

# 基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统

蔡黎<sup>1</sup>, 代妮娜<sup>1,2</sup>, 朱海涛<sup>3</sup>, 谭泽富<sup>1</sup>, 邱刚<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆三峡学院信息与信号处理重点实验室, 重庆 404000;

<sup>2</sup>中国电力科学研究院新能源研究所, 北京 100192;

<sup>3</sup>葛洲坝能源重工有限公司光伏光热事业部, 北京 100102

**摘要** 光伏组件发电特性对优化光伏发电系统的发电效率具有重要意义。常见的光伏组件发电特性由理论仿真得到, 其与实际应用有一定差距。采用光照传感器、温度传感器采集环境参数, 采用电流计、电压计检测光生电流、反向截止电流、开路电压等参数, 建立了光伏组件发电特性计算模型, 实现了光伏组件的发电特性精确测试, 得到不同环境参数下输出电压-输出电流、输出功率-输出电压的发电特性曲线。仿真和工程测试证明, 基于上述特性曲线的光伏发电系统在进行最大功率控制时能够取得较好的效果, 与理论值的误差小于1%。

**关键词** 光学器件; 计算模型; 环境参数采集; 输出功率; 最大功率点跟踪

**中图分类号** TK519      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.112301

## Test System for Power Generation Characteristics of Photovoltaic Modules Based on Real-Time Parameters

Cai Li<sup>1</sup>, Dai Nina<sup>1,2</sup>, Zhu Haitao<sup>3</sup>, Tan Zefu<sup>1</sup>, Qiu Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China;

<sup>2</sup>Renewable Energy Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

<sup>3</sup>Photovoltaic Business Unit, CGGC-UN Power Co., Ltd., Beijing 100102, China

**Abstract** The power generation characteristics of photovoltaic modules are of great significance to optimize the power generation efficiency of photovoltaic power generation system. The generation characteristics of photovoltaic module are commonly obtained from theoretical simulation, which are different from the characteristics obtained from practical application. The calculation model of photovoltaic module power generation characteristics is established by using lighting sensors and temperature sensors to collect environmental parameters, galvanometer and voltmeter to detect parameters such as photo-generated current, reverse cutoff current, open circuit voltage and so on. Accurate testing of power generation characteristics of photovoltaic modules is achieved. The power generation characteristic curves of output voltage-output current and output power-output voltage under different environmental parameters are got. The simulation and engineering tests show that the photovoltaic power generation system based on the above characteristic curve can achieve better performance when controlling the maximum power, and the error between theoretical value and practical value is less than 1%.

**Key words** optical devices; computational model; environmental parameters acquisition; output power; maximum power point tracking

**OCIS codes** 230.5170; 350.6050; 230.2090

## 1 引言

因为能源清洁、能量转换过程简单、工作性能稳定可靠等优势, 光伏发电在发电领域的占比越来越重。

收稿日期: 2017-05-02; 收到修改稿日期: 2017-05-26

基金项目: 重庆市高校市级重点实验室资助项目(C16)、重庆三峡学院青年基金(16QN11)

作者简介: 蔡黎(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新能源利用技术方面的研究。E-mail: 39485885@qq.com

以中国为例,2016年新增光伏发电装机容量34.54 GW,增量世界第一,光伏发电总量超过全国总发电量的1%<sup>[1]</sup>。光伏发电的基本原理是利用含硅半导体能产生光电效应的特性,从而直接将光能转变为电能。光伏发电装置主要由光伏组件阵列、控制模块、电力电子逆变模块三大部分组成。其中,光伏组件阵列由多块太阳能电池经过串联并进行封装保护后制成,是将光能转变为电能的核心关键装置。

在实际应用中,光伏组件的发电特性受到环境因素的影响,例如光照强度大时,光伏组件输出电压较高。因为光伏组件的输出功率和发电系统的效率直接关联,所以对于光伏电站,必须实时调整光伏阵列的工作点在最大功率点附近,才能保证最优的发电效率,这种方法称为最大功率点跟踪(MPPT)。可见,对光伏组件的发电特性进行研究具有重要的意义。

目前,根据不同参数下的模拟仿真来获得光伏组件发电特性是较为常见的方法。文献[2-3]介绍了激光强度和不同温度对光伏组件发电特性的影响关系。谢波实等<sup>[4]</sup>用遗传算法处理环境参数,通过大量计算模拟得到发电特性,将发电特性曲线相对误差降低到2%以下。黎嘉明等<sup>[5]</sup>提出光伏组件功率输出符合逆高斯分布和广义极值分布的观点,并利用概率分布实现输出功率的定量分析。以上方法虽然不断改进了光伏组件发电特性的研究,但是环境参数仍停留在理论仿真层面,且算法参数不可调,因此得到的发电特性与现实结果始终存在一定的误差。

本文选用传感器采集影响光伏组件发电特性的环境参数,设计了发电特性曲线计算数学模型,以光伏组件的光生电流、反向截止电流、开路电压等参数作为模型输入参数,搭建测试系统,实现输出光伏组件发电特性曲线的目的。

## 2 工作原理

基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统工作原理如图1所示。首先采集两个重要的环境参数:环境温度 $T$ 和光照强度 $C$ ,将其输入发电特性曲线计算数学模型。同时采集光生电流 $I_{LC}$ 、开路电压 $V_{OC}$ 、反向截止电流 $I_{RC}$ 和光伏组件电阻 $R$ ,作为参数输入发电特性曲线计算数学模型,通过数学模型的计算得到输出电流、输出电压等结果,绘制输入和输出变量的二维曲线,即得到输出发电特性曲线。

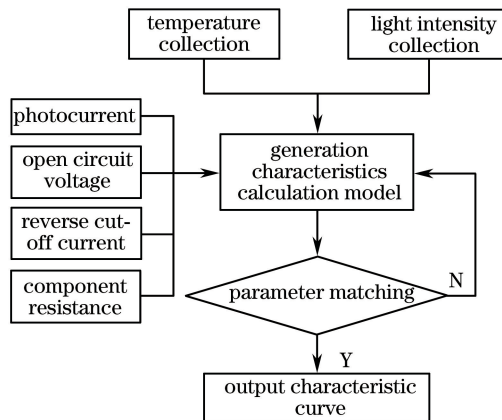


图1 系统工作流程图

Fig. 1 System work flow chart

## 3 系统设计

### 3.1 环境参数检测

太阳光照强度检测选用西门子QLS60太阳光照强度传感器,系统电路原理如图2所示。传感器用涂有高吸收率的黑色涂层作为感应元件。感应原件上引出金属接线作为热结点,机体内引出金属接线作为冷结点,两者之间的电压差与太阳光照强度成正比。而后通过温度补偿、电阻电容(RC)滤波、放大等环节接入模拟/数字(A/D)转换器,最终输出光照强度数字信号。同时,采用精密的光学冷加工磨制成石英玻璃罩,加盖在感应元件外端,防止灰尘覆膜、下雨覆水膜对其性能的影响。

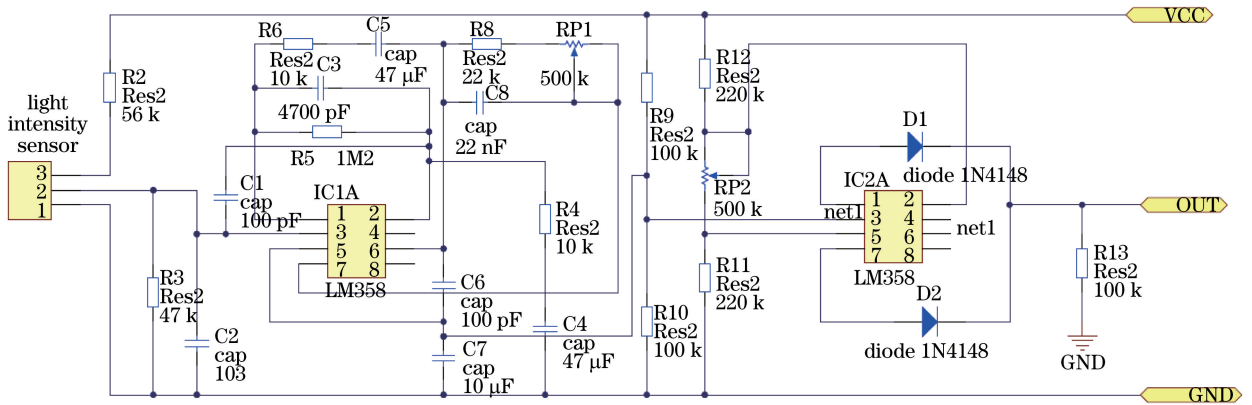


图 2 光照强度检测电路

Fig. 2 Detection circuit of light intensity

数字温度检测电路由热敏电阻、双电流源、数字逻辑和 A/D 转换器、转换部件构成,如图 3 所示。通过拨码开关的组合,将热敏电阻形成的两组比例电流流过晶体管形成电压差  $V_{BE}$ 。 $V_{BE}$  的大小和温度高低成正比,A/D 转换器选用 MAX11040, $V_{BE}$  经过差分放大、积分、比较后进入转换器转换成数字信号。MAX11040 内建一个数字/模拟(D/A)的反馈环,能够有效保证积分步骤的平均输出电压接近于比较器的参考电压。因此,图 3 所示电路能够得到精确的温度值。

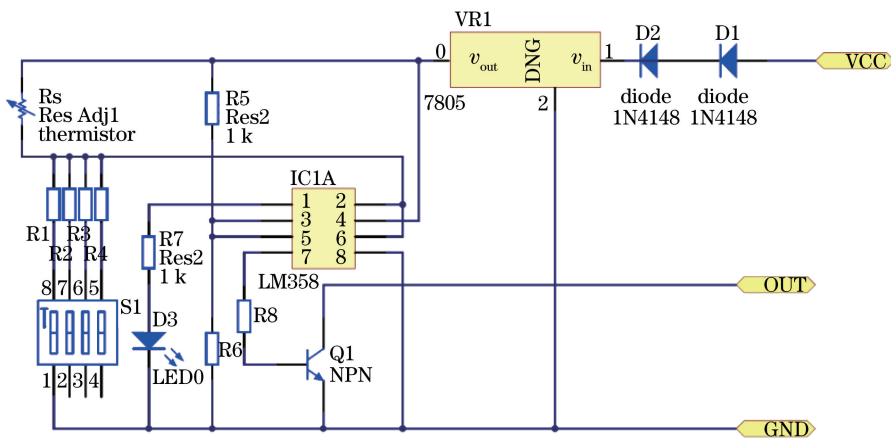


图 3 数字温度检测电路

Fig. 3 Detection circuit of digital temperature

### 3.2 其他参数检测

目前的研究通常忽略二极管电流和并联等效电阻,将光伏组件的短路电流视为光生电流,这也是造成工程误差的原因之一<sup>[6]</sup>。可以采用 CS5145A 四位半高精度数字电流表串联入系统来直接测量光生电流  $I_{LC}$ 。

在环境参数发生极端变化(如光照强度特别低)的情况下,外部设备(如蓄电池)中的电压高于光伏组件的开路电压,电压差导致外部设备的电流会“倒灌”回光伏组件,使光伏组件产生焦耳热,温度升高,在一定程度上影响转换效率。为了避免这个问题,如图 4 所示,在光伏组件太阳能电池板和输出设备之间串联一个电力电子二极管,它能够截止“倒灌”回流的电流。在中间串联接入 CS5145A 四位半高精度数字电流表,直接测量电力电子二极管中的反向截止电流  $I_{RC}$ 。

开路电压  $V_{OC}$  的测量较为简单:直接将 DF4-B 五位高精度数字电压表并联在光伏组件输出侧两端即可,接线方式如图 4 所示。

对于由多片太阳能电池构成的光伏组件矩阵,电阻  $R$  恒定不变<sup>[7]</sup>,所以不需要测量,而是直接通过计算就可以得到光伏组件的电阻  $R$ ,计算表示为:

$$R = \frac{(22 \cdot A \cdot K \cdot T)}{I_{\max} \{q \ln[(I_{LC} - I_{\max})/I_{RC} + 1] - V_{\max}\}}, \quad (1)$$

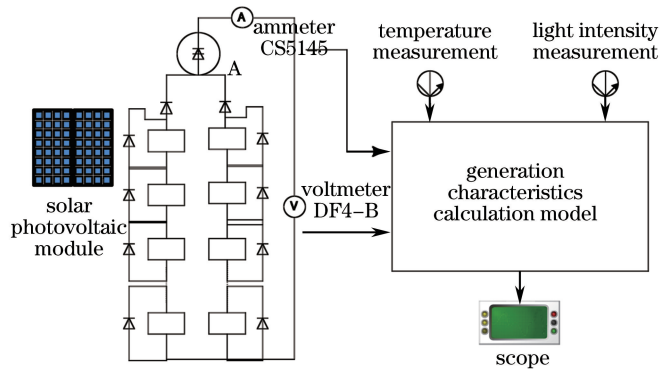


图 4 测量系统组成

Fig. 4 Composition of measurement system

式中  $V_{\max}$  是最大输出电压,  $I_{\max}$  是最大输出电流,  $q$  为电子电荷常数, 取值  $1.6 \times 10^{-19}$ ,  $A$  为 P-N 结理想因子, 取值为  $1.3^{[8]}$ ;  $K$  为玻尔兹曼常数, 取值为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  是实时温度。这些参数均可以通过查阅光伏组件的产品手册得到。

### 3.3 发电特性曲线计算数学模型

光伏组件发电原理如图 5 所示。在一个单位时间周期内, 光照强度是稳定的, 因此可将光伏发电组件等效为恒流源。  $R$  是多片太阳能电池板的串联电阻<sup>[9]</sup>, 根据基尔霍夫电流定律可得:

$$I = I_{LC} - I_{RC} \quad (2)$$

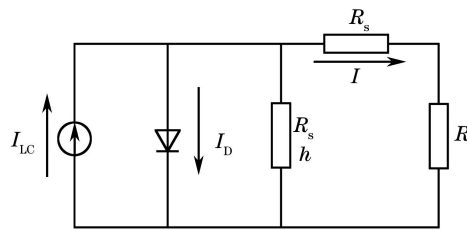


图 5 光伏组件发电原理

Fig. 5 Power generation principle of photovoltaic module

根据欧姆定律, P-N 结中的电流  $I_D$  和电压  $V_{OC}$  的关系为:

$$V_{OC} = \frac{A \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_{RC}} + 1\right), \quad (3)$$

$$V_{OC} = I_{LC} \cdot R. \quad (4)$$

由(2)~(4)式可得常规光伏组件发电特性数学模型为:

$$I = I_{LC} - I_{RC} \left\{ \exp\left[\frac{q(V_{OC} + IR)}{A \cdot K \cdot T}\right] - 1 \right\}, \quad (5)$$

式中  $q$ 、 $A$ 、 $K$  取值与 3.2 节所述相同。在实际测量中, 因为光伏组件由  $m$  块太阳能电池构成, 所以(5)式应为:

$$I = m \left\{ I_{LC} - I_{RC} \left\{ \exp\left[\frac{q(V_{OC} + IR)}{A \cdot K \cdot T}\right] - 1 \right\} \right\}. \quad (6)$$

## 4 实验结果

配置传感器系统, 搭建基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统, 接入 JS-SW 风光互补离(并)网发电实验台, 硬件如图 6 所示。编写程序所实现的上述算法如图 7 所示。

在不同环境参数情况下, 得到一系列的输出电压-输出电流、输出电压-输出功率曲线。随机选取 4 个时间节点的数据, 得到的输出特性曲线如图 8 所示。

启动 JS-SW 风光互补离(并)网发电实验台 MPPT 测试系统, 系统接线原理如图 9 所示, 其中, PWM 为脉冲宽度调制。



图 6 光伏组件发电特性测量系统

Fig. 6 Measurement system of photovoltaic module power generation characteristic

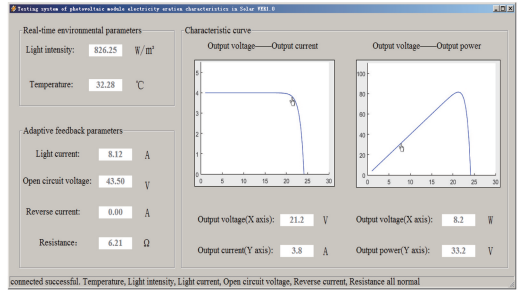


图 7 光伏组件输出特性测量系统软件

Fig. 7 Software for photovoltaic module output characteristic measurement system

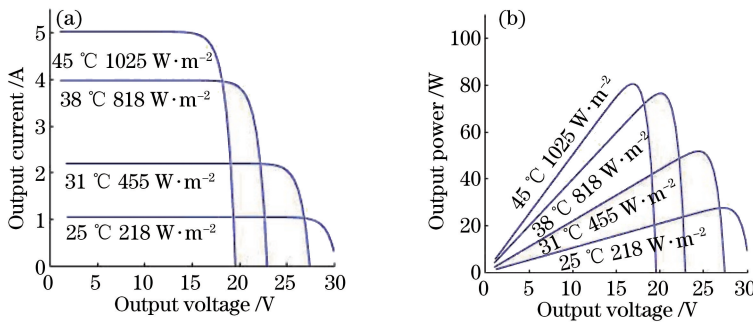


图 8 光伏组件发电特性测量曲线。(a)输出电压-输出电流;(b)输出电压-输出功率

Fig. 8 Measurement curves of photovoltaic module power generation characteristics.

(a) Output voltage-output current; (b) output voltage-output power

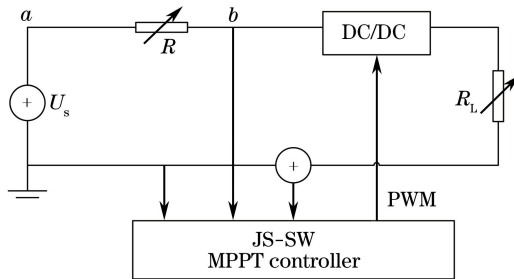


图 9 MPPT 测试系统

Fig. 9 MPPT test system

将基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统得到的输出电压、输出电流输入到 MPPT 控制器, MPPT 控制器匹配参数后将控制信号输出给 DC/DC 变换器的控制端,模拟任意光照强度、温度的改变,测量光伏组件输出电压  $U_a$  和负载电压  $U_b$ ,得到的实验数据如表 1 所示。

表 1 实验数据记录表

Table 1 Experiment data record sheet

Light intensity/( $W \cdot m^{-2}$ )	216	442	818	98	1028
Temperature / $^{\circ}C$	23.2	30.1	38.2	44.5	45.0
$U_a$ /V	68.12	73.21	76.63	78.85	81.82
$U_b$ /V	34.30	36.29	38.28	39.78	40.58

## 5 分析与讨论

从图 8(a)中可以看出,在一定范围内,输出电流与光照强度基本成正比。图 8(b)中,在一定范围内,最

大功率点和输出电流也与光照强度基本成正比。

根据最大功率传输定理:光伏组件可等效为电源  $U_s$ , 它和负载  $R_L$  连接, 如果负载阻值  $R_L$  和光伏组件内阻  $R$  相等, 且光伏组件输出电压等于光伏组件额定电压的  $1/2$ , 此时负载  $R_L$  获得最大功率。对表 1 进行计算, 可以发现基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统的 MPPT, 当负载  $R_L$  电压发生变化时, 能够调节负载电路的等效阻抗, 使之等于光伏组件内阻  $R$ , 使负载  $R_L$  获得最大功率, 从而实现最大跟踪。而且基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统的 MPPT 效果比传统方式更好, 与理论值的工程误差小于  $1\%$ , 如表 2 所示。

表 2 误差计算数据表  
Table 2 Error calculation data sheet

Light intensity $/(W \cdot m^{-2})$	216	442	818	1018	1028
Temperature $/^{\circ}C$	23.2	30.1	38.2	44.5	45.0
$U_a/V$	68.12	73.21	76.63	78.85	81.82
$U_b/V$	34.3	36.29	38.28	39.78	40.58
Theoretical value $/V$	34.06	36.605	38.315	39.425	40.91
Engineering error $/\%$	-0.70	+0.86	+0.09	-0.90	+0.91

## 6 结 论

设计并建立了一种基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统。与传统的光伏组件发电特性测试方法相比, 该系统采用传感器采集光照强度、实时温度等环境参数, 采用电流计、电压计检测光生电流、反向截止电流、开路电压等参数, 最终通过发电特性曲线计算数学模型, 得到了光伏组件的发电特性曲线, 达到预期的目标。该测试系统改变了传统仿真测试方法中采用近似或者模拟取得参数的方式, 而是采用实时测量来获得所有参数, 且通过发电特性曲线计算数学优化模型, 得到较为准确的发电特性曲线, 应用在光伏组件 MPPT 系统中, 得到较好的效果。

## 参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 2016 年我国新增光伏装机 3454 万千瓦 [EB/OL]. [2017-10-10]. <http://guangfu.bjx.com.cn/special/?id=806330>.
- [2] Liu Xiaoguang, Hua Wenshen, Liu Xun. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802011.  
刘晓光, 华文深, 刘恂. 激光辐照单晶硅光伏电池输出特性的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802011.
- [3] Chen Jiandong, Huang Shihua. Simulation of photovoltaic module characteristics in arbitrary solar radiation and temperature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 022303.  
陈建东, 黄仕华. 任意辐照强度和温度下的光伏组件输出特性模拟仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 022303.
- [4] Xie Boshi, Dai Pan, Luo Xiangdong, *et al.* IV characteristics and analysis for GaAs based single junction solar cells with different back surface fields[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0223002.  
谢波实, 代盼, 罗向东, 等. 不同背场的 GaAs 基单结太阳能电池伏安特性及分析[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0223002.
- [5] Li Jiaming, Ai Xiaomeng, Wen Jinyu, *et al.* Quantitative analysis of probability distribution for duration time characteristic of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 30-36.  
黎嘉明, 艾小猛, 文劲宇, 等. 光伏发电功率持续时间特性的概率分布定量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 30-36.
- [6] Zheng Yi, Zhao Zhigang, Gou Xiangfeng. Modeling and the analysis of output feature of solar energy photovoltaic cell based on Simulink[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(1): 97-100.  
郑意, 赵志刚, 苟向锋. 基于 Simulink 的太阳能光伏电池的建模及输出特性仿真研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(1): 97-100.

- [7] Xiao W D, Dunford W G, Capel A. A novel modeling method for photovoltaic cells[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, 3: 1950-1956.
- [8] Sudhakar B T, Prasanth R J, Sangeetha K, *et al.* Parameter extraction of two diode solar PV model using Fireworks algorithm[J]. Solar Energy, 2016, 140: 265-276.
- [9] Hao Liang, Meng Lifan, Wu Huifei, *et al.* New research of photovoltaic system method for the maximum power[J]. Electronic Test, 2009(8): 73-77.  
郝亮, 孟立凡, 吴慧飞, 等. 基于 MSP430F149 的光伏 MPPT 控制器的设计[J]. 电子测试, 2009(8): 73-77.