一种新型光伏阵列模拟器的设计研究

鲁志平　王　东

（保定天威风电科技有限公司，河北 保定　071051）

摘要　在设计离网或并网运行的光伏发电系统时，如果使用真实的光伏阵列，不仅成本高、难度大，而且也难以实现各种环境条件下系统的运行状况。本文提出了一种利用虚拟仪器和恒流源等设备组成光伏阵列模拟器的快速设计方法。首先，通过对光伏电池的物理特性的分析，提取出光伏的数学模型。在 Matlab 环境下将实际测得的光伏特性曲线与由数学模型得到的曲线相比较，仿真结果证明该数学模型能够很好的模拟实际光伏输出。该方法利用数据采集卡对负载的电压进行检测，通过计算光伏阵列的数学模型得出模拟光伏阵列的输出电流，最后通过 GPIB 总线控制恒流源，由此也实现了基于恒流源的光伏阵列模拟器。

关键词：光伏电池；虚拟仪器；光伏阵列模拟器

The New Design of the Photovoltaic Array Simulator

Lu Zhiping　Wang Dong

(Baoding Tianwei Wind Power Technology Co., Ltd, Baoding, Hebei 071051)

Abstract　It’s not only difficult and high cost, but also uneasy to simulate the photovoltaic system’s operating state in all kinds of ambient conditions when we use the real photovoltaic array to design a grid-connected photovoltaic system or an off-grid photovoltaic system. A quick method for design the photovoltaic array simulator which is used of the LabView environment and the current source is introduced in this paper. Firstly, the physical characteristic of the photovoltaic array is analyzed, and then its mathematical model was figured out. Comparing the characteristics curve measured from the real photovoltaic array and the curve calculated from the mathematical model in the MATLAB environment, it turns out that the mathematical model can simulate the real photovoltaic array very well. In this paper, LabView is used to measure the voltage of the load, and then, the mathematic model is used to calculate the output current of the array simulator, finally, we can control the current source by GPIB. So it proves the feasibility of this photovoltaic array simulator.

Key words: photovoltaic cell; LabView ; photovoltaic array simulator

随着能源危机和环境污染的日益严重，光伏发电作为新能源利用的主要方式，其研究和应用正迎来一个高潮。但光伏发电系统在设计安装和测试时，如果使用真实光伏阵列进行现场测试，不仅成本高、难度大，且难以实现各种环境条件下系统的运行状况。而光伏阵列模拟器可以模拟出各种环境条件下光伏阵列的输出特性，从而为发电系统的测试带来极大方便[1]。

现有的光伏阵列模拟器主要分为模拟式和数字式两种。文献[2]提出了一种模拟式的光伏阵列模拟器，主要由可控光源、温控设备、样品光伏电池和电流放大装置构成，通过调节光源的光照强度和工作温度，模拟自然条件下光伏电池的工作环境。用户通过检测经过放大的光生电流来模拟真实光伏阵列的输出特性。这种模拟器的主要缺点是：人造光源难以在光的频谱构成和光照强度方面模拟太阳光，而且放大电流误差较大，硬件设计复杂。文献[3-4]提出了数字式光伏阵列模拟器的设计方法，主要是使用单片机或 DSP 作为控制部分，将光伏阵列在各种环境条件下的输出曲线存储在内部，使用高频开关电源模拟光伏阵列的功率输出特性。这些模拟器的缺点在于所存储的特性曲线是经过拟合和近似的，模拟功率范围越大，开关电源设计越复杂，开发周期越长。本文提出了另外一种数字式光伏阵

列模拟器的设计方法，利用实验室现有的计算机和恒流源等设备以及虚拟仪器技术设计光伏阵列模拟器的快速方法，具有开发时间短，操作方便，精度高的特点。

1　光伏电池特性

太阳能电池单体是一种能够将太阳光中的辐射能量转换为电能的半导体装置。其理想等效电路如图 1 所示。

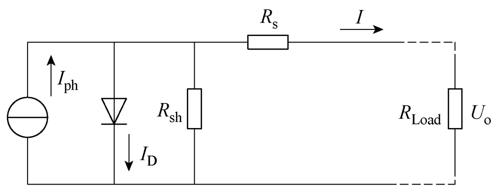


图 1　光伏电池理想等效电路

图 1 中，I_{ph} 是光生电流；I_{D} 是暗电流，表示光伏电池的 P-N 结自身在外电压的作用下流过的扩散电流；R_{sh} 为等效并联电阻，形成的原因主要是漏电流所对应的 P-N 结漏泄电阻；R_{s} 为等效串联电阻，主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻和电极与硅表面接触电阻形成。光伏电池输出特性方程为

$$I = I_{\mathrm{ph}} - I_{\mathrm{o}}\left\{\exp\left[\frac{q\left(V + IR_{\mathrm{s}}\right)}{AKT}\right] - 1\right\} - \frac{V + IR_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}} \qquad (1)$$

式中，I_{P} 为流过等效并联电阻的电流；I_{o} 为 P-N 结反向饱和电流；A 为 P-N 结曲线参数；T 为绝对温度，K 为玻尔兹曼常数。

光伏阵列是由数个光伏电池元件组成，既非恒压源，也非恒流源，也不能提供任意大小的功率，是一种非线性的直流源，与传统的直流电源有很大区别。其电源特性在工作范围变化很大，随着工作状态变化，光伏阵列的功率-端电压（电流）曲线存在一个最大功率点，如图 2 所示。

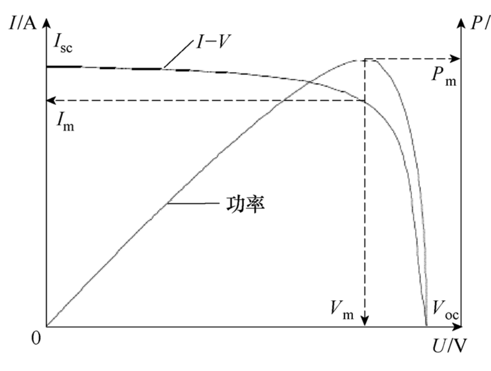


图 2　光伏阵列 *I-V*、*P-V* 特性曲线

2　光伏电池的数学模型

理想等效电路的输出特性方程（1）可以很好的表达光伏阵列的输出特性，但是由于式（1）中参数 $I_{\mathrm{ph}}, I_{\mathrm{o}}, R_{\mathrm{s}}, R_{\mathrm{sh}}$，$A$ 不仅与太阳辐射强度和电池温度有关，而且确定这些参数也十分困难，因厂家提供的技术参数并不是一个适合于不同光照下的精确数据，所以利用上面公式建立数学模型不仅建立困难，而且其仿真应用也收到很大限制，没有多少实用价值。所以必须建立一种既实用又有较好精度的数学模型。

光伏电池厂商一般只提供这几个技术参数：短路电流 I_{sc}、开路电压 V_{oc}、最大功率点电流 I_{m}、最大功率点电压 V_{m}、最大功率 P_{m}。在特性方程（1）的基础上，采取两点近似，即

1）忽略 $\dfrac{V + IR_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}$ 项，因为在通常情况下该项远小于光电流。

2）设定 $I_{\mathrm{ph}}=I_{\mathrm{sc}}$，因为在通常情况下 R_{s} 远小于二极管正向导通电阻。

于是特性方程（1）可简化为

$$I = I_{\mathrm{sc}}\left(1 - C_1\left\{\exp\left[V/(C_2 V_{\mathrm{oc}})\right] - 1\right\}\right) \qquad (2)$$

在最大功率点时，$V=V_{\mathrm{m}}$，$I=I_{\mathrm{m}}$，可得

$$I_{\mathrm{m}} = I_{\mathrm{sc}}\left(1 - C_1\left\{\exp\left[V_{\mathrm{m}}/(C_2 V_{\mathrm{oc}})\right] - 1\right\}\right) \qquad (3)$$

由于在常温条件下 $\exp[V_{\mathrm{m}}/(C_2V_{\mathrm{oc}})]>>1$,可忽略式中的“$-1$”项，解出 C_1

$$C_1=（1-I_{\mathrm{m}}/I_{\mathrm{sc}}）\exp[-V_{\mathrm{m}}/(C_2V_{\mathrm{oc}})] \qquad (4)$$

注意到开路状态下，当 $I=0$ 时，$V=V_{\mathrm{oc}}$，并把式（3）代入式（2）得

$$0 = I_{\mathrm{sc}}\left\{1 - \left(1 - \frac{I_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{sc}}}\right)\exp\left[-\frac{V_{\mathrm{m}}}{C_2 V_{\mathrm{oc}}}\right]\cdot\left[\exp(1/C_2) - 1\right]\right\} \qquad (5)$$

由于 $\exp(1/C_2)>>1$，忽略式中的“-1”项，解出 C_2

$$C_2=（V_{\mathrm{m}}/V_{\mathrm{oc}}-1）[\ln(1-I_{\mathrm{m}}/I_{\mathrm{sc}})]-1 \qquad (6)$$

不同的日照强度和电池温度下的 I_{sc}、V_{oc}、I_{m}、V_{m} 并不相同，通过下式（7）—（12）算出新日照强度和新电池温度下的 I'_{sc}、V'_{oc}、I'_{m}、V'_{m}，就可以

根据式（4）、（6）得出 C_1 和 C_2。最后由式（2）就可以确定特定调节下的光伏电池的 *I-V* 特性曲线。

$$\Delta T=T-25 \tag{7}$$

$$\Delta S=\frac{S}{1000}-1 \tag{8}$$

$$I'_{sc}=I_{sc}\frac{S}{1000}\left(1+\alpha\Delta T\right) \tag{9}$$

$$V'_{oc}=V_{oc}\left(1-\gamma\Delta T\right)\ln\left(1+\beta\Delta S\right) \tag{10}$$

$$I'_{m}=I_{m}\frac{S}{1000}\left(1+\alpha\Delta T\right) \tag{11}$$

$$V'_{m}=V_{m}\left(1-\gamma\Delta T\right)\ln\left(1+\beta\Delta S\right) \tag{12}$$

其中，T 为电池温度，S 为日照强度，α为 I_{sc} 的温度系数（缺省值＝0.0025/℃），β 为 V_{oc} 的无量纲的辐照量校正因子（缺省值＝0.5），γ 为 V_{oc} 的温度系数（缺省值＝0.00288/℃）。

利用 Matlab/Simulink 软件，对上述模型进行验证。光伏组件我们选择伊索菲通的 ISF-60/12，P_m=60wp+/–10%，I_{sc}=3.73A，V_{oc}=21.6V，I_m=3.47A，V_m=17.3V。图 3 是在标准测试条件下，仿真结果和实际数据的对比。仿真模型输出的特性曲线与实际光伏阵列的曲线吻合得很好,平均误差在 5%之内（定义相对误差为δ=（$I_{模型}-I_{实际}$）/I_{sc}×100%）[5]，光伏阵列模型很好地模拟了实际光伏阵列的特性。

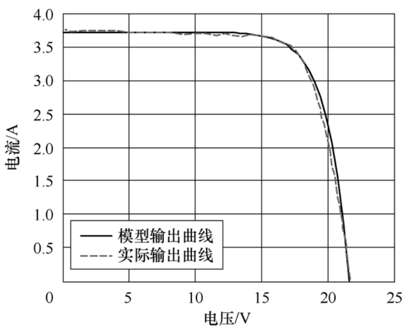


图 3　光伏组件实验数据与 Simulink 模型结果误差分析

3　光伏阵列模拟器的恒流源实现

基于上述光伏阵列模型的分析，我们以实验室现有仪器设备（PC、恒流源 ITECH6153、电子负载 ITECH8513、PCI 采集卡等）为主，设计实现了光伏阵列模拟器，其连接结构如图 4 所示（其中，可控负载并不属于模拟器，只是为了测试模拟器性能时使用）。仪器间的通信采用 GPIB 总线，其中，PC 既是 GPIB 总线上的 Controller 又是 Talker，恒流源和负载是 GPIB 总线上的 Listener。

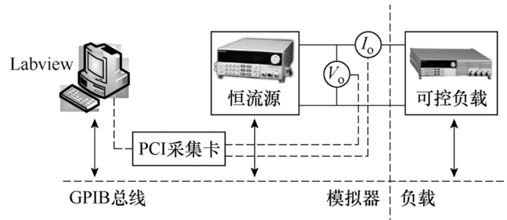


图 4　光伏阵列模拟器结构图

利用虚拟仪器的设计模式，PC 上的软件用 LabView 8.2 来实现。最终的程序界面如图 5 所示。其工作原理是：首先要将在 Simulink 里建立的阵列模型和参数全部移植到 LabView 程序里，然后通过 PCI 采集卡将恒流源的输出电压值和输出电流值传到 PC 的 LabView 程序里，将电压值作为阵列模型的输入参数，输出参数为在特定温度和光照条件下的阵列电流，此时通过 SCPI 指令控制恒流源输出计算出的阵列电流，由于负载不变，输出电压必然随阵列电流正比变化，然后再次循环，检测恒流源的电压和电流，通过阵列模型计算阵列输出电流。这样利用电压的闭环控制，最终找到 *I-V* 曲线上此时负载所对应的工作点，然后在软件界面输出此时模拟器的工作电压、电流和功率。其程序流程图如图 6 所示。

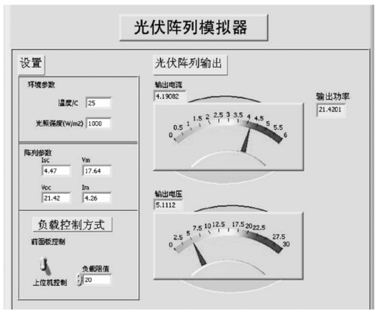


图 5　光伏阵列模拟器控制程序界面

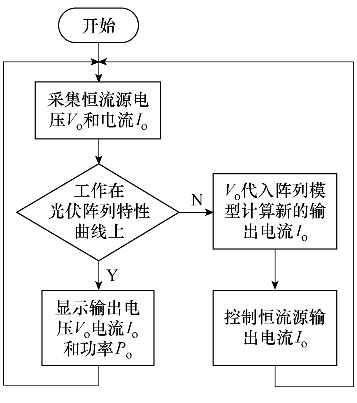
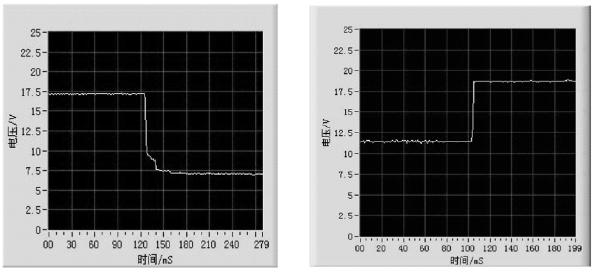


图 6　恒流源控制程序流程图

4 模拟器试验结果

当光伏阵列模拟器带载载运行时，要求工作点电压电流在环境调节变化时能够较快做出响应。



(a) 700W/m^2→150W/m^2　　(b) 400W/m^2→900W/m^2

图 7　光照强度变化时的输出电压曲线

我们将阵列参数设置为 I_{sc}=3.73A，V_{oc}=21.6V，I_m=3.47A，V_m=17.3V，环境温度设置在 25℃，而通过阶跃信号模拟光照强度的变化。图 7（a）和图 7（b）分别是当光强由 700W/m^2 突降到 150W/m^2 和由 400W/m^2 上升到 900W/m^2 时，模拟器输出电压的动态变化曲线。光照强度变化后，大约经过 60ms 建立了新的稳态工作点，且稳态误差较小，在允许范围内。响应时间主要来自电流源对 SCPI 指令的响应时间，其足以满足模拟真实光伏阵列工作的需要。

5 结论

本文先在 Matlab/Simulink 里建立了一种实用的光伏阵列的仿真模型，并且验证了模型的正确性；然后利用利用实验室现有的仪器设备组成了一套光伏阵列的模拟器，由试验仿真结果可以看到，本模拟器可以较好的模拟出设定电池阵列的 *I-V* 曲线，能够作为光伏电池及时提供给其他光伏发电系统，极大地方便了项目设计和课题研究。不过由于电流源和电信号采集电路并没有经过专门选择和设计，使得阵列模拟功率受到一定限制，且稳态时电压存在一定的小幅震荡。如果选择输出功率较大精度较高的电流源及设计合适的采集电路，完全可以提高本文光伏阵列模拟器的性能。

参考文献

[1] 赵争鸣.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社, 2005: 1-2.

[2] 沈玉梁.跟随样品太阳电池的光伏阵列模拟器[J]. 太阳能学报, 1997, 18(4).

[3] 韩朋乐,黄建国.数字式光伏阵列模拟器的设计研究[J].电子元器件应用, 2008, 10(11).

[4] 李欣,林平.数字式光伏阵列模拟器的研制[D].浙江大学, 2007. 5.

[5] 苏建徽,余世杰.硅太阳电池工程用数学模型[J].太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.

[6] IEC 62124-2004,独立光伏系统-设计验证[S].

作者简介

鲁志平（1974-），男，工学硕士，河北承德人，保定天威风电科技有限公司总工程师，研究方向为风力发电机组设计、运行与控制。

New 新闻与动态

国内首个 220kV 标准配送式智能变电站预制舱出厂

近日，浙江绍兴 220kV 袍南站智能变电站预制式组合二次设备舱从南京出厂，发往绍兴现场。该变电站是国家电网公司标准配送式智能变电站首批五个试点项目中的唯一的一个 220kV 变电站，国电南瑞承担了该站二次设备建设总承包工作。

2012 年 12 月，国家电网公司创新变电站工程建设模式，全面启动标准配送式智能变电站工作，大力推行“标准化设计、工厂化加工、装配式建设”。标准配送式智能变电站取消主控室或操作小室，以预制式组合二次设备舱代替。预制舱是一种新型的电力设备结构载体，在节能环保的同时具有机械强度高、人机操作环境佳、安全可靠性高等特点。在出厂前，变电站二次设备完成入舱和集成调试，直接到现场投运，改变了原有的现场安装、调试工作方式，具有占地面积小、建设工期短、投资成本低等显著优点。根据测算，袍南站采用标准配送式智能变电站模式后建设占地面积节约 12%左右，总投资金预计额节约 10%～15%，建设工期减半。

为节省设备安装空间，国电南瑞对二次设备进行了优化设计，整合了监控系统功能，优化了站控层功能模块配置，减少了屏柜数量。除二次设备装备实现标准化装配外，该预制舱采用预制光缆实现“即插即用”的标准化连接，使得一次设备与二次设备、二次设备间的光缆、电缆标准化连接，从而降低现场施工安全风险，在节能环保的同时，全面提升建设效率和建设能力。同时，预制舱设计充分考虑舱内通风、照明、温湿度控制、屏柜布置以及线缆接入、消防、安装与维护等方面的内容，安装了空调、摄像头、应急照明等必须的配套设施。

为了适应标准配送式变电站配送的要求，国电南瑞对预制式组合二次设备舱和二次设备“即插即用”预制式光、电缆的选型、预制方式、环境适应性、防护等级要求等多个方面开展了大量的研究工作，并参与编写了《标准配送式智能变电站建设技术导则》和《预制式组合式二次设备技术规范》。