

《物理实验（二）》：太阳能电池特性

太阳能电池同其它电源发电原理不同，具有无枯竭危险，无污染，不受资源分布地域的限制等特点。随着技术的进步与产业规模的扩大，太阳能发电的成本在逐步降低，具有重大应用前景。

太阳能发电有离网运行与并网运行 2 种发电方式。

并网运行是将太阳能发电输送到大电网中，由电网统一调配，输送给用户。此时太阳能电站输出的电能必需与电网电能同频率、同相位，并满足电网安全运行的诸多要求。大型太阳能电站大都采用并网运行方式。

离网运行是太阳能系统与用户组成独立的供电网络。由于光照的时间性，为解决无光照时的供电，必需配有储能装置，或能与其它电源切换、互补。中小型太阳能电站大多采用离网运行方式。本实验相当于离网型应用系统。

【实验目的】

1. 了解并掌握太阳能发电系统的组成及工程应用
2. 测量太阳能电池输出伏安特性
3. 太阳能电池对储能装置两种方式充电实验

【实验原理】

离网型太阳能电源系统如图 1 所示。控制器又称充放电控制器，起着管理光伏系统能量，保护蓄电池及整个光伏系统正常工作的作用。当太阳能电池方阵输出功率大于负载额定功率或负载不工作时，太阳能电池通过控制器向储能装置充电；当太阳能电池方阵输出功率小于负载额定功率或太阳能电池不工作时，储能装置通过控制器向负载供电。蓄电池过度充电和过度放电都将大大缩短蓄电池的使用寿命，需控制器对充放电进行控制。

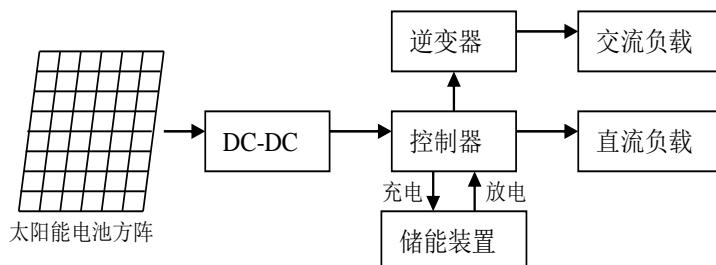


图 1 太阳能光伏电源系统

DC-DC 为直流电压变换电路，相当于交流电路中的变压器。当电源电压与负载电压不匹配时，DC-DC 调节负载端电压，使负载正常工作。改变负载端电压，改变了折算到电源端的等效负载电阻，当等效负载电阻与电源内阻相等时，电源最大限度输出能量。通过反馈信号控制驱动脉冲，进而控制 DC-DC 输出电压，使电源始终最大限度输出能量，这种功能模块称为最大功率跟踪器。

光伏系统常用的储能装置为蓄电池与超级电容器。光伏系统使用的蓄电池多为铅酸蓄电池，放电时，化学能转换成电能，正极的氧化铅和负极的铅都转变为硫酸铅；充电时，电能转换为化学能，硫酸铅在正负极又恢复为氧化铅和铅。充电电流过大，会导致蓄电池的温度过高和活性物质脱落，影响蓄电池寿命。理想充电模式是，开始时以蓄电池允许的最大充电电流充电，随电池电压升高逐渐减小充电电流，达到最大充电电压时立即停止充电。蓄电池具有储能密度高的优点，但存在充放电时间长，充放电寿命短，功率密度低，使用及保养不当易损坏的缺点。

超级电容器通过极化电解质来储能，它由悬浮在电解质中的两个多孔电极板构成。在极板上加电，正极板吸引电解质中的负离子，负极板吸引正离子，实际上形成两个容性存储层，它所形成的双电层和传统电容器中的电介质在电场作用下产生的极化电荷相似，从而产生电容效应。由于紧密的电荷层间距比普通电容器电荷层间的距离小得多，具有比普通电容器更大的容量。

当超级电容所加电压低于电解液的氧化还原电极电位时，电解液界面上电荷不会脱离电解液，为正常工作状态。如两端电压超过电解液的氧化还原电极电位，电解液将分解，为非正常状态。

超级电容器的充放电过程始终是物理过程，没有化学反应，性能稳定。与利用化学反应的蓄电池不同，超级电容器可以反复充放电数十万次。超级电容具有功率密度高（可大电流充放电），充放电时间短（一般为数分钟），充放电寿命长的优点。本装置储能装置为超级电容器。

逆变器是将直流电变换为交流电的电力变换装置。逆变电路一般都需升压来满足220V常用交流负载的用电需求。逆变器按升压原理的不同分为低频，高频和无变压器3种逆变器。

低频逆变器首先把直流电逆变成50Hz低压交流电，再通过低频变压器升压成220V的交流电供负载使用。它的优点是电路结构简单，缺点是低频变压器体积大、价格高、效率也较低。

高频逆变器将低压直流电逆变为高频低压交流电，经过高频变压器升压后，再经整流滤波电路得到高压直流电，最后通过逆变电路得到220V低频交流电供负载使用。高频逆变器体积小、重量轻、效率高，是目前用得最多的逆变器类型。

无变压器逆变器通过串联太阳能电池组或DC-DC电路得到高压直流电，再通过逆变电路得到220V低频交流电供负载使用。

【仪器介绍】

如图2，实验装置由太阳能电池组件、实验仪和测试仪（测试电压、电流）组成，参数如下：

太阳能电池：单晶硅太阳能电池，标称电压 12V，标称功率 4W

光源：150W 卤钨灯 负载组件：0~1kΩ, 2W

直流风扇：12V, 1W LED 灯：直流 15V, 0.4W

超级电容 2.35F, 11V 交流负载：节能灯，5W

直流电源：12V, 1.25A 逆变器：DC12V~AC220V, 100W

DC-DC：升降压 DC-DC，输入 5~35V，输出 1.5~17V, 1A

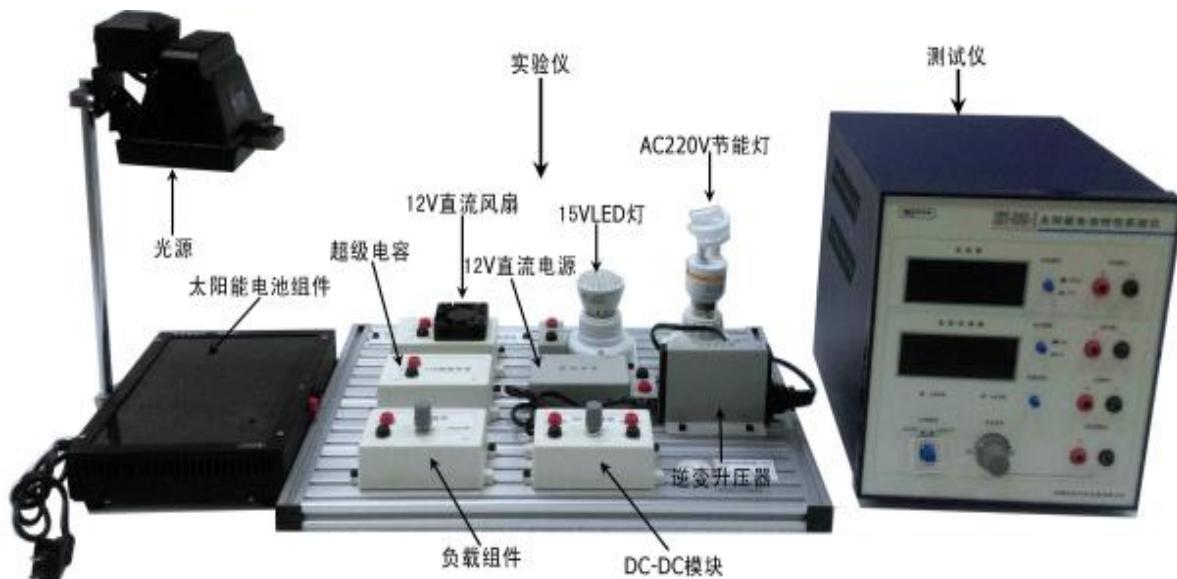


图 2 太阳能电池应用实验装置

【实验内容与步骤】

1. 测量太阳能电池输出伏安特性

- (1) 打开光源预热至少 10min，待其光照稳定。
- (2) 按图 3 (左) 连接电路，电阻箱设置 0Ω ，观察电流表读数；旋松光源止动螺钉，调节光源高度，使得电流值在 60~90mA 范围内。

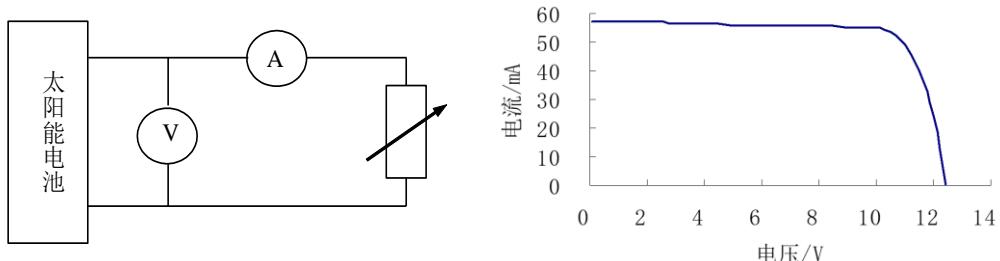


图 3 (左) 太阳能电池输出伏安特性接线图；(右) 太阳能电池伏安特性曲线

- (3) 光照不变时，改变负载电阻（电阻箱）阻值，太阳能电池输出的电压电流的关系曲线如图 3 (右) 所示。负载电阻为 0 时的电流称为短路电流。负载电阻断开时的电压称为开路电压。

改变负载电阻（电阻箱）阻值，记录太阳能电池的输出电压 U 和电流 I ，计算输出功率 $P_0=UI$ 。

表 1 太阳能电池输出伏安特性

电压 $V(V)$	1	2	4	6	8	10	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8	12.0
电流 $I(mA)$																
功率 $P_0(mW)$																

数据处理：坐标纸铅笔作图（或软件作图）：太阳能电池的 I-V 曲线、P-V 曲线；得出太阳能电池最大输出功率；分析太阳能电池输出功率特性。

2. 失配及遮挡对太阳能电池输出的影响

本实验所用太阳能电池结构如图 4 所示。太阳能电池在串、并联使用时，由于每片电池电性能不一致，使得串、并联后的输出总功率小于各个单体电池输出功率之和，称为太阳能电池的失配。

太阳能电池并联连接时，总输出电流为各并联电池支路电流之和。在有失配或遮挡时，只要最差支路的开路电压高于组件的工作电压，则输出电流仍为各支路电流之和。

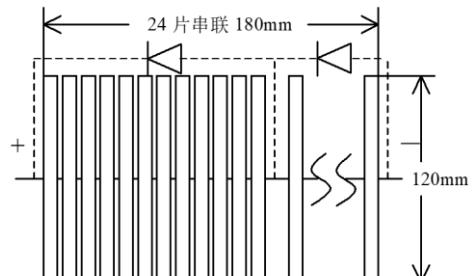


图 4 太阳能电池结构

太阳能电池串联连接时，串联支路输出电流由输出最小的电池决定。在有失配或遮挡时，会使该支路输出电流降低；同时，失配或被遮挡部分将消耗其它部分产生的能量，这样局部的温度就会很高，产生热斑，严重时会烧坏太阳能电池组件。在应用系统中，常常在电池片旁并联二极管，如图虚线所示。这样，若部分面积被遮挡，其它部分仍可正常工作。

按图 3 (左) 连接电路，电阻箱设置 0Ω ，测量不同遮挡方式对短路电流的影响。

表 2 遮挡对太阳能电池输出的影响

遮挡条件	无遮挡	纵向遮挡				横向遮挡		
		遮挡面积	1 片(1/24)	2 片(1/12)	4 片 (1/6)	25%	50%	75%
短路电流 (mA)								

数据处理：分析不同遮挡方式对电池输出电流的影响。

3. 太阳能电池对储能装置充电实验

本实验对比太阳能电池直接对超级电容充电和太阳能电池后加 DC-DC 再对超级电容充电。了解充电方式下充电特性的不同及充电方式对超级电容充电效率的影响。

实验所用 DC-DC 采用输入反馈控制，工作过程中保持输入端电压基本稳定。若太阳能电池光照条件不变，并调节 DC-DC 使输入电压等于太阳能电池最大功率点对应的输出电压，即可实现在太阳能电池的最大功率输出下的恒功率充电。理论上，采用最大功率输出下的恒功率充电，太阳能电池一直保持最大输出，充电效率应该最高。目前系统中由于太阳能电池输出功率不大，而 DC-DC 本身有一定功耗，致使两种方式充电效率（以从同一低电压充至额定电压所需时间衡量）差别不大，但从测量结果可以看出充电特性的不同。

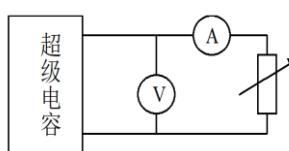


图 5a 超级电容放电

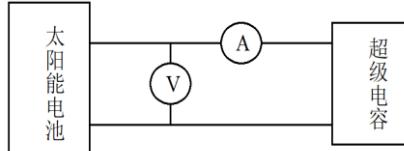


图 5b 直接充电

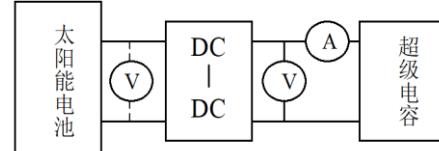


图 5c 加 DC-DC 后充电

- (1) 放电：按图 5a 接线，调节阻值（初始值 $1k\Omega$ ）使得放电电流 $<150mA$ ，电容电压放至低于 $1V$ 。
- (2) 直接充电：按图 5b 接线，太阳能电池直接对超级电容充电实验，充电至 $11V$ 时停止。
- (3) 通过 DC-DC 充电：将超级电容再次放电。按图 5c 接线，先将电压表接至太阳能电池端，调节 DC-DC 使太阳能电池输出电压为最大功率时的电压（实验 1 确定）；然后将电压表移至超级电容端（此时不再调节 DC-DC 旋钮），对超级电容充电实验，充电至 $11V$ 时停止。

表 3 两种充电情况下超级电容的充电特性

时间/min	直接对超级电容充电			加 DC-DC 后对超级电容充电		
	充电电压/V	充电电流/mA	充电功率/mW	充电电压/V	充电电流/mA	充电功率/mW
0.0						
1.0						
2.0						
3.0						
4.0						
5.0						
6.0						
7.0						
8.0						
9.0						

数据处理：同一坐标系里作图两种充电情况下的 P-t 曲线，对结果进行讨论。

4. 太阳能电池直接带负载实验

太阳能电池输出电压与直流负载工作电压一致时，可以将太阳能电池直接连接负载。

若负载功率与太阳能电池最大输出功率一致，则太阳能电池工作在最大输出功率点，最大限度输出能量。若负载功率小于太阳能电池最大输出功率，此时控制器会将太阳能电池输出的一部分能量向储能装置充电，使太阳能电池回归最佳工作点。若负载功率大于太阳能电池最大输出功率，此时控制器会由储能装置向负载提供部分电能，使太阳能电池回归最佳工作点。

本实验模拟负载功率大于太阳能电池最大输出功率的情况，观察并联超级电容前后太阳能电池输出功率和负载实际获得功率的变化，理解上述控制过程。

(1) 按图 6 接线, 断开超级电容, 记录并联超级电容前, 太阳能电池输出电压电流, 计算输出功率 $P=UI$ 。

(2) 将充电至约 11V 的超级电容并联至负载, 由于超级电容容量较小, 可看到负载端电压从 11V 一直下降 (实际应用系统中, 只要储能器容量足够大, 下降速率会非常慢)。

超级电容电压降至接近太阳能电池最佳工作电压时 (注: 此过程非常快), 记录电压电流。

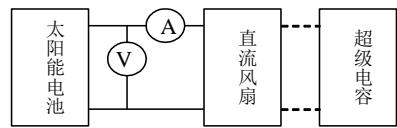


图 6 太阳电池直接连接负载接线图

表 4 太阳能电池直接带负载实验

并联超级电容前太阳能电池输出情况			并联超级电容后太阳能电池输出情况		
电压 U_1/V	电流 I_1/mA	功率 P_1/mW	电压 U_2/V	电流 I_2/mA	功率 P_2/mW

5. 加 DC-DC 后带负载实验 (选做)

太阳能电池输出电压与直流负载工作电压不一致时, 太阳能电池输出需经 DC-DC 转换为负载电压, 再连接负载。本实验比较太阳能电池输出电压与直流负载工作电压不一致时, 加不加 DC-DC 对负载获得功率的影响, 说明若不加 DC-DC, 负载无法正常工作。

(1) 按图 6 接线, 测量未加 DC-DC (不接虚线部分), 负载的电压、电流, 计算负载获得的功率。

(2) 接入 DC-DC 后, 调节 DC-DC 的调节旋钮使输出最大 (电压、电流表读数达到最大), 记录此时负载的电压、电流, 计算负载获得的功率。

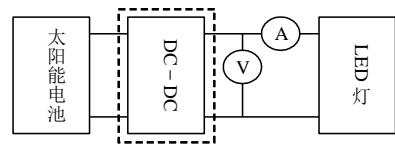


图 7 加 DC-DC 匹配电压接线图

表 5 加 DC-DC 匹配电源电压与负载电压实验

加 DC-DC 前负载获得功率			加 DC-DC 后负载获得功率		
电压 U_1/V	电流 I_1/mA	功率 P_1/mW	电压 U_2/V	电流 I_2/mA	功率 P_2/mW

6. DC-AC 逆变与交流负载实验 (选做)

当负载为 220V 交流时, 太阳能电池输出必需经逆变器转换成交流 220V, 才能供负载使用。由于节能灯功率远大于太阳能电池输出功率, 由太阳能电池与直流电源、超级电容并联后给节能灯供电, 且超级电容并联前需先充电至 11~12V 电压范围。按图 8 接线, 220V 节能灯将被点亮。

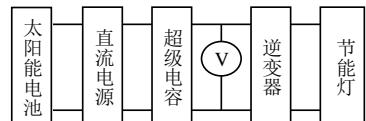


图 8 交流负载实验接线图

【思考题】

1. 太阳能电池主要有哪些材料? 其特点是什么?
2. 查阅资料, 列举太阳能电池在实际生活中的应用实例。