

# 太阳能光伏并网控制逆变器工作原理及控制方法

石勇，许强

(西安爱科电子有限责任公司，710019)

摘要：太阳能光伏发电是 21 世纪最为热门的能源技术领域之一，是解决人类能源危机的重要手段之一，引起人们的广泛关注。本文介绍了太阳能光伏并网控制逆变器的工作过程，分析了太阳能控制器最大功率跟踪原理，太阳能光伏逆变器的并网原理及主要控制方式。

## 1 引言：

随着工业文明的不断发展，我们对于能源的需求越来越多。传统的化石能源已经不可能满足要求，为了避免面对能源枯竭的困境，寻找优质的替代能源成为人们关注的热点问题。可再生能源如水能、风能、太阳能、潮汐能以及生物质能等能源形式不断映入人们的眼帘。水利发电作为最早应用的可再生能源发电形式得到了广泛使用，但也有人就其的环境问题、安全问题提出过质疑，况且目前的水能开发程度较高，继续开发存在一定的困难。风能的利用近些年来也是热点问题，但风力发电存在稳定性不高、噪音大等缺点，大规模并网对电网会形成一定冲击，如何有效控制风能的开发和利用仍是学术界关注的热点。在剩下的可再生能源形式当中，太阳能发电技术是最有利用价值的能源形式之一。太阳能储量丰富，每秒钟太阳要向地球输送相当于 210 亿桶石油的能量，相当于全球一天消耗的能量。我国的太阳能资源也十分丰富，除了贵州高原部分地区外，中国大部分地域都是太阳能资源丰富地区，目前的太阳能利用率还不到 1/1000。因此在我国大力开发太阳能潜力巨大。

太阳能的利用分为“光热”和“光伏”两种，其中光热式热水器在我国应用广泛。光伏是将光能转化为电能的发电形式，起源于 100 多年前的“光生伏打现象”。太阳能的利用目前更多的是指光伏发电技术。光伏发电技术根据负载的不同分为离网型和并网型两种，早期的光伏发电技术受制于太阳能电池组件成本因素，主要以小功率离网型为主，满足边远地区无电网居民用电问题。随着光伏组件成本的下降，光伏发电的成本不断下降，预计到 2013 年安装成本可降至 1.5 美元/Wp，电价成本为 6 美分/(kWh)，光伏并网已经成为可能。并网型光伏系统逐步成为主流。

本文主要介绍并网型光伏发电系统的系统组成和主要部件的工作原理。

## 2 并网型光伏系统结构

图 1 所示为并网型光伏系统的结构。并网型光伏系统包括两大主要部分：

其一，太阳能电池组件。将太阳传送到地球上的光能转化成直流电能；其二，太阳能控制逆变器及并网成套设备，负责将电池板输出直流电能转为电网可接受的交流能量。根据功率的不同太阳能逆变器的输出形式可为单相或者三相；可带隔离变压器，也可不配隔离变压器。

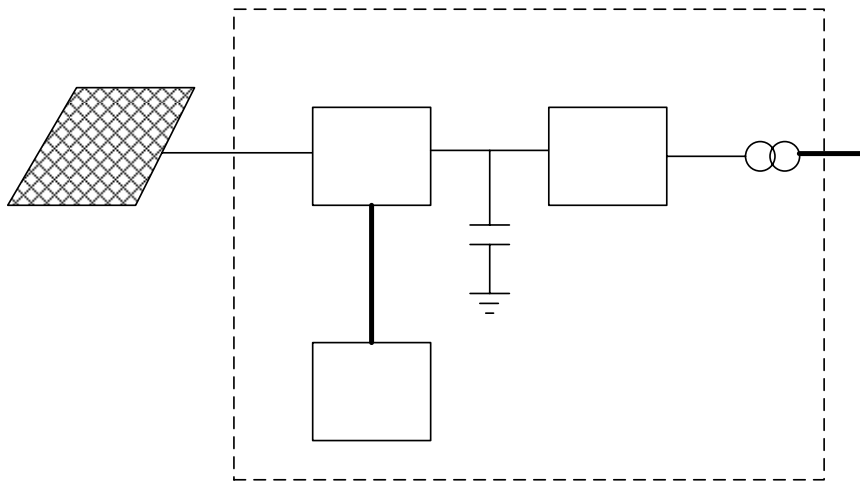


图 1 并网型光伏发电系统

太阳能控制逆变器及并网成套设备，主要包括控制器、逆变器以及监控保护单元组成。控制器主要实现太阳能电池板的最大功率跟踪，逆变器主要负责将控制器输出的直流电能变换成稳压稳频的交流电能馈送电网，监控保护单元主要负责发电系统安全相关问题如孤岛效应的保护，并及时与上位机通讯传递能量传输信息。

## 3 太阳能控制器及其原理

### 3.1 太阳能电池组件模型

图 2 所示硅型光伏电池板的理想电路模型。其中， $I_{ph}$ 是光生电流， $I_{ph}$ 值与光伏电池的面积、入射光的辐射度以及环境温度相关。 $I_D$ 为暗电流。没有太阳光照射的情况下，硅型太阳能电池板的基本外特性类似于普通的二极管。暗电流是指光伏电池在没有光照条件下，在外电压的作用下PN结流过的单向电流。 $v$ 为开路电压， $R_S$ 为串联电阻一般小于 1 欧姆， $R_{SH}$ 为旁路电阻为几十千欧。

光伏电池的理想模型可由下式表示：

太阳能  
控制器

电池板

监控  
保护

$$i = I_{ph} - I_D \left( e^{\frac{v+iR_s}{v_t}} - 1 \right) - \frac{v+iR_s}{v_t} \quad (1)$$

其中， $v_t$ 为电池板热电势。

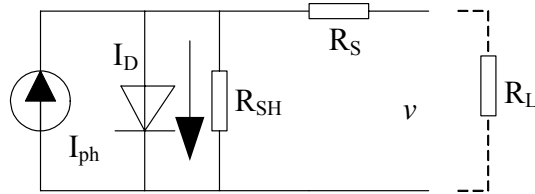


图 2 光伏电池的等效电路图

图 3 表述在特定光照条件下电池板的伏安特性。阴影部分是电池板在相应条件下所能够输出的最大功率。太阳能电池板在高输出电压区域，具有低内阻特性，可以视为一系列不同等级的电压源；在低输出电压区域内，该电源有高内阻特性，可以视为不同等级的电流源。电压源与电流源的交汇处便是电池板在相应条件下的最大输出功率。在电池板的温度保持不变的情况下，这个极大功率值会随着光照强度的变化而变化，最大功率跟踪要求能够自动跟踪电池板的工作在输出功率极大的条件。

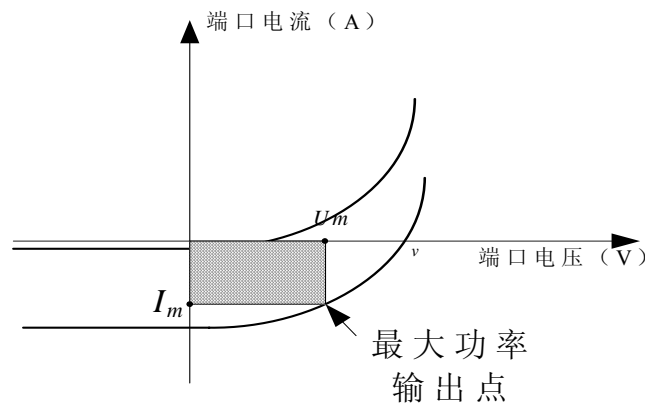


图 3 硅电池伏安特性

### 3.2 太阳能控制器电路拓扑

图 4 为太阳能控制器的电路拓扑结构，从原理上说是以及升压斩波器，通过调整开关器件 S 的占空比，调节电池板的等效负载阻抗，实现对电池板的最大功率跟踪功能。

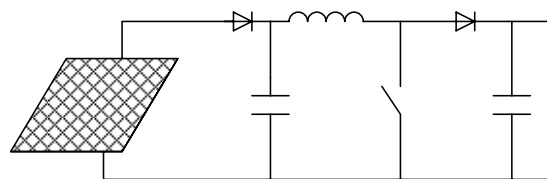


图 4 控制电路结构

### 3.3 最大功率跟踪方法

最大功率跟踪技术有两种技术路线：其一是 CVT 技术，控制电池组件端口电压近似模拟最大功率跟踪，这种方法原理简单但是跟踪精度不够；其二是 MTTP 技术，实时检测光伏阵列输出功率，通过调整阻抗的方式满足最大功率跟踪。目前，太阳能逆变器厂家广泛采用的 MPPT 技术。目前，常用的 MTTP 方法有两种。

#### (A) 干扰观测法 (P&O):

干扰观测法每隔一定时间增加或减少电压，通过观测功率变化方向，来决定下一步的控制信号。如果输出功率增加，那么继续按照上一步电压变化方向改变电压，如果检测到输出功率减小，则改变电压变化的方向，这样光伏阵列的实际工作点就能逐渐接近当前最大功率点。如果采用 DC/DC 变换器实现 MPPT 控制，在具体实施时应通过对占空比施加扰动来调节光伏阵列输出电压或电流，从而达到跟踪最大功率点的目的。如果采用较大的步长对占空比进行“干扰”，这种跟踪算法可以获得较快的跟踪速度，但达到稳态后光伏阵列的实际工作点在最大功率点附近振荡幅度比较大，造成一定的功率损失，采用较小的步长则正好相反。

#### (B) 电导增量法 (INC):

光伏电池在最大功率点  $P_m$  处  $dP/dU=0$ ，在  $P_m$  两端  $dP/dU$  均不为 0。

$$\frac{dP_{\max}}{dU} = 0 \quad (2)$$

而

$$P_{\max} = U * I \quad (3)$$

则有

$$\frac{1}{U} \frac{dP_{\max}}{dU} = \frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} = 0 \quad (4)$$

要使输出功率最大，必须满足 (4) 式，使阵列的电导变化率等于负的电导

电池板

D<sub>1</sub>

C<sub>1</sub>

L

值。首先假设光伏阵列工作在一个给定的工作点，然后采样光伏阵列的电压和电流，计算  $\Delta v = v(n) - v(n-1)$  和  $\Delta i = i(n) - i(n-1)$ ，其中  $(n)$  表示当前采样值， $(n-1)$  为前一次的采样值；如果  $\Delta v=0$ ，则利用  $\Delta i$  的符号判断最大功率点的位置；如果  $\Delta v \neq 0$ ，则依据  $\Delta i / \Delta v + I / V$  的符号判断。

这种跟踪法最大的优点是当光伏电池的光照强度发生变化时，输出端电压能以平稳的方式追随其变化，电压波动较扰动观测法小。缺点是其算法较为复杂，对硬件的要求特别是对检测元件的精度要求比较高，因而整个系统的硬件成本会比较高。

#### 4 太阳能逆变器及其工作原理

太阳能逆变器的电路拓扑如图 5 所示，5-a) 是单相并网逆变器电路拓扑，5-b) 是三相并网逆变器电路拓扑。从电路拓扑结构上看属于电压型控制逆变电路。从控制方式上属于电流控制型电路。

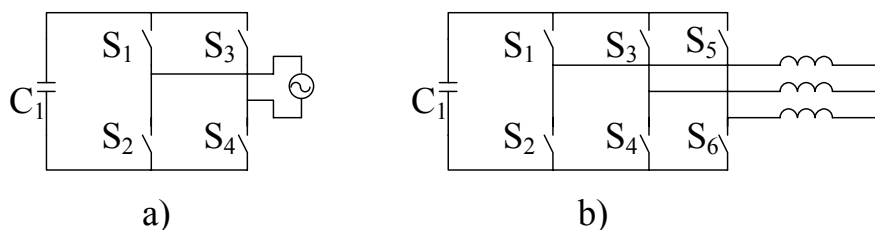


图 5 逆变器电路拓扑结构

##### 4.1 电路的基本工作原理

以图 6 的单相光伏逆变电路分析。

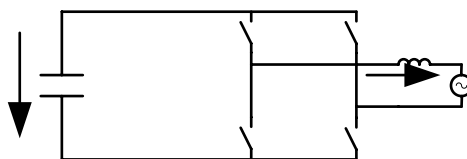


图 6 单相光伏逆变器电路

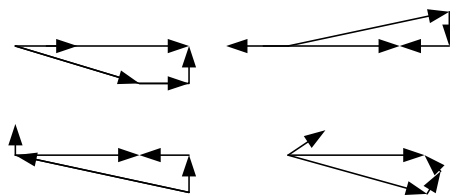


图 7 单相光伏逆变器运行向量图

按照正弦波和载波比较方式对 $S_1$ - $S_4$ 进行控制，交流侧AB处产生SPWM波 $u_{AB}$ ， $u_{AB}$ 中含有基波分量和高次谐波，在 $L_S$ 的滤波作用下高次谐波可以忽略，当 $u_{AB}$ 的频率与电网一致时， $i_s$ 也是和电网一致的正弦波。在电源电压一定的条件下， $i_s$ 的幅值和相位仅有 $u_{AB}$ 的基波的幅值和相位决定，这样电路可以实现整流、逆变以及无功补偿等作用。图7所示是电路的运行向量图，其中7-a)是整流运行，7-b)是逆变运行，7-c)是无功补偿运行，7-d)是 $I_s$ 超前 $\phi$ 角运行。单相光伏逆变器工作在7-b)状态。

## 4.2 电路的基本控制方法

光伏逆变器对于功率因数有较高要求，为了准确实现高功率因数逆变，需要对输出电流进行控制，通常的电流控制方式有两种：其一是间接电流控制，也称为相位幅值控制，按照图7的向量关系控制输出电流，控制原理简单，但精度较差，一般不采用；其二是直接电流控制，给出电流指令，直接采集输出电流反馈，这种控制方法控制精度高，准确率好，系统鲁棒性好，得到广泛应用。

## 5 监控保护单元简介

监控保护单元的主要作用有：

- ◇ 光伏并网系统作为接入电力系统的装置，需要设定合理的保护措施保护发电设备的安全以及电网的安全；
- ◇ 孤岛效应会产生很多不良影响，光伏系统作为分布式发电系统的典型代表，如何准确测定孤岛效应也是监控保护单元的重要作用；
- ◇ 太阳能光伏电站尤其是大规模的光伏电站往往建设在荒漠和无人区，智能电量管理和系统状况检测上报也是光伏发电系统需要重点考虑的因素。

### 5.1 并网保护装置

并网保护装置主要实现以下保护功能：低电压保护、过电压保护、低频率保护、高频率保护、过电流保护以及孤岛保护策略等内容。通常大型光伏电站需要设置冗余保护装置，保证系统故障时及时处理。

### 5.2 孤岛检测技术

孤岛效应是指并网逆变器在电网断电时，并网装置仍然保持对失压电网中的某一部分线路继续供电的状态。当电网的某一区域处于光伏发电的孤岛状态时，

电网将不再控制这个电力孤岛的电压和频率。孤岛效应会对光伏发电系统与电网的重连接制造困难，同时可能引起电气元件以及人身安全危害，因此孤岛效应必须避免。目前常用的孤岛效应检测方法主要有两种，分别是被动检测方法和主动式检测方法。

#### (A)被动式孤岛检测：

孤岛的发生和电网脱离时的负载特性及与电网之间的有功和无功交换有很大的关系。电网脱离后有功的波动会引起光伏系统端口电压的变化，无功的波动会引起光伏系统输出频率的变化。电网脱离后，如果有功或者无功的波动比较明显，通过监测并网系统的端口电压或者输出频率就可以检测到孤岛的发生，这就是被动式孤岛检测方法的原理。然而在电网脱离后，如果有功和无功的波动都很小，此时被动式检测方法就存在检测盲区。

#### (B)主动式孤岛检测：

主动式孤岛检测方法中用的比较多的是主动频移法（AFD），其基本原理是在并网系统输出中加入频率扰动，在并网的情况下，其频率扰动可以被大电网校正回来，然而在孤岛发生时，该频率扰动可以使系统变得不稳定，从而检测到孤岛的发生。这类方法也存在“检测盲区”，在负载品质因数比较高时，若电压幅值或频率变化范围小于某一值，系统无法检测到孤岛状态。另外，频率扰动会引起输出电流波形的畸变，同时分析发现，当需要进行电能质量治理时，频率的扰动会对谐波补偿效果造成较严重的影响。

### 智能电量管理及系统状况监控系统

大型光伏电站由于地处偏远地区，常常为无人值守电站。为了准确计量电站的电能输出及系统运行状况需要设立智能电量管理及系统状况监控系统。系统往往基于计算机数据处理平台以及互联网技术将分散的发电系统信息收集到集中控制中心进行数据分析处理工作，这部分的工作原理及系统结构在本文中不在详述。

## 6 结语

本文主要介绍了光伏并网系统的结构，分析了其主要组成部件的系统框图、功能。给出了最大功率跟踪的基本原理，分析了光伏逆变器的主要电路拓扑结构及控制方式。太阳能光伏发电技术作为有可能彻底改变人们生活的朝阳技术，拥

有美好的未来，让我们共同期待光伏技术在明天为人类作出更大的贡献。