

采用自适应扰动观察法的光伏并网系统 最大功率点跟踪

谢 维¹, 饶国勇², 蔡建美¹, 李立新¹, 陈 迅¹

(1. 防灾科技学院 电子科学与控制工程学院, 河北 三河 065201; 2. 景德镇学院, 江西 景德镇 333000)

摘要: 提出了一种自适应扰动观察 (P&O) 算法, 用于在不同天气条件下太阳能光伏 (PV) 并网系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 控制策略; 该策略对于从太阳能光伏电池板中, 获取最大的功率输出是十分重要的; 利用一种依赖于功率变化的可变的扰动步长, 提出了改进的自适应扰动观察算法; 最后将通过仿真所得到的数据与传统的扰动观察算法进行了比较, 结果表明所提出 MPPT 算法的收敛值和速度得到了改善, 稳定时间缩短 25%, 稳态值提高 20% 以上, 在太阳能光伏并网系统的最大功率点跟踪时是有效而实用的。

关键词: 最大功率点跟踪; 扰动观察算法; 太阳能光伏并网系统

Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Perturbation and Observation Algorithm for Grid-connected Photovoltaic System

Xie Wei¹, Rao Guoyong², Cai Jianxian¹, Li Lixin¹, Chen Xun¹

(1. School of Electronic Science and Control Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;
2. Jingdezhen University, Jingdezhen 333000, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive perturbation and observation (P&O) algorithm for maximum power point tracking (MPPT) control strategy of a grid-connected solar photovoltaic (PV) system under varying atmospheric conditions. This strategy is important in order to extract maximum power output from a solar PV panel. The adaptive P&O algorithm is proposed to utilize a variable perturbation step size which depends on power changes. The obtained simulation results are compared with those using the conventional P&O algorithm, which show the convergence value and speed of the proposed MPPT algorithm are improved. The steady time is shortened by 25%, and the steady-state value is increased by more than 20%. So the proposed algorithm is effective and practical in the MPPT of a grid-connected solar PV system.

Keywords: maximum power point tracking; perturbation and observation algorithm; grid-connected solar photovoltaic system

0 引言

全球的电力需求和消费正在快速增长。可再生能源由于其清洁性、低成本和获取方便等优点, 近年来得到了迅猛的发展。在太阳能、风能、海洋潮汐能等可再生能源中, 太阳能是一种目前最成熟和有商业前景的发电能源。可以使用光伏 (PV) 效应从太阳光以产生电力^[1], 这种技术广泛用于为独立负载或电力系统供电。然而, 可以看到太阳能光伏电池的转换效率非常低, 仅为 9% 到 17%, 尤其是在低太阳照射条件下。另外, 太阳能 PV 板产生的电力总是在各种天气条件下变化。很显然, 太阳能光伏电池的 V-I 和 V-P 特性是非线性的, 随照射量和温度而变化^[2]。然而, V-I 或 V-P 曲线上始终存在一个称为最大功率点 (MPP) 的独特点。这一点在这些特性上是未知的, 但它可以通过 MPPT 算法定位, 一般分类如下: 扰动观察 (P&O) 法^[3-5], 增量电导 (InC) 法^[6-8], 恒定恒流 (CC) 或恒定电

压 (CV) 法^[9-10]等算法以及其他一些诸如模糊逻辑 (FL) 法^[11-12], 人工神经网络 (ANN) 法^[13]和粒子群优化 (PSO) 法^[14-15]等算法。这些现有算法在简单性、收敛速度、额外的硬件和成本等方面各有优缺点。本文提出了一种适用于太阳能光伏并网系统 MPPT 的自适应扰动观察算法。与采用扰动观察算法的结果相比, 所获得的仿真结果证实了所提算法的有效性和优越性。本文的各部分安排如下: 太阳能光伏电池的数学模型、太阳能光伏并网系统放在第 1 节、第 2 节中描述; 第 3 节介绍了 MPPT 策略的自适应扰动观察算法; 然后根据仿真结果在第 4 节中证实所提算法的有效性; 最后通过与现有的扰动观察相关算法的比较, 总结了新方案的优点。

1 太阳能光伏电池的数学模型

太阳能光伏电池板可以用如下的方程组来描述:

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

$$PI = V \times I = VI_{sc} - VI_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (3)$$

式中, I 为太阳能光伏电池的电流 (A); V 为太阳能光伏电

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2018-12-17。

作者简介: 谢 维 (1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能控制、信息处理、新能源发电方向的研究。

池的电压 (V); P 为太阳能光伏电池的功率 (W); I_{sc} 为太阳能光伏电池的短路电流 (A); V_{oc} 为太阳能光伏电池的开路电压 (V); I_0 为二极管反向饱和电流 (A); q 为元电荷电量, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ (C); k 为波尔兹曼常量, $k = 1.381 \times 10^{-23}$ (J/K); T 为太阳能光伏电池板的温度 (K)。

太阳能光伏电池板对阴影非常敏感。因此, 我们提出了一种更准确的太阳能光伏电池的等效电路, 以考虑阴影的影响, 以及由于模块内部的串联电阻, 触点以及单元与模块之间的互连所引起的损耗。那么, 太阳能光伏电池板的 $V-I$ 特性可以改写如下:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_p} \right) \quad (4)$$

式中, R_s 和 R_p 分别为: 考虑了阴影与损耗影响后的电阻值。

尽管, 制造商们正试图最小化这两种电阻值的影响, 以改善他们的产品性能, 然而那种理想的情况是不可能实现的。

不得不指出的 $V-I$ 特性的两个重点是, 开路电压 V_{oc} , 以及短路电流 I_{sc} 。在这两点时所发出的功率均为零点。当电池的输出电流 I 为零 ($I = 0$) 时, V_{oc} 就被确定下来了; 而当电池的输出电压 V 为零 ($V = 0$) 时, I_{sc} 就被确定下来了。在电池的 $V-I$ 特性上的乘积 ($V \times I$) 为最大的点处, 太阳能光伏电池发出的功率最大。这一点被称为最大功率点 (MPP), 并且它是独一无二的。

显然, 在太阳能光伏电池板的发电中必须考虑的两个重要因素是照射量和温度。这些因素强烈影响太阳能光伏电池板的特性。因此, MPP 点在白天会发生变化。如果工作点不接近 MPP, 则会发生显著的功率损耗。那么, 必须在各种条件下跟踪 MPP 点, 以确保从太阳能光伏电池板处获得最大的可用功率。通过在各种条件下搜索和确定 MPP 点, 将这一问题交给了最大功率点跟踪 (MPPT) 算法。本文提出了自适应扰动观察算法, 来用于搜索 MPP 点, 下面将详细介绍。

2 太阳能光伏并网系统

太阳能光伏系统可分为两种类型: 需要电池来存储能量的独立太阳能光伏系统, 以及用于大功率应用场合的太阳能光伏并网系统。太阳能光伏并网系统主要由以下部件组成, 包括太阳能光伏电池阵列, DC / DC 变流器, DC / AC 逆变器, 滤波器, 变压器和储能系统等, 如图 1 所示。

DC / DC 变流器主要用于将来自电压波动的电源, 调节输出电压为恒定值, 以减小输出电压中的纹波; 也可以从同一的输入电压等级, 获得多个电压等级。DC / DC 变流器有包括 buck (降压), boost (升压) 和 buck-boost (升降压) 的多种拓扑结构。另外, DC / AC 逆变器主要用于将恒定的直流电压, 转换成具有可变的幅值和频率的三相交流电压, 其是通过利用脉冲宽度调制 (PWM) 技术控制半导体开关器件来实现。锁相环 (PLL) 则通过求解电网电压的 abc 分量, 在公共耦合点提供旋转频率, 直接和正交电压分量。

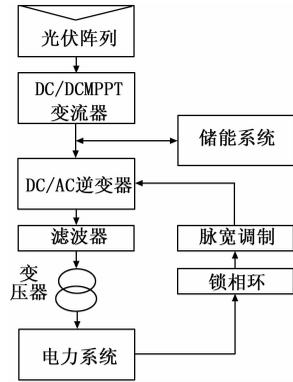


图 1 太阳能光伏并网系统结构图

3 采用先进的扰动观察算法的光伏并网系统 MPPT

扰动观察算法的基本原理是每隔一定的时间, 增加或者减少太阳能光伏电池阵列的输出电压, 这一过程称为“扰动”, 并观测之后其输出功率变化方向, 若 $\Delta P > 0$, 说明参考电压调整的方向正确, 可以继续按原来的方向“扰动”; 若 $\Delta P < 0$, 说明参考电压调整的方向错误, 则需改变“扰动”的方向。我们知道, 扰动观察算法通常采用固定的步长, 导致在快速变化的天气条件下, 跟踪 MPP 点发生失败。可以通过在不同的天气条件下, 采用可变步长来克服这个缺陷。因而本文提出了自适应的扰动观察算法。

假设在这种传统扰动观察算法中的扰动变量, 是太阳能光伏电池板端电压的参考值。因此, 如果输出太阳能光伏电池板的电压被扰动, 且 $dP/dV > 0$, 那么就可以知道工作点位于最大功率点 MPP 的左侧。扰动观察算法因而会增加太阳能光伏电池板的参考电压, 以便将工作点移向 MPP 点。又或者, 如果太阳能光伏电池板的输出电压受到扰动, 且 $dP/dV < 0$, 那么就可以知道, 工作点位于 MPP 点的右侧。扰动观察算法即会降低太阳能光伏电池板的参考电压, 便将工作点移向 MPP 点。该过程在图 2 和表 1 中更清楚地描述出来。

表 1 传统的扰动观察算法总结

扰动	功率变化	下一个扰动
正	正	正
正	负	负
负	正	负
负	负	正

我们可以周期性地重复该过程, 直到达到 MPP 点。不过, 我们知道传统的扰动观察算法在不同天气之间快速变化的情况下, 容易发生失败, 导致如图 3 所示的误判发生。假设它是从一个工作点 A 开始的。如果天气条件近似恒定, 那么一个太阳能光伏电池板电压 V 的扰动 ΔV , 将把工作点移动到 B 点, 并且扰动将被反转, 由于功率下降了。但是, 如果太阳光照射量增加了, 并且在一个采样周期内, 功率

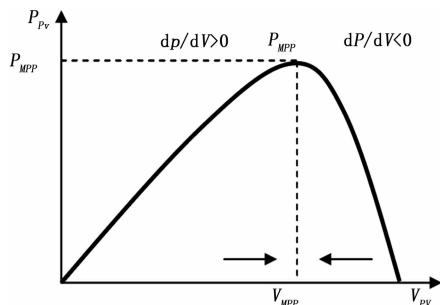


图 2 传统的扰动观察算法的工作原理图

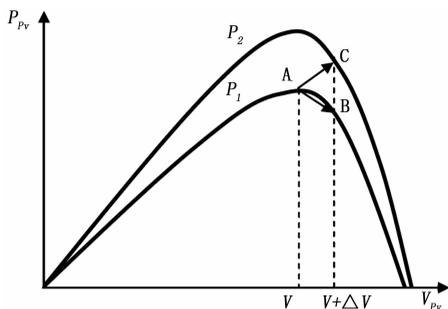


图 3 传统的扰动观察算法引起最大功率点误判的原理图

曲线从 P_1 曲线转移到了 P_2 曲线, 工作点则将从 A 点移动到 C 点, 这代表功率增加, 因而扰动的方向将保持不变。

结果是, 工作点将偏离最大功率点 MPP, 并且如果太阳照射量稳定增加, 将一直持续偏离下去^[16]。为了确保在太阳照射量的突然变化的情况下, 能跟踪到 MPP 点, 提出了一种自适应扰动观察算法, 即取决于功率变化的可变的扰动步长。这意味着扰动步长变化, 并且连续调节, 以适应变化的天气条件。这种自适应扰动观察算法, 是传统的扰动观察算法的一种变体, 可以减少通常与扰动观察相关的主要缺陷, 诸如收敛速度和跟踪效率等。该扰动步长变量取决于功率的改变, 如下式所示:

$$\Delta V_i = \Delta V_0 \times \frac{dP_i}{dV_i} \quad (5)$$

4 仿真结果与分析

采用 Matlab / Simulink 软件, 可以获得将太阳能光伏系统连接到电力系统时, 其 MPPT 控制策略的仿真结果。太阳能光伏系统配置为由 10 块串联再 2 串并联的共 20 块电池板排列构成。太阳能光伏系统的规格和参数如表 2 所示, 电网电压和频率分别为 220 V 和 50 Hz。

表 2 太阳能光伏并网系统的规格参数

规格参数	光伏电池板	光伏并网系统(10×2)
最大功率 P_{max} (W)	50	1000
P_{max} 时的电压 V_{MPP} (V)	17.4	174
P_{max} 时的电流 I_{MPP} (A)	2.875	5.75
开路电压 V_{oc} (V)	21.42	214.2
短路电流 I_{sc} (A)	3.11	6.22

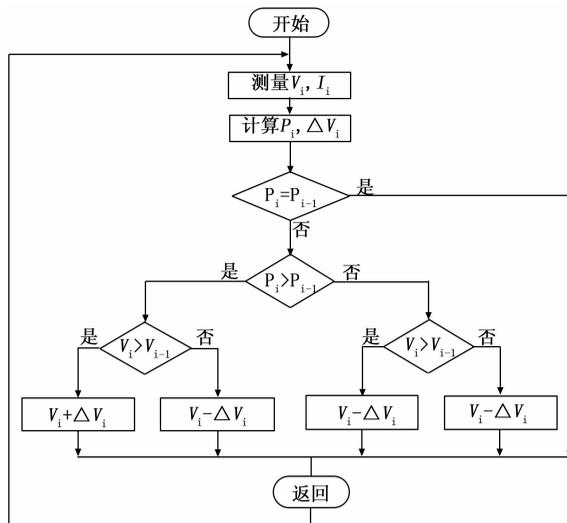


图 4 自适应扰动观察算法流程图

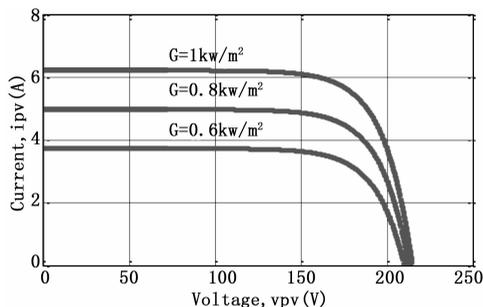


图 5 不同太阳照射量时太阳能光伏系统的 V-I 特性, 温度 $t=25\text{ }^\circ\text{C}$

图 5 和图 6 分别是太阳能光伏系统, 在不同的太阳照射量时的 V-I 和 V-P 特性, $G=1, 0.8$ 和 0.6 kW/m^2 , 在该温度 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 下。图 5 表明太阳能光伏电池板的电流, 在太阳照射量增加时增加。图 6 表明了在不同的太阳照射量时的 MPP 点也不同。MPP 点是 $P_{MPP1}=1000\text{ W}$, $G_1=1\text{ kW/m}^2$; $P_{MPP2}=789\text{ W}$, $G_2=0.8\text{ kW/m}^2$ 和 $P_{MPP3}=581\text{ W}$, $G_3=0.6\text{ kW/m}^2$ 。因此提出了自适应扰动观察算法, 来确定这些在不同的太阳照射量时的 MPP 点。

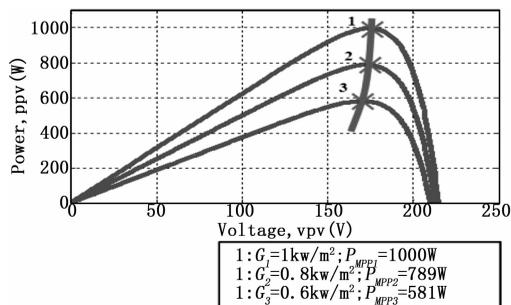


图 6 不同太阳照射量时太阳能光伏系统的 V-P 特性, 温度 $t=25\text{ }^\circ\text{C}$

图 7 和图 8 分别是太阳能光伏并网系统, 在太阳照射量 $G=1\text{ kW/m}^2$, 温度 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 下, 采用传统的扰动观察算法, 太

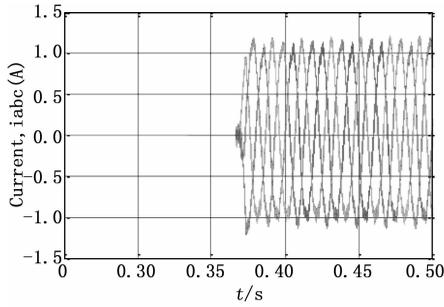


图 7 采用传统的扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的电流

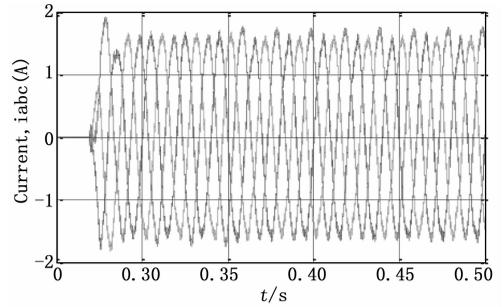


图 10 采用自适应扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的电流

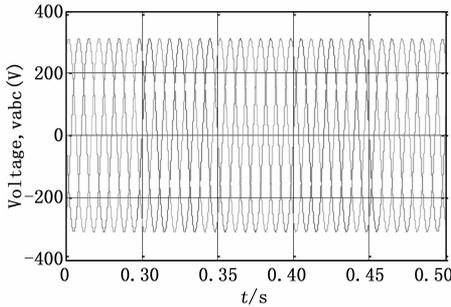


图 8 采用传统的扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的电压

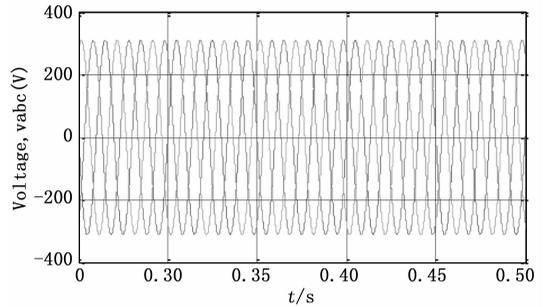


图 11 采用自适应扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的电压

太阳能光伏并网系统的电流和电压波形。太阳能光伏并网系统的电流在 $t=0.365 \text{ s}$ 达到稳定状态, 如图 7 所示。然而, 我们也发现太阳能光伏系统无法跟踪到 MPP 点, 即 $P_{\text{MPP}}=1000 \text{ W}$, 如图 9 所示, 这意味着传统的扰动观察算法不收敛。

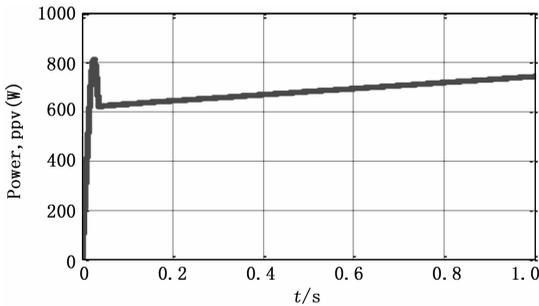


图 9 采用传统的扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统的在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的功率

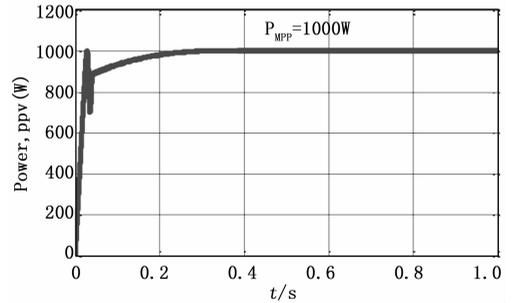


图 12 采用自适应扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统的在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的功率

图 10 和 11 分别是太阳能光伏并网系统, 在太阳照射量 $G=1 \text{ kW/m}^2$, 温度 $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 采用自适应扰动观察算法, 太阳能光伏并网系统的电流和电压波形。太阳能光伏并网系统的电流在 $t=0.273 \text{ s}$ 达到稳定状态, 如图 10 所示。然而, 我们也发现太阳能光伏系统跟踪到了 MPP 点, 即 $P_{\text{MPP}}=1000 \text{ W}$, 如图 12 所示, 这意味着采用自适应扰动观察算法, 收敛值和速度都得到了改善。

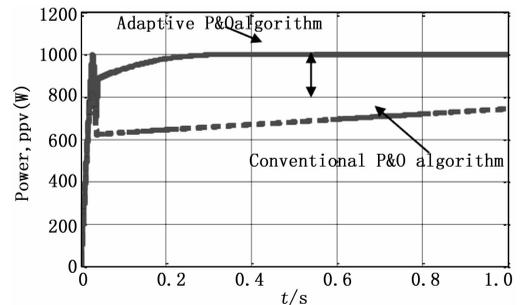


图 13 自适应与传统扰动观察算法获得的功率对比, 太阳能光伏并网系统的在照射量 $g=1 \text{ kW/m}^2$ 温度 $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$

通过自适应扰动观察算法与传统的扰动观察算法获得的功率对比, 在太阳照射量 $G=1 \text{ kW/m}^2$, 温度 $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 如图 13 所示, 该对比确认了所提出的扰动观察算法的有效性。

从以上的一组波形对比中可以分析出, 传统扰动观察算法

当温度不变, 仅太阳照射量从 0 kW/m^2 升为 1 kW/m^2 时, 不能够快速地移动至最大功率点附近, 而且输出的电压、功率波形振荡现象较严重。而新型的自适应扰动观察算法相比于传统的算法, 能够更快速地移动到最大功率点, 接近稳态时工作点

会在最大功率点附近微小幅振荡,因而动态响应效果良好,稳态输出时电压、功率波形也比较平稳。

我们知道,相比于太阳照射量的影响,温度对太阳能光伏阵列各参数的影响并不大。因此,如果当光伏组件工作环境的温度突然变化时,所提出的该自适应的新方法在提高功率追踪速度、降低功率扰动的基础上能够保证跟踪的准确性。

两种 MPPT 算法的仿真结果对比显示,传统的扰动观察算法无法收敛,而收敛值和速度都通过采用自适应扰动观察算法得到了改善,稳定时间缩短 25%,稳态值提高 20%以上。

5 结论

本文利用自适应扰动观察 (P&O) 算法,提出了太阳能光伏并网系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 控制策略。该方案使用了可变的扰动步长,该步长取决于各种大气条件。将得到的仿真结果与传统的 P&O 算法进行了比较,结果证明了所提出的 MPPT 控制策略对太阳能光伏并网系统的有效性。

参考文献:

- [1] 熊远生,俞立,徐建明. 固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (6): 85-88.
 - [2] 冯涛,陈华. 固定电压法结合电导增量法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用 [J]. 电源技术应用, 2011, (6): 23-27.
 - [3] 王飞,余世杰,苏建徽,等. 太阳能光伏并网发电系统研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20 (5): 72-74, 91.
 - [4] 朱铭炼,李臣松,陈新,等. 一种应用于光伏系统 MPPT 的变步长扰动观察法 [J]. 电力电子技术, 2010, 44 (1): 20-22.
 - [5] 乔兴宏,吴必军,邓赞高,等. 模糊/PID 双模控制在光伏发电 (上接第 206 页)
- 行比较,实验结果证明了本文方法的有效性。未来希望对该算法做出进一步完善。

参考文献:

- [1] 徐晓艳. 人脸识别技术综述 [J]. 电子测试, 2015 (10): 885-894.
- [2] 苏楠,吴冰,徐伟,等. 人脸识别综合技术的发展 [J]. 信息安全研究, 2016, 2 (1): 33-39.
- [3] 王大伟,周军,梅红岩,等. 人脸表情识别综述 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (20): 149-157.
- [4] Abdulrahman M, Eleyan A. Facial expression recognition using Support Vector Machines [A]. Signal Processing and Communications Applications Conference [C]. IEEE, 2015: 276-279.
- [5] 彭明超,包姣,叶茂,等. 基于形状参数回归的人脸对齐算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2016, 29 (1): 63-71.
- [6] 万杨. 显性形状回归的人脸对齐方法实验研究 [D]. 大连理工大学, 2015.
- [7] Cao X, Wei Y, Wen F, et al. Face alignment by Explicit Shape Regression [J]. Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2012: 2887-2894.

- MPPT 中应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (10): 92-95.
- [6] Won C Y, Kim D H, Kim S C. A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller [J]. IEEE Trans. on Electron, 2004, (3): 396-403.
- [7] 侯北平,卢佩,陈锋军. MATLAB 下模糊控制器的设计与应用 [J]. 测控技术, 2001, 20 (10): 40-42.
- [8] 徐鹏威,刘飞,刘邦银,等. 几种光伏系统 MPPT 方法的比较及改进 [J]. 电力电子技术, 2007, 41 (5): 3-5.
- [9] 郭会娜,黄洪全. 扰动观察法与滞环比较法实现 MPPT 的比较分析 [J]. 电力电子技术, 2008, 44 (1): 20-22.
- [10] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [11] 谢维,段建民. 改进模糊控制的光伏发电系统最大功率点跟踪 [J]. 电源技术, 2016, 40 (5): 1042-1045.
- [12] 胡桂廷,仲程超,张伟君,等. 基于模型辨识的 BP 神经网络在光伏系统 MPPT 中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10): 213-216, 266.
- [13] Koutroulis E. Development of a microcontroller based photovoltaic maximum power point tracking control system [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001, 16 (1): 46-54.
- [14] 宋绍楼,陈龙虎,陈晓菊,等. 基于粒子群多峰值 MPPT 算法的光伏系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1354-1356.
- [15] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [16] Esram T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2007, 22 (2): 439-449.
- [8] Kazemi V, Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. IEEE Computer Society, 2014: 1867-1874.
- [9] 崔琳,朱磊,刘小龙,等. 基于 STM32F407 的以太网通信模块设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 260-263.
- [10] 王金龙,周志峰. 基于 SIFT 图像特征提取与 FLANN 匹配算法的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 175-178.
- [11] 周志强,汪渤,李立广,等. 基于双边与高斯滤波混合分解的图像融合方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38 (1): 8-13.
- [12] Huang Y, Zhang Y, Wang X, et al. Gaussian filter for nonlinear systems with correlated noises at the same epoch [J]. Automatica, 2015, 60 (C): 122-126.
- [13] 李运涛. 基于显式形状回归的人脸特征点定位算法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [14] 李凯月. 鲁棒表情关键点定位系统设计与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [15] 武春生. 基于面部特征分析的疲劳驾驶检测算法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [16] Zhu X F, Zhang T A, Wang Y X, et al. Recovery of alkali and alumina from Bayer red mud by the calcification-carbonation method [J]. 矿物冶金与材料学报, 2016, 23 (3): 257-268.