dU(k)}}} \quad (12)$$

如此一来, 在系统输出功率远离最大功率点时, 几乎以最大步长进行调整; 而当输出功率接近最大功率点时, 又能快速减小步长。同时追踪启动时, 利用恒定电压法快速定位到最大功率点附近, 从而使系统的跟踪特性和稳态误差同时取得较好效果。结合了恒定电压法的自适应变步长电导增量法的实现流程如图 4 所示。



注: 图中字母参考公式解释。

Note: Explanation of letter reference formula in the figure.

图 4 自适应变步长电导增量法实现流程

Fig.4 Implementation flow of adaptive variable step size conductance increment method

3 试验分析

3.1 仿真试验分析

为了检验本文所提自适应变步长电导增量法在光伏/温差联合发电系统最大功率点跟踪控制中的性能，利用 Matlab/Simulink 软件平台组建仿真模型，对算法进行仿真试验，并从首次跟踪到最大功率点所需时间（启动时

间）、环境（辐照度）剧烈变化时再次跟踪到最大功率点所需时间、系统输出功率的平均值和稳态误差等方面进行算法优劣性分析。光伏/温差发电部分仿真结构如图 5 所示，本文采用的光伏电池仿真模型为晶澳公司的 JAMG-6-60-250/SI 型光伏组件，其部分主要参数如表 1 所示。温差发电片仿真模型为星河公司的 F40550，其部分主要参数如表 2 所示^[28]。

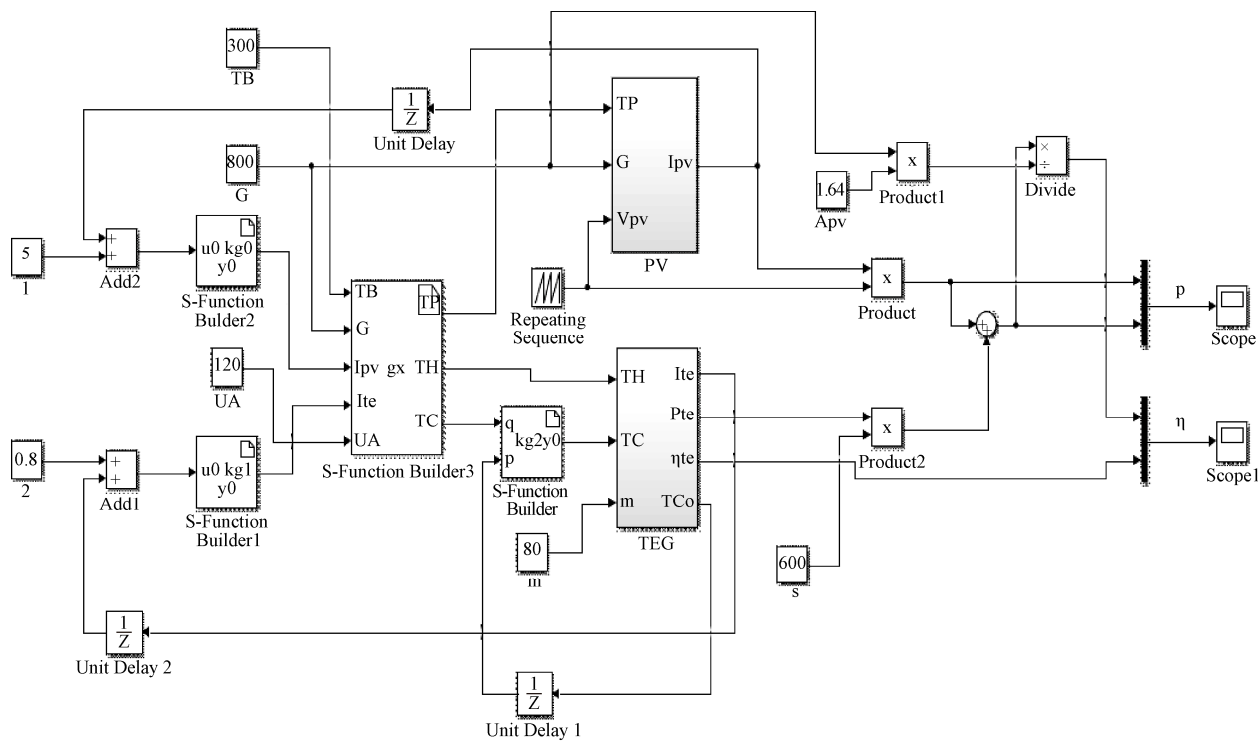


图 5 光伏/温差系统最大功率点跟踪控制仿真框图

Fig.5 Simulation block diagram of maximum power point tracking control for photovoltaic/temperature difference system

表 1 光伏电池主要参数表

Table 1 Main parameters of photovoltaic cells

光伏电池参数 PV parameters	数值 Values
短路电流 Short-circuit current I_{sc}/A	8.62
开路电压 Open circuit voltage V_{oc}/V	37.92
短路电流温度系数 Temperature coefficient of $I_{sc}/(^\circ C^{-1})$	0.04
开路电压温度系数 Temperature coefficient of $V_{oc}/(^\circ C^{-1})$	-0.3
最大功率 Maximum power/W	250

表 2 温差发电片主要参数

Table 2 Main parameters of thermoelectric generator

温差电池参数 TEG Parameters	20 $^\circ C$	40 $^\circ C$	60 $^\circ C$
开路电压 Open circuit voltage V_{oc}/V	32	55	81.8
最大电压 Maximum voltage V_{max}/V	15	25.2	36.8
最大电流 maximum current I_{max}/A	4.47	7.59	11.7
最大功率 Maximum power/W	66.0	198	408

评价 MPPT 算法最重要的就是验证其最大功率点的跟踪性能。仿真试验中，本文设计光照强度在 0.1 s 时由 400 W/m² 阶跃变为 1 000 W/m²，而在 0.2 s 时，又阶跃变回 400 W/m²。为了更为客观的评估算法性能，将本文算法与传统固定步长电导增量法，以及文献[18]提出的变步长电导增量法进行比较，结果如图 6 所示。其中，固定

步长电导增量法选择 2 种步长，分别是较小的 $\Delta U = 0.1$ ，以及较大的 $\Delta U = 0.5$ 。

由图 6 可知，本文所提变步长电导增量法的跟踪性能最佳。对于固定步长电导增量法，光照突然升高时，小步长和大步长的系统调节时间分别为 46.3 和 24.2 ms；光照突然降低时，系统调节时间分别为 34.8 和 13.5 ms；光照强度在 1 000 W/m² 稳定时，系统平均输出功率分别为 317.4 和 324.7 W。由此可见，当步长较大时，算法的启动速度和动态响应时间明显较好，但相应的稳态误差较大，输出功率振荡明显，导致系统的整体效率降低。文献[18]算法的性能要明显好于固定步长电导增量法。该方法使步长具有一定的自适应能力，光照突变时系统调节时间分别为 22.7 和 23.1 ms，光照强度为 1 000 W/m² 时，系统平均输出功率为 317.8 W，可见算法对系统的跟踪速度和稳态精度都有一定程度的改善。

本文所提变步长电导增量法在光照突变时的调节时间分别为 12.5 和 12.1 ms，系统平均输出功率在光照强度为 1 000 W/m² 时保持在 316.4 W 左右，无论相比较与固定电导增量法还是文献[18]的变步长电导增量法，系统跟踪速度和稳态精度都有很大程度的提高。这主要由于本文算法令步长按照双曲正切形式连续变化，使算法真正

实现了快速、自适应跟踪实际的最大功率点, 因此算法

的性能最优。

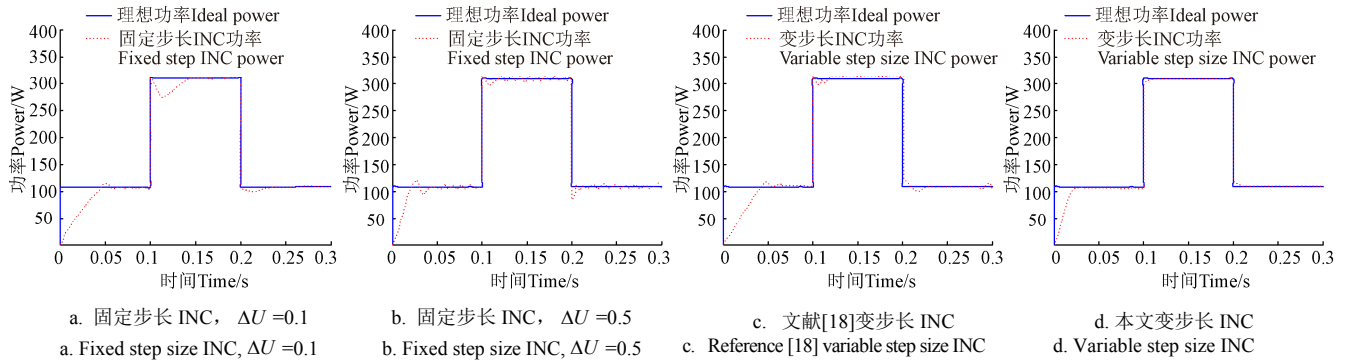


图 6 算法跟踪性能比较

Fig.6 Comparison of tracking performance of algorithms

为了更为具体的比较本文算法和文献[18]算法的优劣, 将光照变化时算法步长的变化情况给出, 如图 7 所示。可以明显看出, 无论是光照强度突然升高还是突然降低, 文献[18]算法的步长变化都较为凌乱, 步长时大时小, 没有向着一个方向连续变化, 说明调节过程中存在调节过大的情况, 而且即使系统输出稳定后, 也时而存在步长不为 0 的情形。而本文算法在光照突然升高和降低时, 步长变化趋势一致, 调节迅速, 在系统输出功率稳定后步长一直保持为 0, 非常好的实现了最大功率点跟踪控制。

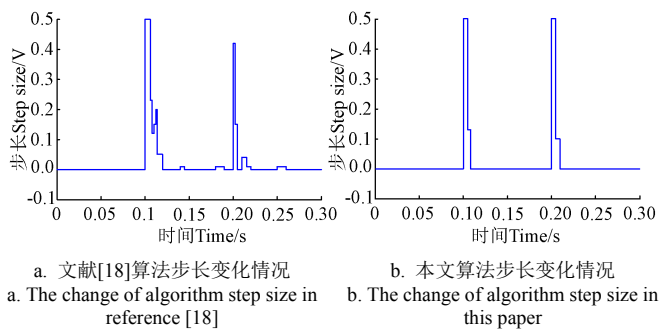


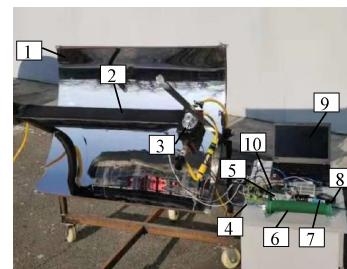
图 7 算法步长变化情况比较

Fig.7 Comparison of algorithm step size

3.2 硬件试验

2020 年 10 月, 在东北农业大学进行了最大功率点跟踪试验, 试验装置如图 8 所示。控制器采用的是 TI 公司的 TMS320LF2407A。JXBS-3001-ZFS 太阳辐射传感器测量辐照度, 测量范围 $0 \sim 1500 \text{ W/m}^2$, RS485 输出。PZEM-031 直流多功能表测量输出电压与输出电流, 计量精度 1.0 级, 电压测量范围 $6.5 \sim 100 \text{ V}$, 电流测量范围 $0 \sim 20 \text{ A}$ 。负载为阻值 150Ω 的大功率电阻。多晶硅光伏电池尺寸制定为 $700 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 2.3 \text{ mm}$, 开路电压 4.44 V , 短路电流 1.81 A , 温差发电部分采用 14 个型号为 SP1848-27145 的温差发电片进行串联, 并根据变步长电导增量法控制策略产生相应的 PWM 实现 MPPT 控制。为了验证本文算法具有较强的实用性, 能够适应不同的环境条件, 因而选择光照度和温度逐渐增强和基本不变的 2 个时间段^[29-30]A ($8:00 \sim 9:00$)、B ($12:00 \sim 13:00$) 进行电压和电流的数据采集以及跟踪试验, 分别在 A、B 两个时间段的第 1 min、第 31 min 和第 60 min, 每隔 1 ms 采集一个电压电流数据, 将采集到的数据进行功率计算,

并计算结果的平均值, 试验测得结果如表 3 所示。2 个时间段本文自适应电导增量法首次跟踪到最大功率点所用的时间分别为 13.8 和 13.4 ms; 平均输出功率为 71.5 和 96.58 W, 与系统理论输出功率相差 7% 左右, 主要因为试验采用的多晶硅电池纯度不高, 测量仪器存在一定的误差导致。但试验结果趋势与仿真结果基本相符, 能够达到提高跟踪速度与系统稳定同步优化的目的。可以看出, 利用本文算法进行 MPPT 控制后, 当光照强度变化时, 步长变化趋势一致, 功率输出波动更小, 调节速度快, 自适应性好, 系统可在 15 ms 内快速追踪并稳定在最大功率点, 且系统稳态误差低于 0.3%。



1.抛物型聚光器 2.光伏温差混合发电系统 3.辐照度测试仪 4.DC-DC 变换器 5.数据采集卡 6.负载 7.USB 转 485 模块 8.直流多功能表 9.计算机 10.DSP
1.Parabolic concentrator 2.Photovoltaic thermoelectric hybrid power generation system 3.Irradiance tester 4.DC-DC converter 5.Data acquisition card 6.Load 7.USB to 485 module 8.DC multi-function meter 9.Computers 10.DSP

图 8 MPPT 硬件试验装置

Fig.8 MPPT hardware experimental device

表 3 硬件试验数据对比

Table 3 comparison of hardware experimental data

项目 Item	系统响应时间 System response time/ms			系统平均功率 System average power/W		系统稳态误差 System steady-state error/%	
	启动 Start	A 时段 A period	B 时段 B period	A 时段 A period	B 时段 B period	A 时段 A period	B 时段 B period
固定步长 INC Fixed step size INC	24.3	15.2	14.7	68.75	92.15	4.91	1.36
文献[18]算法 Reference [18] algorithm	32.2	26.5	25.4	70.86	95.35	1.38	0.47
本文算法 Algorithm in this paper	19.1	13.8	13.4	71.15	96.58	0.26	0.16

4 结 论

本文重点研究光伏/温差联合发电系统的最大功率点跟踪控制。针对传统电导增量法步长固定选取的缺点, 提出了一种采用双曲正切形式渐变步长的自适应步长电导增量法与恒定电压法相结合的控制策略。并分别进行了仿真和硬件试验, 由试验结果可得到以下结论:

1) 相比于传统固定步长电导增量法, 本文提出的自适应步长电导增量法可以有效降低系统启动时间, 在光照突变时, 系统可以在 15 ms 内快速追踪到最大功率点, 响应速度明显提升;

2) 本文提出的自适应步长电导增量法在系统动态跟踪速度和稳态精度之间取得了很好的平衡, 系统响应速度提高的同时, 稳态误差低于 0.3%, 系统稳定性更优;

3) 本文采用的双曲正切型步长变化规律, 能够使步长快速、自适应变化, 从而使系统输出可以快速跟踪最大功率点。算法原理简单, 硬件消耗小, 非常适宜在 DSP、FPGA 等硬件上实现, 可以较快的应用于实践之中。

[参 考 文 献]

- [1] 杨亚林, 朱德兰, 李丹, 等. 积灰和光照强度对光伏组件输出功率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 203-211.
Yang Yalin, Zhu Delan, Li Dan, et al. Influence of dust accumulation and light intensity on output power of photovoltaic modules[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 203-211. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘天扬. 兆瓦级光伏电站并网电压控制技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
Liu Tianyang. Research on the Voltage Control in Grid-connect Megawatt-class Photovoltaic Power Station[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李欣然, 王立舒, 李闯, 等. 光伏温差界面热耦合特性及混合发电效率[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 233-240.
Li Xinran, Wang Lishu, Li Chuang, et al. Thermal coupling characteristics of photovoltaic-thermoelectric interface and efficiency of hybrid power generation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 233-240. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汤允凤. 太阳能光伏光热综合利用系统研究及优化控制[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
Tang Yunfeng. Research and Optimal Control of Solar Photovoltaic/thermal Comprehensive[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘畅, 陈启卷, 陈桂月, 等. 光伏-燃料电池混合发电系统建模与仿真[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3113-3119.
Liu Chang, Chen Qijuan, Chen Guiyue, et al. Modeling and simulation of PV-fuel cell hybrid power system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3113-3119. (in Chinese with English abstract)
- [6] 朱丽, 陈萨如拉, 杨洋, 等. 太阳能光伏电池冷却散热技术研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(1): 10-19.
Zhu Li, Chen Sarula, Yang Yang, et al. Research progress on heat dissipation technology of photovoltaic cells[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(1): 10-19. (in Chinese with English abstract)
- [7] Vorobiev Y, Gonzalez H J, Vorobiev P, et al. Thermal-photovoltaic solar energy conversion[J]. Solar Energy, 2006, 80: 170-176.
- [8] Jana J, Samanta H, Das Bhattacharya K, et al. Design and development of high efficiency five stage battery charge controller with improved MPPT performance for solar PV systems[J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2018, 8(2): 941-953.
- [9] 徐凯, 王湘萍. 光伏发电最大功率点跟踪的智能集成控制[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 536-543.
Xu Kai, Wang Xiangping. Intelligent integrated control for maximum powerpoint tracking of PV generation system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(2): 536-543. (in Chinese with English abstract)
- [10] 徐建国, 沈建新, 王海新. 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 with English abstract)
- [11] 卢超. 一种改进型电导增量法 MPPT 控制策略仿真研究[J]. 信息技术, 2019(3): 111-115.
Lu Chao. Simulation study of MPPT control strategy based on an improved conductance increment method[J]. Information Technology, 2019(3): 111-115. (in Chinese with English abstract)
- [12] Mirza A F, Ling Q, Javed M Y, et al. Novel MPPT techniques for photovoltaic systems under uniform irradiance and Partial shading[J]. Solar Energy, 2019, 184: 628-648.
- [13] Zhao Y, Li H, Liu L Q, et al. The MPPT control method by using BP Neural Networks in PV generating system[C]. 2011 2nd International Conference on Network Engineering and Computer Science. 2011, 9: 482-487.
- [14] 徐珊珊, 金玉华, 张庆兵. 带全局判据的改进量子粒子群优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(9): 1891-1896.

- 2131-2137.
- Xu Shangshang, Jin Yuhua, Zhang Qingbing. Improved quantum-particle swarm optimization with global criterion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(9): 2131-2137. (in Chinese with English abstract)
- [15] 翟小军, 杜衡, 刘建义, 等. 粒子群算法与电导增量法的双级最大功率点跟踪控制[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 190-195.
- Zhai Xiaojun, Du Xun, Liu Jianyi, et al. Two-stage maximum power point tracking control based on particle swarm optimization and conductance increment method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 190-195. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘家赢, 韩肖清, 张鹏. 一种改进的变步长电导增量法在光伏 MPPT 中的应用[J]. 电气应用, 2014, 7: 23-27.
- Liu Jiaying, Han Xiaqing, Zhang Peng. Application of an improved variable step size conductance increment method in photovoltaic MPPT[J]. Electrical Applications, 2014, 7: 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周建萍, 朱建萍. 自适应变步长电导增量法的最大功率点跟踪控制[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(3): 235-239.
- Zhou Jianping, Zhu Jianping. Maximum power point tracking control of adaptive variable step size conductance increment method[J]. Journal of Shanghai Electric Power Institute, 2014, 30(3): 235-239. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1491-1498.
- Zhou Dongbao, Chen Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on improved variable step size conductance increment method[J]. Grid Technology, 2015, 39(6): 1491-1498. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王立舒, 冯广焕, 张旭, 等. 聚光太阳能光伏/温差复合发电系统设计与性能测试[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 230-238.
- Wang Lishu, Feng Guanghuan, Zhang Xu, et al. Design and performance test of concentrating solar photovoltaic / thermoelectric hybrid power generation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 230-238. (in Chinese with English abstract)
- [20] 梁秋艳. 聚光太阳能温差发电关键技术及热电性能机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- Liang Qiuyan. Research of Concentration Solar Thermoelectric Generation Key Technology and Thermoelectric Performance Mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [21] 别玉, 李明, 陈飞, 等. 基于槽式聚光集热的腔体吸收器热损失特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 423-430.
- Bie Yu, Li Ming, Chen Fei, et al. Heat loss properties of cavity absorber in solar collecting system with parabolic trough concentrator[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(2): 423-430. (in Chinese with English abstract)
- [22] 聂健. 太阳能光伏定向跟踪装置的设计与开发[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- Nie Jian. Design and Development of Solar Photovoltaic Directional Tracking Device[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张政. 太阳能光伏光热一体化热泵/热管系统性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- Zhang Zheng. Performance Research of a Solar Photovoltaic/Thermal Integrated Heat Pump/Heat Pipe system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [24] Huynh D C, Dunnigan M W. Development and comparison of an improved incremental conductance algorithm for tracking the MPP of a solar PV panel[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1421-1429.
- [25] 梁亮, 詹智民, 邓小磊, 等. 基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真[J]. 郑州大学学报, 2018, 39(6): 88-92.
- Liang Liang, Zhan Zhiming, Deng Xiaolei, et al. PV array mppt simulation based on the conductance increment method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(6): 88-92. (in Chinese with English abstract)
- [26] Mousa H, Youssef A, Mohamed E M. Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based windgeneration system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2019, 108: 218-231.
- [27] Ahmed J, Salam Z. An improved perturb and observe(P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency[J]. Applied Energy, 2015, 150: 97-108.
- [28] Hamidreza N, Keith A W. Modeling and analysis of a combined photovoltaic-thermoelectric power generation system[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2013, 135(031013): 1-8.
- [29] 王立舒, 王慧杰, 赵嘉玮, 等. 基于电导-模糊双模式的 MPPT 优化控制[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1847-1853.
- Wang Lishu, Wang Huijie, Zhao Jiawei, et al. Inc-fuzzy dual mode for optimal control of photovoltaic maximum power point[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1847-1853 (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘伟, 张健, 金宏达, 等. 哈尔滨地区辐照度推算及 NASA 数据适用性分析[J]. 黑龙江电力, 2019, 41(2): 179-183.
- Liu Wei, Zhang Jian, Jin Hongda, et al. Estimation of irradiance and applicability analysis of NASA data in Harbin[J]. Heilongjiang Electric Power, 2019, 41(2): 179-183. (in Chinese with English abstract)

Self-adaptive photovoltaic/temperature difference MPPT control strategy based on hyperbolic tangent function

Wang Lishu¹, Bai Long^{1,2}, Fang Junlong^{1*}, Li Xinran¹, Li Chuang¹, Dong Yuqing¹

(1. Institute of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, China)

Abstract: An effective supply mode, solar power is gradually gaining much attention for the environmental friendliness and convenience. Among them, a photovoltaic/thermal co-generation technology is usually utilized to improve the power generation efficiency of photovoltaic cells, as the operating temperature rises. As such, the redundant heat generated by the photovoltaic cells was reused as the heat source for the temperature difference of the power generation system to realize secondary power generation. Moreover, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) control is also required to achieve the optimal potential of the co-generation system. In this study, a new MPPT control of photovoltaic/temperature difference was proposed further to combine the constant voltage and hyperbolic tangent type adaptive variable step size, in response to the oscillation and misjudgment caused by the fixed step size of traditional conductance increment. Two advantages were included here: First, the control was the fast tracking to the area near the nonlinear region of the maximum power point using 0.78 times of the system open-circuit voltage, suitable for the great changing environmental conditions. Second, the step size was adjusted adaptively and quickly, according to the change of external environmental conditions, when the MPPT was tracking to the nonlinear region near the maximum power points. For instance, the light intensity was used to reduce the system oscillation, indicating the monotonic increase and fast variation in the hyperbolic tangent function. Furthermore, a simulation model was established to evaluate the performance of adaptive variable step conductance increment in the MPPT control of a combined photovoltaic/thermal power generation system using the Matlab/Simulink software. Specifically, Jinao JAMG-6-60-250/SI photovoltaic module was set as the photovoltaic cell model, and Xinghe F40550 was the thermoelectric chip model. Simulation results show that the step changes were consistent under the drastic variation in the light intensity, while the response speed was obviously improved with the rapid adjustment for tracking the maximum power point. At the same time, the step size was kept at 0, after the output power of the system was stabilized. There were only small fluctuations and errors in the steady-state output power, indicating that the MPPT control performed well. Correspondingly, an MPPT hardware experiment was conducted to further verify the feasibility at Northeast Agricultural University in Harbin in October 2020. Two periods A (8:00-9:00) and B (12:00-13:00) were selected, when the illumination and temperature were gradually enhanced to remain unchanged. The hardware experimental results show that the system was quickly tracked and stabilized at the maximum power point within 15ms, where the steady-state error was less than 0.3%, indicating more robust to external environmental disturbances and higher energy utilization. Consequently, an excellent balance was achieved in the system response speed and steady-state accuracy. The finding can provide a promising potential to the implementation of hardware, such as digital signal processors in practice.

Keywords: photovoltaic; temperature difference; adaptive; hyperbolic tangent function; MPPT