

## 利用自然法则实现光伏组件智能管理

李继川<sup>1</sup>, 王则杰<sup>2</sup>, 王洪霞<sup>3</sup>

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南省永城市供电有限责任公司, 河南 永城 476600;  
3. 河南财经政法大学统计学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为了减少光伏电站的发电量损失, 最大可能避免倒塌、热斑损坏、自然老化率过快等现象, 利用自然法则, 提出一种新颖的方法以实现光伏组件的全面智能管理。该方法采用晶体硅本身的光伏 I-V 特性, 通过自然法则原理, 获得组件的理论功率输出与实际功率输出的对比数据, 以此来判断光伏组件是否正常。试验表明, 此方法效果良好, 完全满足电站光伏组件功率输出的精度要求, 可以有效实现大中型光伏电站的组件的全面智能管理。

**关键词:** 光伏组件; 智能管理; 自然法则; 清扫工具

### Intelligent management of PV modules using law of nature

LI Ji-chuan<sup>1</sup>, WANG Ze-jie<sup>2</sup>, WANG Hong-xia<sup>3</sup>

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Yongcheng Power Supply Co., Ltd, Yongcheng 476600, China;  
3. College of Statistics, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to reduce the power loss of photovoltaic plants and to avoid utmostly the phenomena of collapse, hot spot damage and too fast natural aging rate, a new method is proposed by using the law of nature to realize a comprehensive intelligent management of PV modules. This method uses the I-V character of crystalline silicon and the law of nature to achieve the data of capacity output in theory and in reality, respectively, and then to estimate whether the PV modules are regular. Some experiments show that this method is good enough to fully meet the requirement of the accuracy of capacity output of PV modules and to effectively realize the comprehensive intelligent management of PV modules of large and medium-sized photovoltaic plants.

**Key words:** PV module; intelligent management; law of nature; cleaning tool

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0077-05

## 0 引言

随着化石燃料资源的日益枯竭、环境污染的日趋恶化, 以及人们对核电安全性的担忧, 清洁、安全、用之不竭的新能源, 特别是太阳能的开发利用越来越受到人们的青睐。人们早期直接、大规模利用太阳能的形式主要是光热转换, 随着光伏发电技术的发展, 成本的逐渐降低, 利用太阳能发电已经越来越普及<sup>[1-4]</sup>。目前, 太阳能发电主要分为屋顶和大规模的地面电站, 地面电站又以荒漠电站居多, 且绝大多数为无人值守或少人值守。空气中的灰尘落在光伏组件表面, 会导致组件接受的阳光减少; 热斑损坏不易被发现。大风、积雪导致的组件倒塌, 不容易被及时发现; 这些都导致发电量减少, 影响经济效益。采用自然法则对光伏组件进行智能清扫, 既降低设备损坏率、提高发电量, 又能及时发现组

件损坏, 及时维修, 保证设备正常运行, 增加发电量, 提高电站的经济效益。

## 1 光伏电站的现状

光伏电站, 一般都是占地面积大、光伏组件数量繁多、多数建于沙尘较多的荒漠地区, 受灰尘的影响较大。如图 1 所示, 光伏电站的清洗工作是非常必要的。图 1 引自《新疆研究院研制光伏组件清扫机器人》一文。屋顶的光伏组件也会受到灰尘影响, 大大降低发电效率。尤其是在北方, 虽然光照条件较好, 但由于长期缺乏有效降雨, 屋顶积聚的灰尘较多, 长时间得不到雨水清洗, 发电效率也大大降低。如果人工清洗, 因为是高空作业, 难度大、成本高, 若是不清洗, 又会大大降低发电效率。除此之外, 影响光伏电站发电量减少、导致运营商利益受损的因素还有很多, 比如: 组件质量的良莠不

齐、倒塌、热损坏等等（无法并网及设备损坏检修不在本文讨论范围）。目前几乎所有的光伏电站，特别是光伏组件的管理都是一种粗犷式的、粗略式的，主要是根据日、月甚至是年发电量来进行判断的，难以及时、准确、全面地了解到光伏电站的信息，更不能预防和发现光伏组件的隐患和故障<sup>[5-6]</sup>。



图 1 新疆某 20 MW 光伏电站清洗前后对比图

Fig. 1 A comparison sight of a 20 MW PV plant before and after cleaning in Xinjiang province

光伏组件的清洁工作，目前基本上都是通过清洁工人定期对光伏组件进行逐个清洗（有的光伏电站甚至任其自然），这种方法费时、费力、费水，难以做到及时性。比如，一般大型光伏电站都按固定时间为一个清洗周期，如果这期间风沙较小，则光伏组件可能灰尘污染度并不大，仍然按部就班进行清洗，势必造成浪费；反之，如果在此期间刚好沙尘天气比较严重，仍按此周期进行清洗，则严重影响发电量，同样造成损失。

## 2 自然法则智能管理光伏组件的原理

本文所述智能管理的方法中，一共使用了三个基本的自然法则：模糊原理、太阳光辐照度的单调性、概率相同原则。下面具体叙述这三个自然法则的原理及在产品中的运用。

1) 模糊原理。在很多智能控制系统中都已经得到普遍应用，它的基本思想是：自然界中，事物的正常变化都是遵循连续的、渐进的、模糊的规律，比如白天和黑夜的交替变换、动植物的生长发育、物体的加速和渐停等，反之，几乎所有的“突发”事件都是异常的、有悖常理的。具体到本产品来说，光伏组件表面灰尘的积累有一个渐进的过程，不会出现前一刻检测还是干净的，下一刻检测就出现清洁度超标的情况，也就是说，不会因为“突发”而出现由于清洁度下降导致组件输出下降到设定值以下的情况。而异常或故障发生时，往往带有突发性。利用这种不同，可以作为识别清洁度下降还是异常（故障）的一个判据。要完全避免误报，仅此一个判据还不够，同时还会用到另外两个自然法则。

2) 概率相同原则。其基本思想是：对于同一个光伏电站的所有组件来说，可以认为它们处于特性

完全相同的空间中，即，它们受到的辐照度、温度、空气污浊度是完全一样的，也就是说，灰尘落在各个光伏组件表面的概率是一样的，它们清洁度下降的程度是一致的（鸟粪、落叶等污物对于光伏电站，特别是沙漠环境来说是很小的概率事件），所以，在相同的辐照度、温度和相同规格的光伏组件下，所有组件的输出都符合相同的 I-V 特性曲线，一旦发现有某个组件输出异常，就可以作为第二个判据，判定该光伏组件可能发生了故障。

3) 太阳光辐照度的单调性法则是整个基于自然法则智能管理方法的核心和重点。其基本原理是：虽然太阳光在宇宙空间中的辐照度是一个常数（ $1\ 368\ \text{W/m}^2$ ），但在固定地点的光伏电站，对于光伏组件和辐照仪来说，辐照度不是恒定的。太阳每天自东向西运动过程中，辐照度总是单调上升，达到某个最高值后，又单调下降，这种单调性一定不会混乱，绝对不会出现忽高忽低、忽大忽小的情况。根据这个自然法则，就可以很容易地识别出云彩、物体阴影对光伏组件输出的影响。

有了上述三个重要的自然法则，就可以利用晶体硅本身的 I-V 特性曲线进行全面智能管理了。

一个正常工作中的光伏电池或由其经过串、并联成的光伏组件，其输出的 I-V 特性曲线应该如图 2 所示，不同的辐照度下的 I-V 特性曲线形状基本相似，只是电流、电压大小不同。

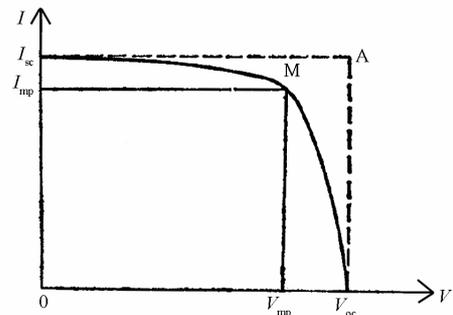


图 2 晶体硅电池的输出 I-V 曲线

Fig. 2 I-V output curve of crystalline silicon solar cell

如图 3 所示为浙江日地某型号的光伏组件在不同辐照度下的 I-V 特性曲线。

晶体硅光伏电池 I-V 特性曲线的方程为

$$I = R_{sh} / (R_{sh} + R_s) \times (I_x - V / R_{sh} - I_{bk}) \quad (1)$$

其中： $R_{sh}$ 、 $R_s$  为光伏电池内部的等效并联、串联电阻； $I_{bk}$  为暗电流； $I_x$  为流过外部的负载的电流即输出电流； $V$  为负载两端的电压。当负载  $R_L$  从 0 变化到无穷大时，输出电压  $V$  则从 0 变到  $V_{oc}$ ，同

时输出电流便从  $I_{sc}$  变到 0, 由此得到电池的输出特性曲线<sup>[7-11]</sup>。由图 2、图 3 和式(1), 可以很容易地得到不同辐照度下的电流电压值。

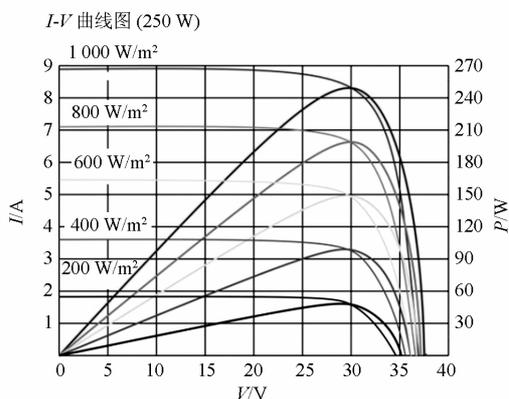


图 3 浙江日地 250 W 晶体硅光伏组件 I-V 曲线

Fig. 3 I-V curve of 250 W crystalline silicon PV module in Ridi, Zhejiang

### 3 光伏组件智能管理的实现

然而, 式(1)在具体的工程应用中比较麻烦, 甚至不好操作。所以需要寻找更简便的方法, 通过仔细观察和研究图 2、图 3 曲线, 我们会发现几个非常重要的特点, 再辅以合适的误差理论和修正工具, 可以更简单地得到几乎所有辐照度下不同 I-V 曲线的各个坐标点的电流、电压值。这几个重要特点如下:

1) 不同辐照度下的短路电流  $I_{sc}$  与辐照度成正比。

2) 不同辐照度下的开路电压相差很小, 近似于辐照度每下降  $200 \text{ W/m}^2$ , 开路电压下降  $0.5 \text{ V}$ 。

3) I-V 特性曲线在电压增长到一定值时, 电流下降突然出现“拐点”, 之后很快就达到最大功率点。拐点出现前, 电流的下降趋势相对于电压基本上为一条斜率为负的直线。拐点到开路电压  $V_{oc}$  的曲线几乎是一个开口向下的抛物线的一段。而拐点就是抛物线的顶点。

有了上述三个重要特点, 很容易获得以下两个公式:

$$I = kV + m \quad (2)$$

$$I = aV^2 + bV + c \quad (3)$$

利用适当的引入误差及具体工程应用时的修正系数, 可以使计算误差控制在理想的范围。其中:  $V$  为实时采样所得的光伏组件电压;  $I$  为根据采样时刻所得的电压、温度等参数计算出的电流;  $k$ 、 $w$ 、

$a$ 、 $b$ 、 $c$  为曲线系数, 可以根据不同采样数据代入公式求出。

利用自然法则实现光伏组件的智能管理, 主要是实现包括清洁度(积尘、积雪)检测、自然老化度计算、异常检测(损坏、倒塌等)以及全自动无水清扫作业。该方法不需要设置检测传感器, 也不同于简单粗略地以发电量做判据的方式, 而是采用晶体硅本身的光伏 I-V 特性, 通过自然法则原理, 获得组件的理论功率输出与实际功率输出的对比数据。如果两者在误差范围内, 则属正常; 如差值较大, 则依据自然法则原理, 可以得出清洁度下降的程度或者是组件发生了异常。

本系统的主要设计流程如图 4 所示。

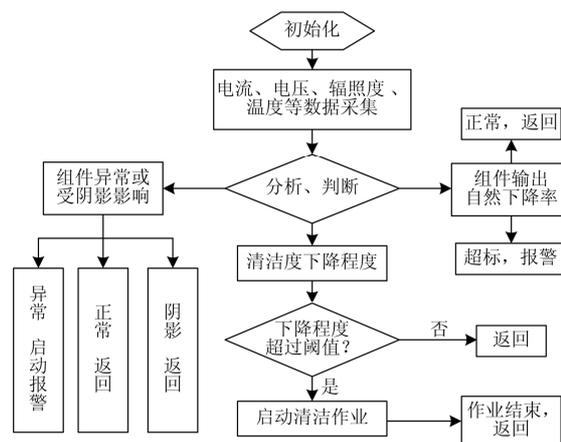


图 4 基于自然法则的光伏组件智能管理系统设计流程

Fig. 4 Design process of the intelligent management system based on the law of nature

图 4 的分析、判断部分, 使用了式(2)、式(3)对采集到的数据进行计算、处理, 得到计算电流值, 将计算得到的电流值与实时采集到的电流值进行比较。具体描述如下:

本系统硬件主要包括 DSP 处理器、霍尔传感器、运放及其调理电路、通信电路、光耦及继电器输出电路等。软件部分主要实现对各部分寄存器的初始化、参数读取、修改、保存, 以及对所采集数据的处理、分析、判断, 并根据这些结果进行告警或清洁作业等行为。

首先, 智能管理系统通过霍尔电流电压传感器、辐照度传感器以及温度传感器采集组件的电信号和环境气象信息, 经过系统的 DSP 处理器计算、处理, 得到所需的数字信息。然后, 根据计算得到的电流电压值、辐照度以及温度, 就可以得到对应的 I-V 特征曲线。最后, 将得到的曲线与该组件的曲线进

行比较,如果相符,则证明该组件工作在良好状态,否则就可以利用自然法则原理进行分析,找出原因所在,并进行相应的处理。

本系统设计为无水或少量用水的清洗方式,使用环境主要是少水、极度缺水或用水不方便的干旱、沙漠、屋顶等场所。无水清洗系统主要基于沙漠地区、少人居住的干旱地区,其沙尘特性为仅仅附着在组件表面,不含油质、不粘稠、容易脱落,采用普通刷子就比较容易清洗干净,采用特制的刷子,再辅以适当的力度、速度,可以彻底扫除组件表面的浮尘或积雪。

#### 4 实验对比

根据本文所述的自然法则及晶体硅 I-V 特性方程表达式算法研制的试验机,经过小规模试验,效果良好,完全满足电站光伏组件功率输出的精度要求。而且由于其直接采用晶体硅本身的 I-V 特性曲线,可以在保证精度要求的前提下实现对整条曲线的不同坐标点进行全面检测,避免了云彩、逆变器 MPPT 精度、转换效率等因素的干扰,可以实现全智能、全自动、全方位、全程对大中型光伏电站的组件进行清洗作业、异常检测、老化度计算等。表 1 为本终端与常规清洗方法进行的对比表。

表 1 本终端与常规清洗方法的比照

Table 1 Comparison between this method and common cleaning methods

	本终端	人工	机器人
1. 电池板清洁度检测	有此功能,检测精度 1%以内	无此功能	无此功能(或通过灰度传感器检测)
2. 电池板异常检测	有此功能,早期发现故障,避免发展成严重灾害	通过巡检能发现部分异常,但难度大,实时性差	无此功能
3. 电池板清洗作业	可以根据需要及时开始和停止清洗作业,并报告清洗效果	定时或根据人眼观察决定何时清洗,效果因人而异	定时、遥控等开启停止清扫作业
4. 成本	成本低,全智能、全自动	成本高、难度大、危险	成本高、不方便、需要人工参与

#### 5 结语

利用自然法则进行光伏组件的智能管理,可以有效实现大中型光伏电站的组件管理,极大地减轻人力劳动强度、节约资金、对光伏电站安全、经济运行具有良好的作用,是未来光伏电站经济、安全、可靠运行的基本保证。

新能源发电是全世界共同的目标,光伏发电在新能源中是有前景的发电方式。随着光伏发电技术的发展,光伏组件技术在向着智能化发展,该项目的开发正是顺应光伏发电的趋势而做出的尝试,希望该项目的开发对未来光伏发电技术的进步能做出一点贡献。

#### 参考文献

- [1] 王长贵,崔容强. 新能源发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 106-107.  
WANG Chang-gui, CUI Rong-qiang. New energy power generation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 106-107.
- [2] 李金刚, 王斌, 孟昭渊, 等. 智能光伏组件的研究与实践[J]. 能源工程, 2008(1): 40-44.  
LI Jin-gang, WANG Bin, MENG Zhao-yuan, et al. The research and practice of intelligent PV modules[J]. Energy Engineering, 2008(1): 40-44.
- [3] 陶建军. 太阳能电池组件的综合应用[J]. 能源技术, 2008, 29(5): 268-270.  
TAO Jian-jun. Integrated application of solar cell modules[J]. Energy Technology, 2008, 29(5): 268-270.
- [4] 才利存, 常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 119-138.  
CAI Li-cun, CHANG Zhong-ting. MPPT and anti-islanding of photovoltaic grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 119-138.
- [5] Zedlewsk J. Modeling hard-disk power consumption[C] // Proceedings of 11th USENIX Conference on File and Storage Technologies, San Jose, CA, 2012.
- [6] Olusegun O O, Tan C E. Intelligent power generation and management algorithm for rural tele-center application[J]. Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation, 2013, 2(3): 90-101.
- [7] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PCADD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.  
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PCA-DD simulation models for PV array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19):

- 61-64.
- [8] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.  
ZHOU Nian-cheng, YAN Li-wei, WANG Qiang-gang. Research on dynamic characteristic and integration of PV generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [9] 傅望, 周林, 郭珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-216.  
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216.
- [10] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 260-266.  
HU Guo-zhen, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Sizing and cost analysis of PV generation system based on vanadium redox battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 260-266.
- [11] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.  
CHEN Quan, LI Ling-dong, WANG Qun-jing, et al. Simulation model of PV generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.

---

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-07-25

作者简介:

李继川(1972-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为光伏发电; E-mail: jichuanl@xjgc.com

王则杰(1956-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统与电网控制、降损节能、无功补偿等;

王洪霞(1974-), 女, 博士, 研究方向为工业统计。