



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 6

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第三章 光伏发电特性分析

3.1 光伏电池的物理基础

掌握太阳能光伏电池的光伏效应原理。

3.2 光伏电池的模型与等值电路

掌握光伏电池数学模型和工程分析等值电路。

3.3 太阳能光伏电池的输出外特性

掌握不同参数下光伏电池**I-V**和**P-V**特性曲线。

3.4 光伏发电的控制

掌握最大功率点跟踪方法。

复习题——光生伏特效应原理

- 当光照射到半导体光伏器件时，若光子能量大于半导体材料的禁带宽度，将在器件内产生电子-空穴对，内部P-N结附近生成的载流子没有被复合而能够到达空间电荷区；
- 受（ [填空1] ）作用，使得电子流入N区，空穴流入P区；
- 结果使N区储存了过剩的电子，P区有过剩的空穴，它们在P-N结附近形成与（ [填空2] ）方向相反的（ [填空3] ）；
- 光生电场除了部分抵消内建电场的作用外，还使P区带正电，N区带负电，在N区和P区之间的薄层就产生电动势，这就是光生伏特效应。

正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

作答

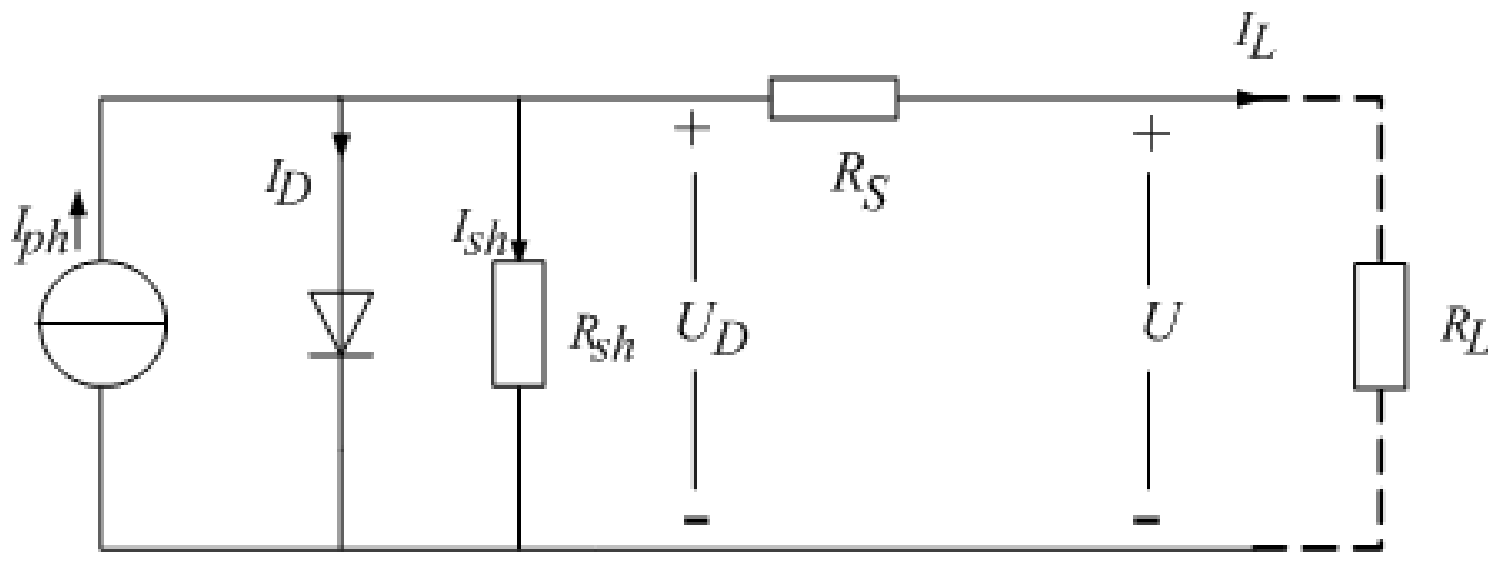
晶硅类太阳能光伏电池包括几下哪几类？

- ☒ A 单晶硅
- ☒ B 多晶硅
- ☒ C 非晶体电池
- ☐ D 多元化合物薄膜电池

提交

三、 光伏电池的数学模型回顾

- 1. 光伏电池等效电路



光伏电池的实际等效电路图

3.3 太阳能光伏电池的输出外特性

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + I_L R_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + I_L R_s}{R_{sh}}$$

- 光伏电池的输出外特性，即I-U特性和P-U特性
 - 光生电流决定于光照强度S;
 - 而电池温度T出现在等效二极管电流分量指数部分的分母上，同样影响负荷电流的大小。

工程用光伏电池数学模型

- 关键是找出数学模型中的实际可测得的光伏技术参数与光照强度和温度的关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)] \\ P(U) = IU = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)] U \\ C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(1 - \frac{U_m}{C_2 U_{oc}}) \\ C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \end{array} \right.$$

太阳能光伏电池如下出厂参数：

- 1) 开路电压 U_{oc}
- 2) 短路电流 I_{sc}
- 3) 最大功率点电压 U_m
- 4) 最大功率点电流 I_m

为标准光照强度 $S_{ref} = ([\text{填空1}]) \text{ W m}^{-2}$ 和标准
 电池温度 $T_{ref} = ([\text{填空2}]) ^\circ\text{C}$ 下的测试结果。

由上一节的推导，四个光伏电池技术参数随**太阳辐射强度** S 和**温度** T 相应改变：

$$\begin{cases} U'_{oc} = U_{oc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \\ I'_{sc} = I_{sc} S(1 + a\Delta T) / S_{ref} \\ U'_m = I_{sc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \\ I'_m = I_m S(1 + a\Delta T) / S_{ref} \end{cases}$$

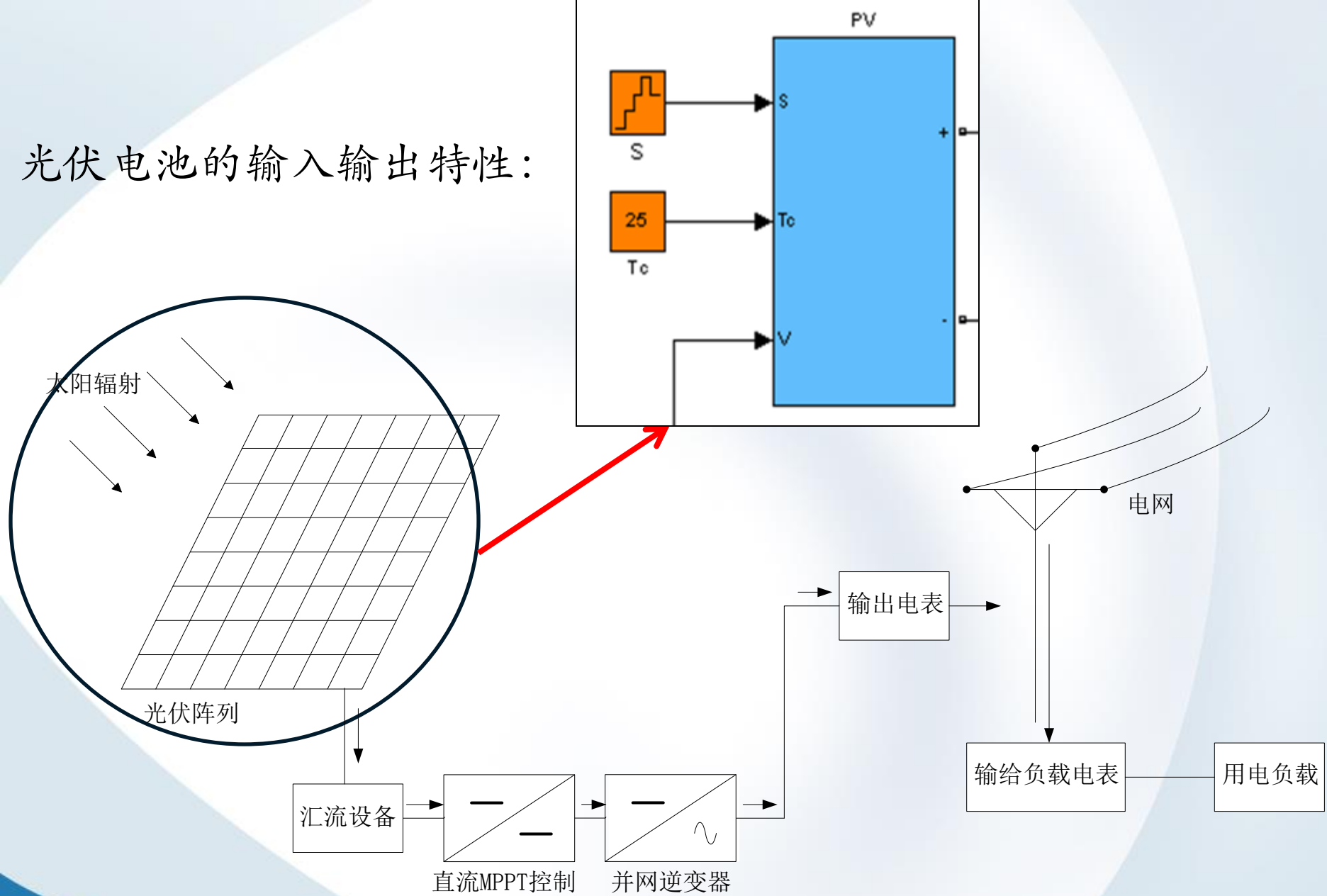
a ——常数，取 0.0025°C ；

b ——无量纲常数，取 0.05 ；

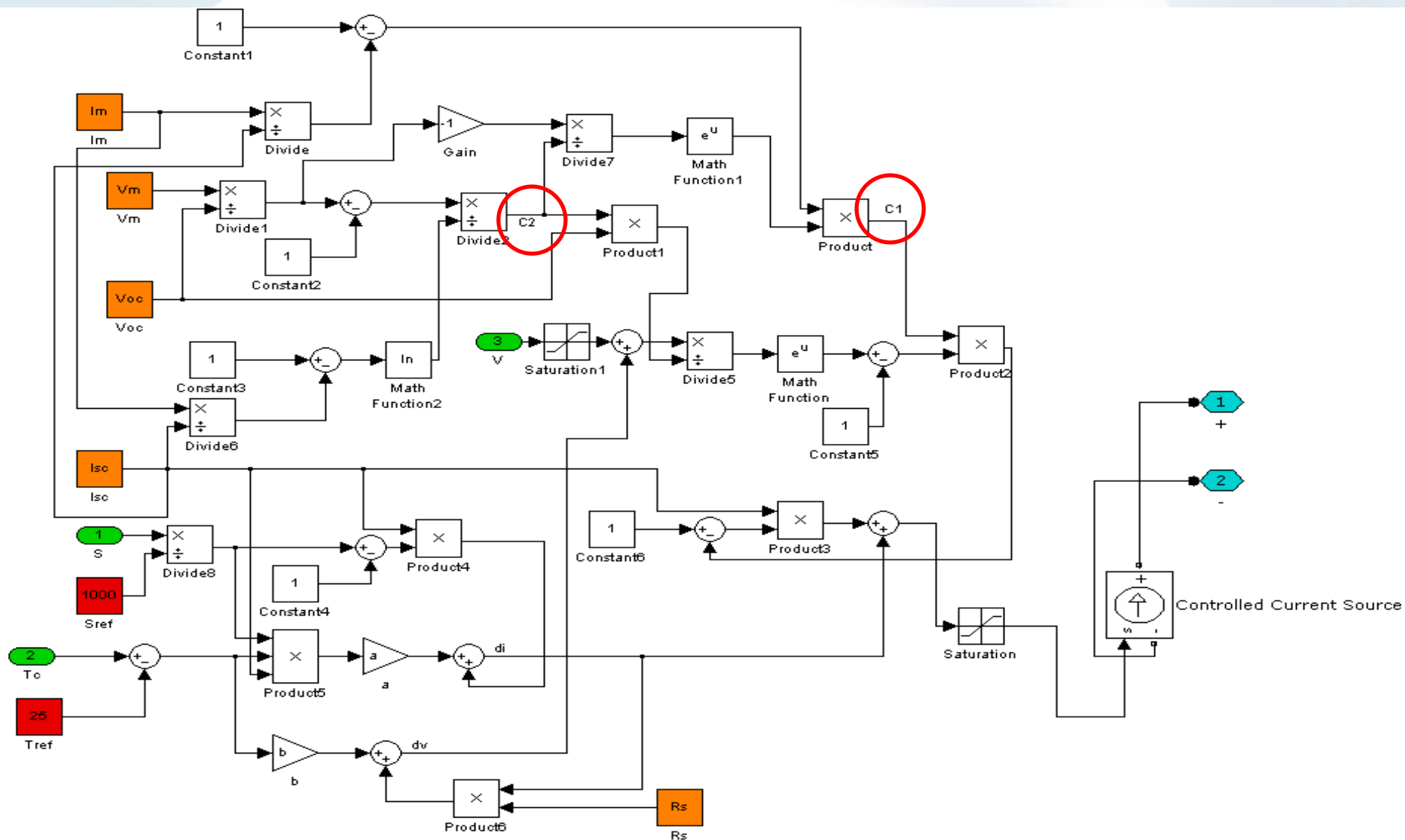
c ——常数，取 0.0028°C ；

结合式 $I_L = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)]$ ，即可得到修正后的光伏电池的 I - U 特性曲线，作为**光伏发电整体数学模型的基础**。

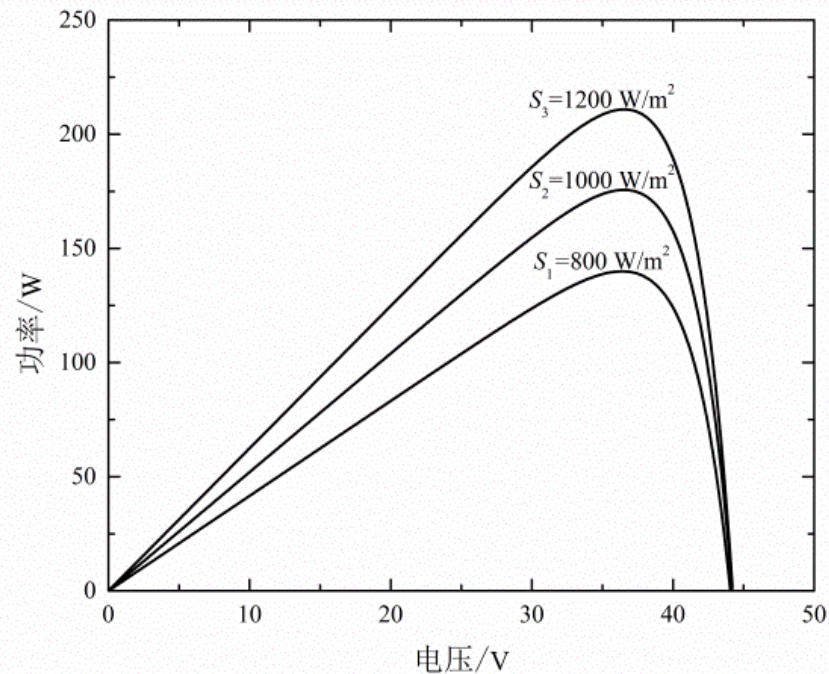
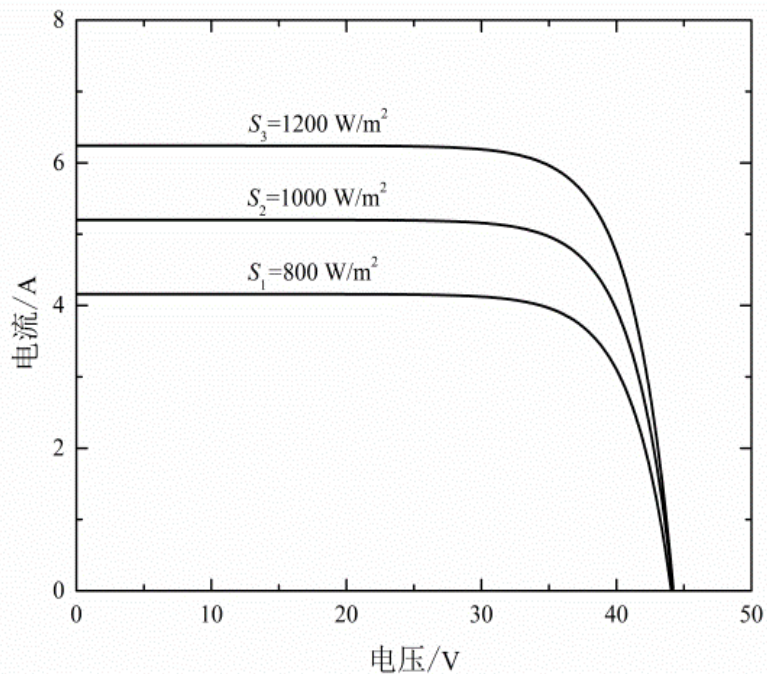
光伏电池的输入输出特性：



并网型光伏电站整体拓扑结构图

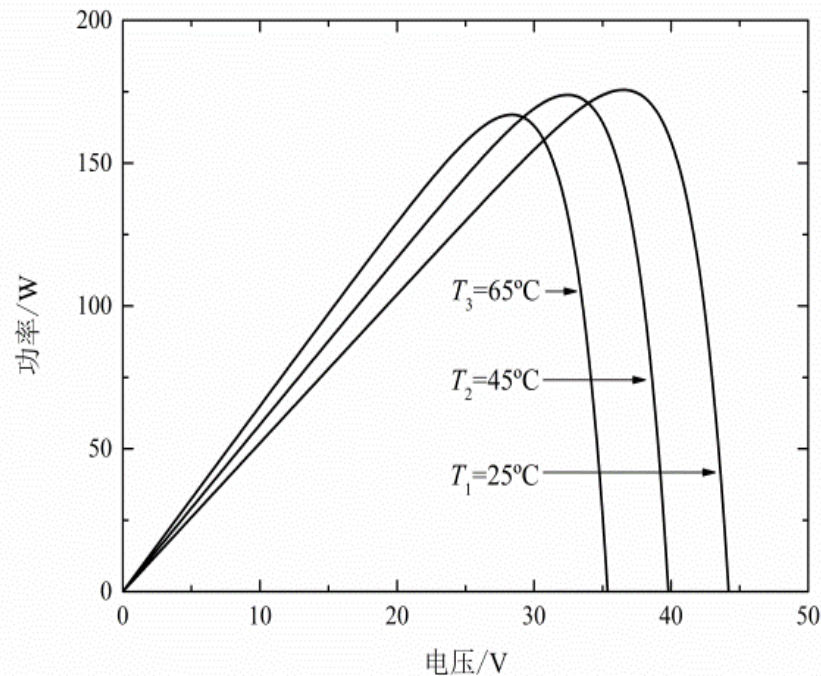
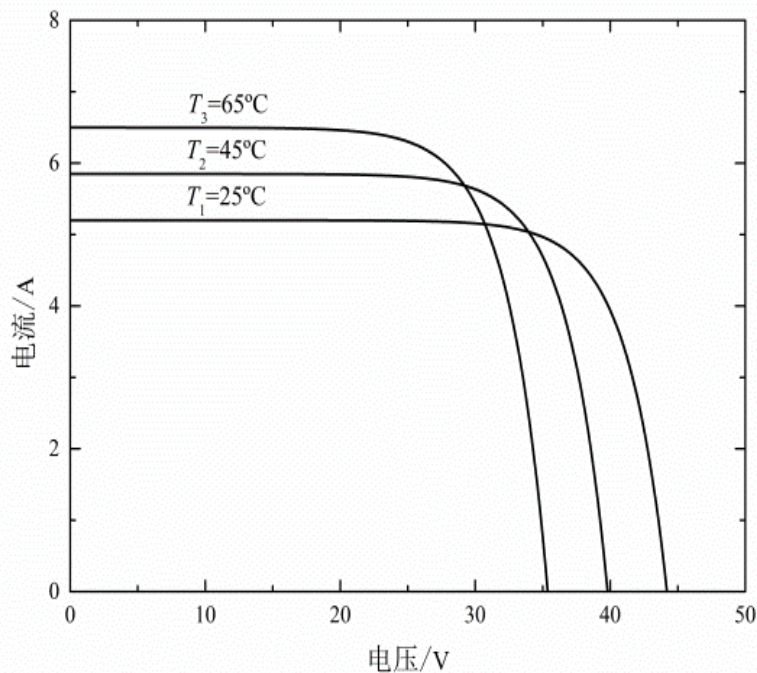


光伏阵列动态仿真模型



不同太阳辐射强度下光伏电池输出特性曲线

光照强度越大，光生电流越大，
光伏输出的有功功率越大。



不同温度下典型光伏电池输出特性曲线

温度越低，开路电压 U_{OC} 越大，短路电流 I_{SC} 越小，但 U_{OC} 效应更明显，光伏输出的有功功率越大。



3.4 光伏发电的控制技术

一、最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）的概念

- 光伏电池直流部分的输出有功功率可以根据负载的需求而取不同的值。
- 实际工程中，鉴于光伏发电的高成本，通常对光伏阵列的直流输出进行最大有功功率跟踪控制，即让光伏电池/阵列能尽可能最大利用当前的太阳辐射能来发电。
- 因此，MPPT是一种常用在风力发电机及光伏太阳能系统的技术，目的是在各种情形下都可以得到最大的功率输出。

$$I_L = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)] \quad \text{——此式至关重要!!!}$$

$$P(U) = IU = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)]U$$

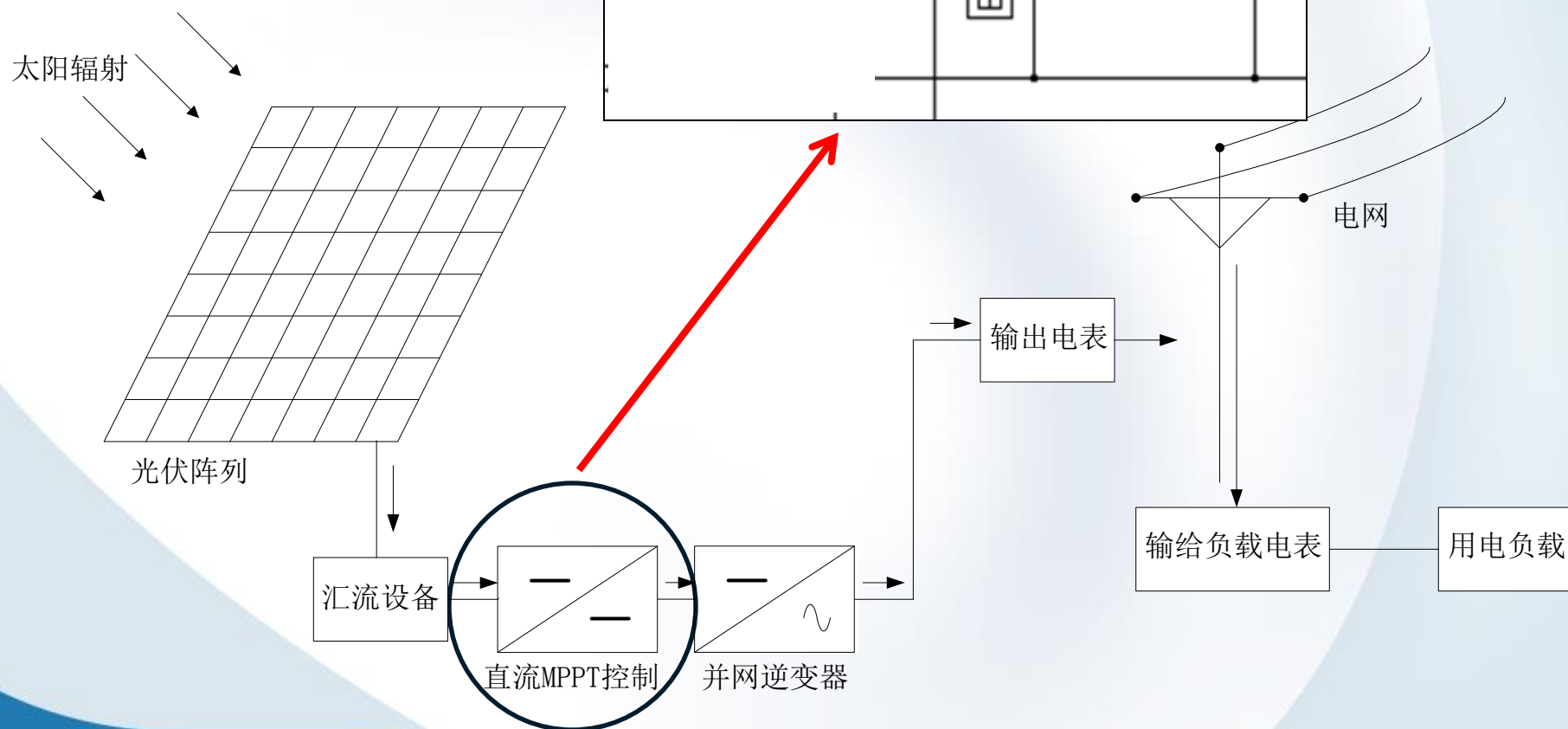
$$dP / dU = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)] - I_{sc} [\frac{C_1}{C_2 U_{oc}} \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)]U$$

- $dP/dU=0$ 时求解出的功率 P 对应的是最大功率点 P_m (下凸);
- 在某一特定温度和光照强度下, 光伏电池输出电流和电压在一条曲线上移动, 在其中一点上光伏电池输出功率最大, 称为**最大功率点**。

二、常用的几种最大功率跟踪方法

- ◆ 恒压跟踪法
- ◆ 扰动观测法
- ◆ 导纳增量法
- ◆ 波动相关控制法
- ◆ β 方法
- ◆ 系统振荡法
- ◆ 功率匹配法
- ◆ 曲线拟合法
- ◆ 模糊控制法等

MPPT控制对象：
直流斩波电路



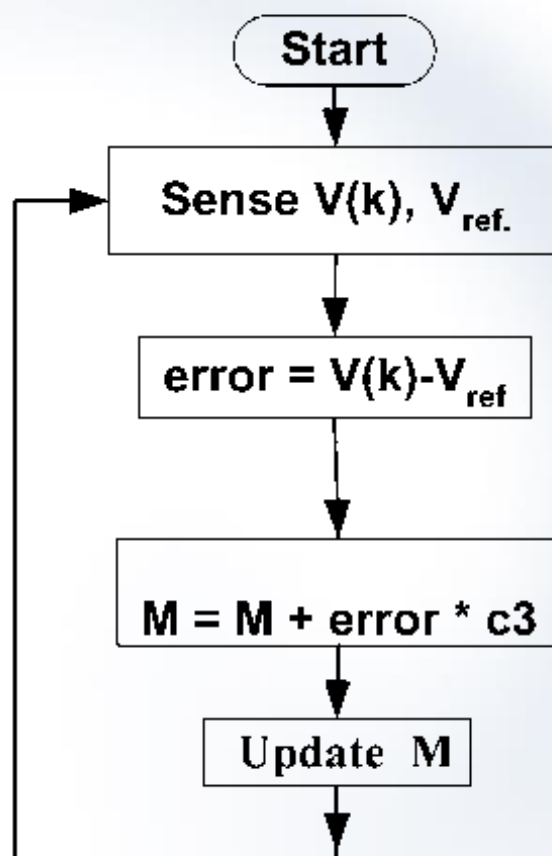
并网型光伏发电系统整体拓扑结构图

- ◆ 1.恒压跟踪法（Constant Voltage Tracking, CVT）
 - ◆ 当忽略温度影响时，光伏电池在不同光照强度下的最大功率点总是近似在某一恒定的电压值附近。一般情况下有： $U_{mp}=0.78\sim0.8U_{oc}$
 - 在光伏阵列的功率输出随温度变化的情况下，如果此时仍然采用CVT控制策略，将会使得阵列功率输出偏离最大功率输出点，产生的误差较大。

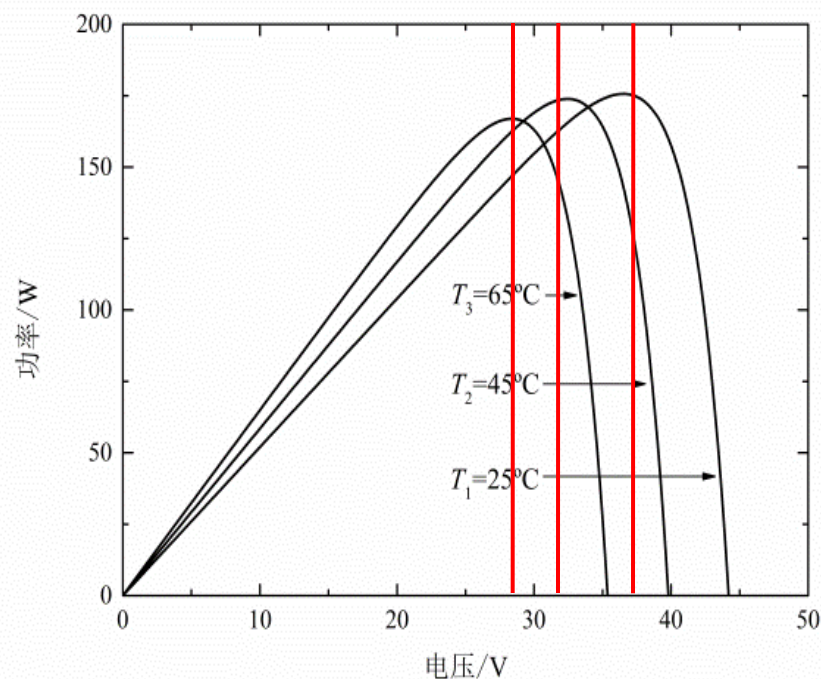
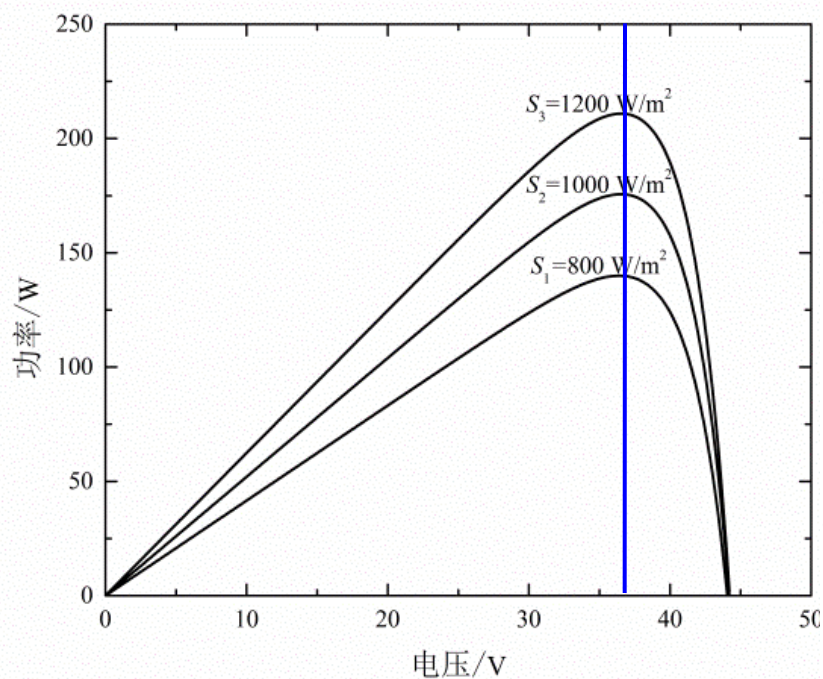
◆ 1.恒压跟踪法

◆ CVT流程图

◆ 调节直流斩波电路的调制比M:

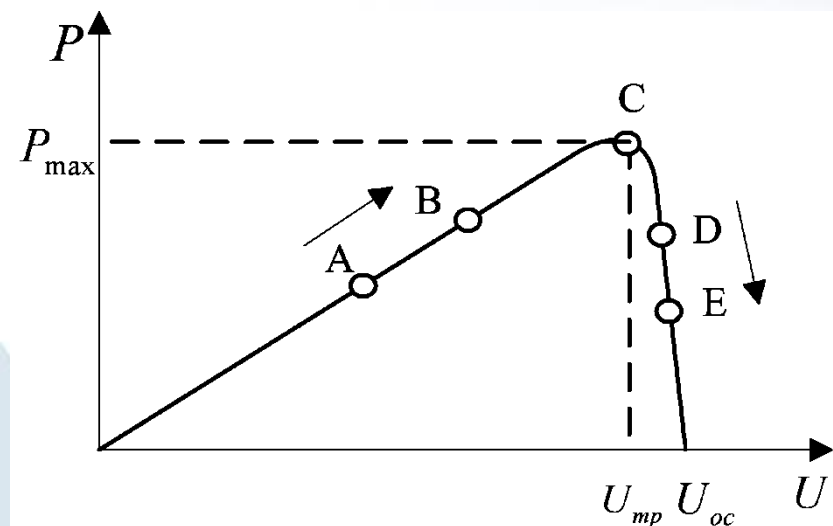


◆ 1.恒压跟踪法



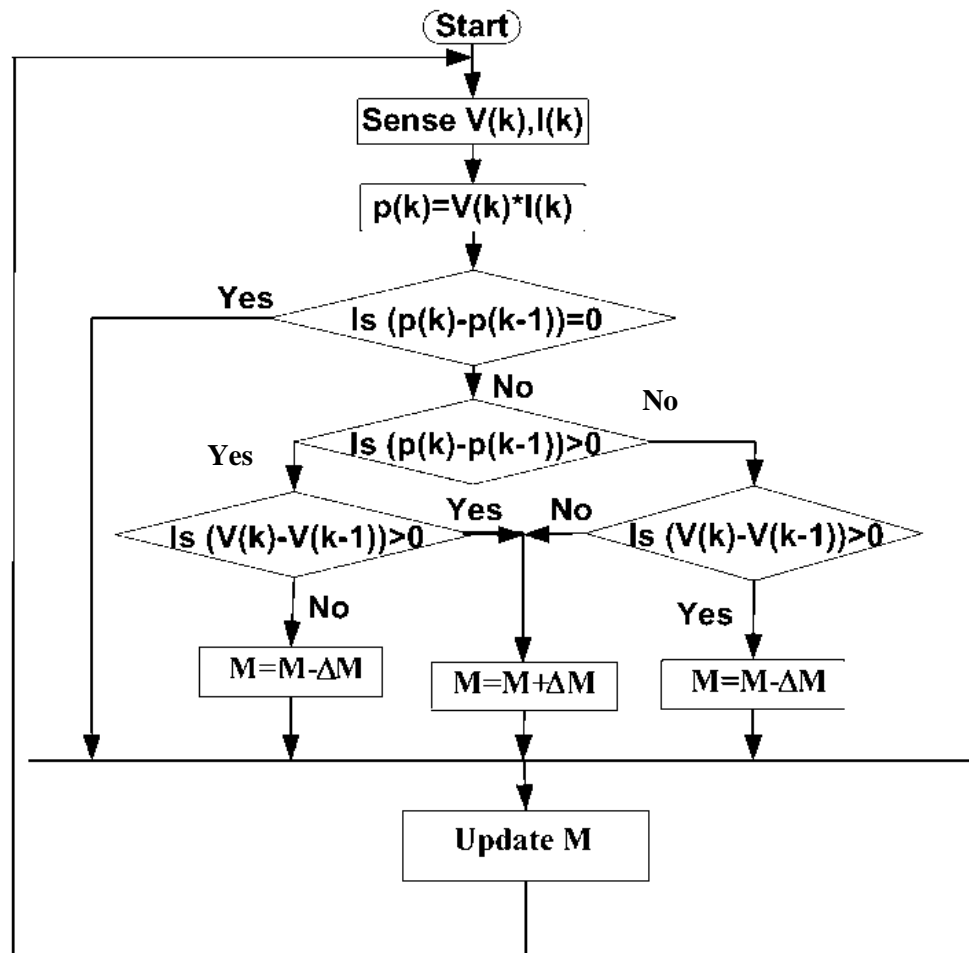
- ◆ 最简单，简化为稳压控制忽略了温度的影响，得到的控制目标并非真正意义上的最大有功功率点，将逐渐被取代；

- 2. 扰动观测法 (Perturbation and Observation method, P&O)

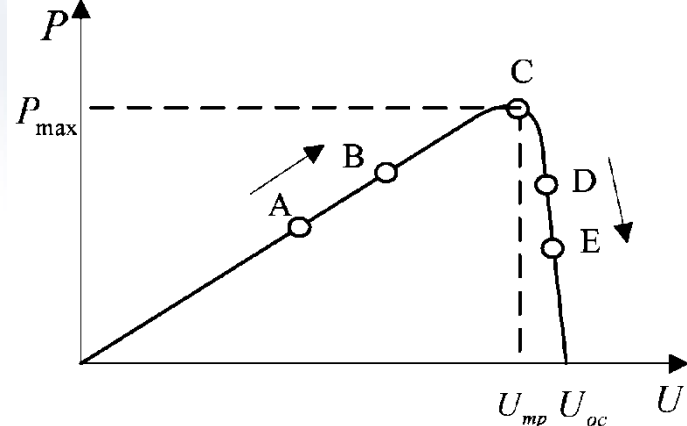


扰动观测法的原理图↑

扰动观测法的算法流程图→



扰动观测法步骤：



- ① 首先，假设系统工作点为A，此时的电压为 U_A ；
- ② 然后，对工作电压实施扰动，扰动方向为 $+\Delta U$ ，则新的工作点为 U_B ；
- ③ 比较A点和B点的输出功率可得 $P_B > P_A$ ，说明扰动方向正确；
- ④ 继续实施扰动到C点， $P_C > P_B$ ，扰动方向正确；
- ⑤ 继续扰动到D点；而 $P_D < P_C$ ，说明扰动方向错误，从而改变扰动方向，使工作点返回C点并在C点附近振荡。

扰动观测法优缺点：

- 控制算法简单；
- 易于硬件实现。
- 但是响应速度较慢，只适应于光照强度变化非常缓慢的场合；
- 而且稳态情况下，该算法会导致光伏阵列的实际工作点在最大功率点附近小幅振荡，因此会造成一定的功率损失；
- 而光照发生快速变化时，跟踪算法有可能失效，判断出错误的跟踪方向。

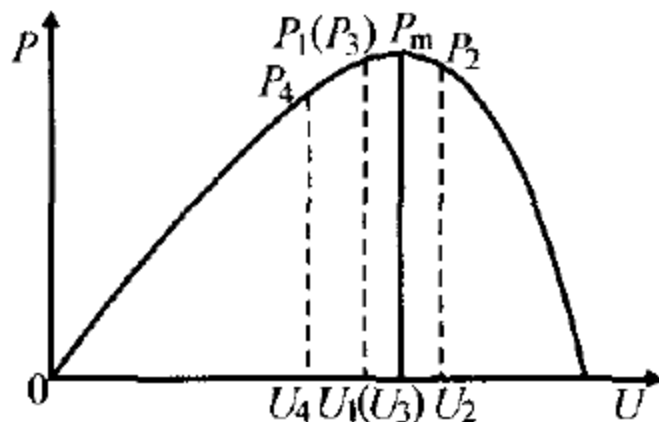
扰动观测法的问题

- 1) 扰动观测法的**振荡问题**
 - 当工作点到达最大功率点附近时，对于**定步长扰动方式**，会出现工作点跨过功率点的情形，但改变扰动方向后，**工作点电压与最大功率点电压的差值还是小于步长**，无法到达最大功率点。这种**由于扰动步长一定所导致的工作点在最大功率点两侧往复运动的情形**，即扰动观测法的**振荡现象**。

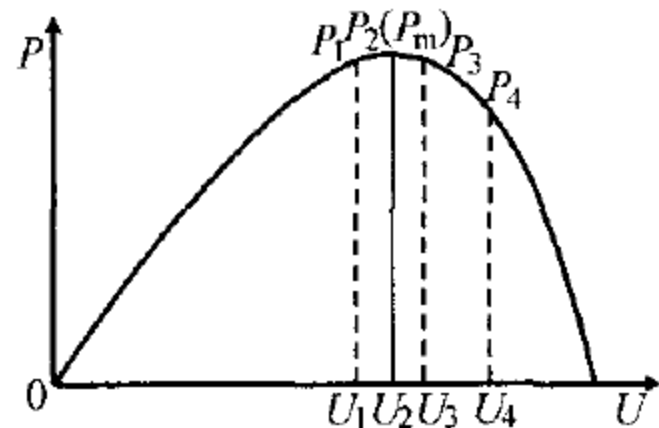
扰动观测法的问题

- 扰动观测法的振荡问题

- 起始工作点 $P_1 < P_m$
- 增加一个步长的电压扰动，工作于 $P_2 < P_1$
- 又减小一个步长的电压扰动，工作于 $P_3 (P_1) > P_2$
- 又继续减小一个步长，以此方向寻找大于 P_1 的点，结果为 $P_4 < P_1$ ，持续振荡。



(a) 第1种情况



(b) 第2种情况

扰动观测法的问题

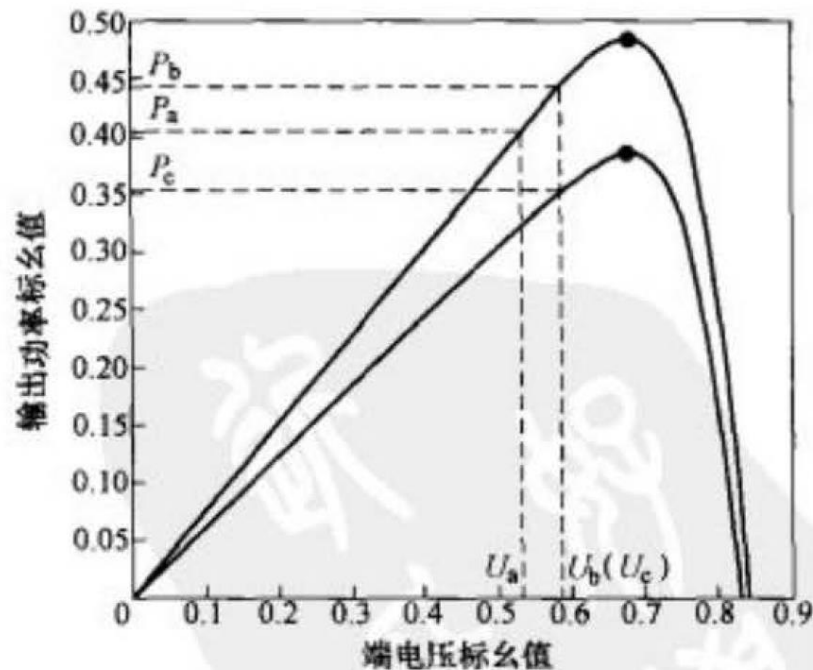
- 2) 扰动观测法的**误判问题**

- 当外界环境发生变化时，光伏电池的输出功率特性曲线也发生变化，会出现一段时间内工作点序列位于不同的P-U特性曲线上的情形。此时，对于不同的P-U特性曲线上的工作点继续使用**针对固定特性曲线的判据**，会出现**扰动方向和实际功率变化趋势相反的情形**，这就是扰动观测法的**误判现象**。

扰动观测法的问题

- 扰动观测法的**误判问题**

- 光伏系统工作在 U_a ， P_a 处；向右扰动电压至 U_b 处。
- 如果辐射强度不变，输出功率满足 $P_b > P_a$ ，方向正确。
- 如果辐射强度变小，对应 U_b 的功率为 P_c ， $P_c < P_a$ ，误判电压扰动方向，工作点移回 U_a 。



扰动观测法的改进

- 改进一：基于变步长的扰动观测法，在减小振荡的同时，使系统更快地跟踪最大功率点。
 - 在远离MPP的区域，采用较大的电压扰动步长以提高跟踪速度；
 - 在MPP附近区域，采用较小的电压扰动步长以保证跟踪精度。

扰动观测法的改进

- 改进二：基于功率预测的扰动观测法，可解决外部环境剧烈变化所产生的MPPT误判问题。
 - 太阳辐射强度变化较快时，根据单一特性曲线易发生误判。
 - 对多条P-U特性曲线进行预估计，预测同一辐射强度下P-U特性曲线上电压扰动前的工作点功率，测量同一辐射强度下P-U特性曲线上电压扰动后的工作点功率，据此实现MPPT，可有效克服误判。

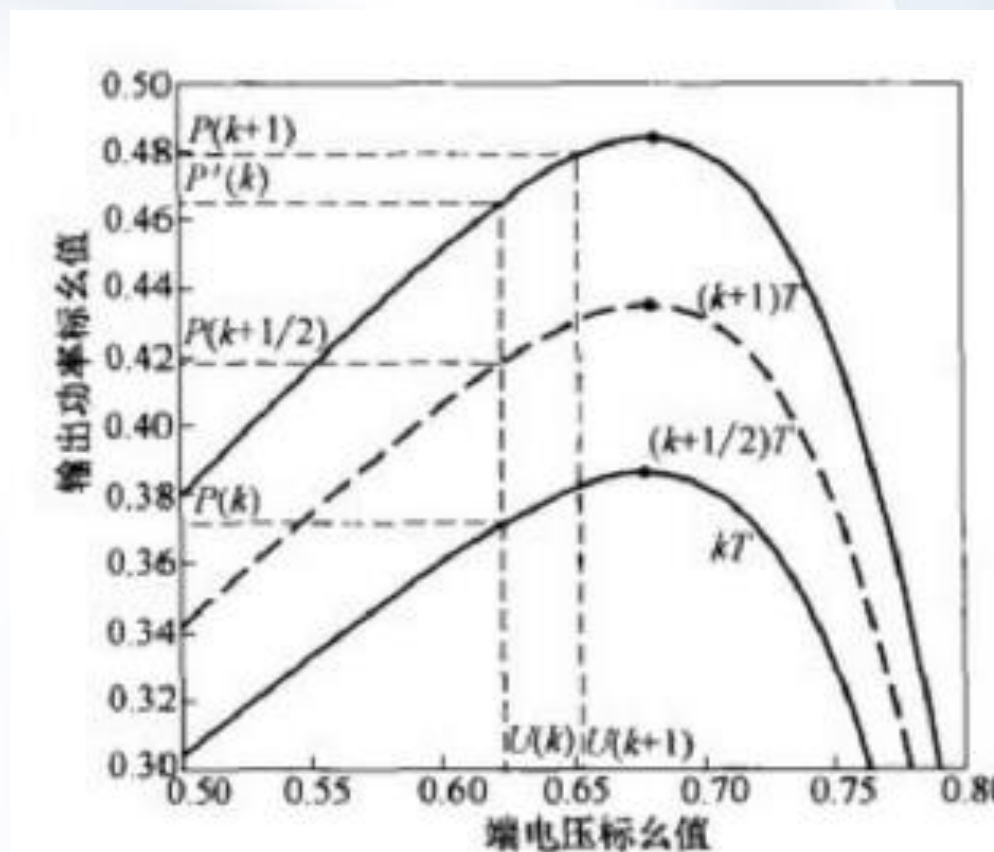
扰动观测法的改进

• 基于功率预测的扰动观测法

- ◆ 假定采样频率足够高，且一个采样周期内 S 的变化速率恒定(线性);
- ◆ kT 时刻, $(k+1/2)T$ 时刻均采样, 来预测 $(k+1)T$ 时刻的功率:

$$P'(k) = 2P(k+1/2) - P(k)$$

- ◆ 理论上, 可近似得到扰动后曲线上的工作点。



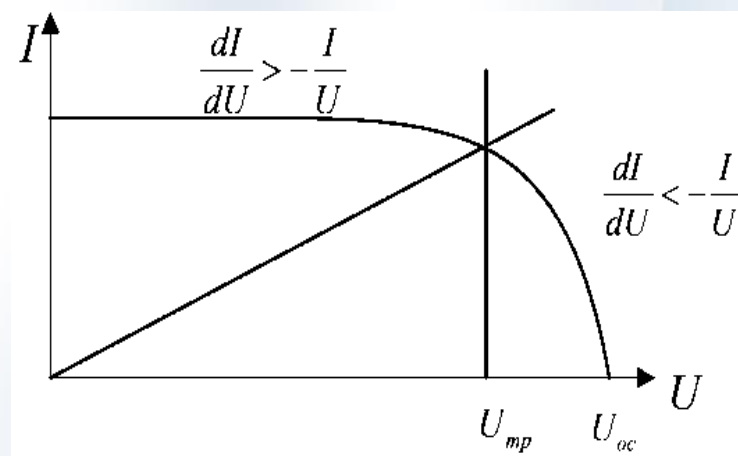
扰动观测法的改进

- 改进三：基于滞环比较的扰动观测法，在克服最大功率点跟踪过程中的振荡和误判方面均有较好的性能。
 - 采用具有非线性特性的滞环控制可抑制振荡。
当功率在所设的滞环内出现波动时，光伏电池的工作点电压保持不变；
 - 只有当功率波动量超出所设的滞环时，才按照一定的规律改变工作点电压。

- 3.导纳增量法（Incremental Conductance method, InCond）
 - 导纳增量法是比较光伏电池输出端的**动态电导值(dI/dU)**与**静态电导值的负数($-I/U$)**以判断光伏电池输出电压变化方向的一种控制算法。

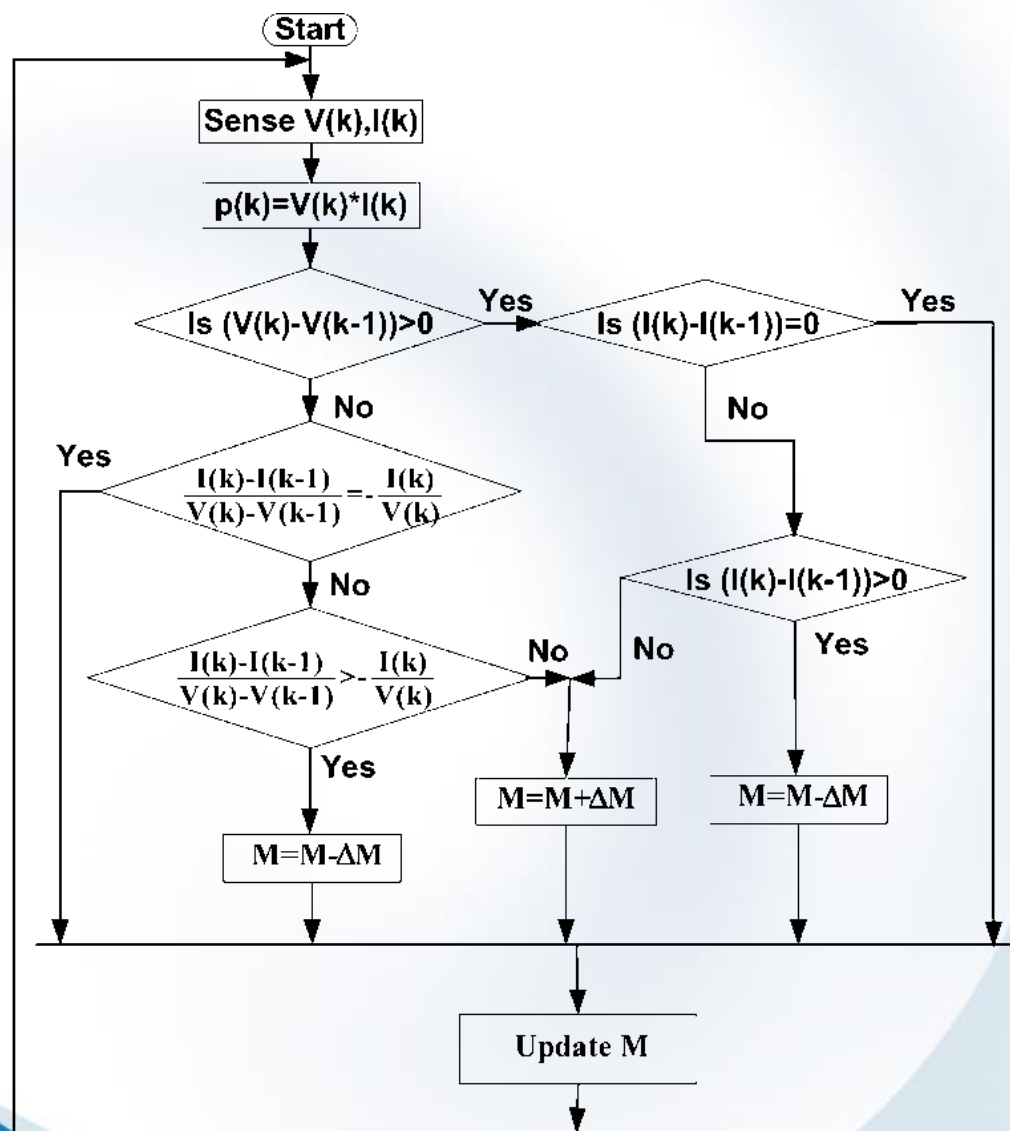
$$f(U) = dP / dU = I + U(dI / dU) = 0$$

$$dI / dU = -I / U$$

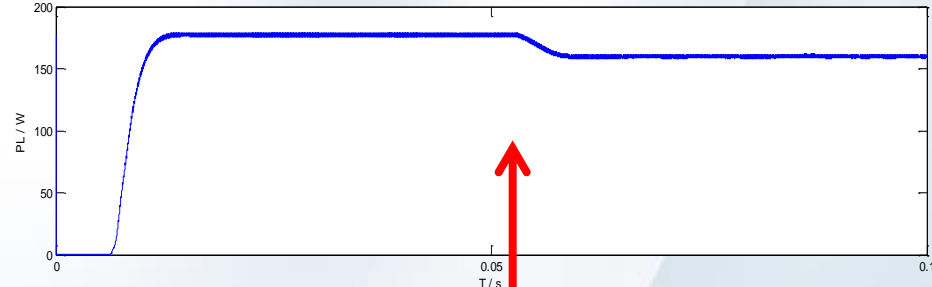
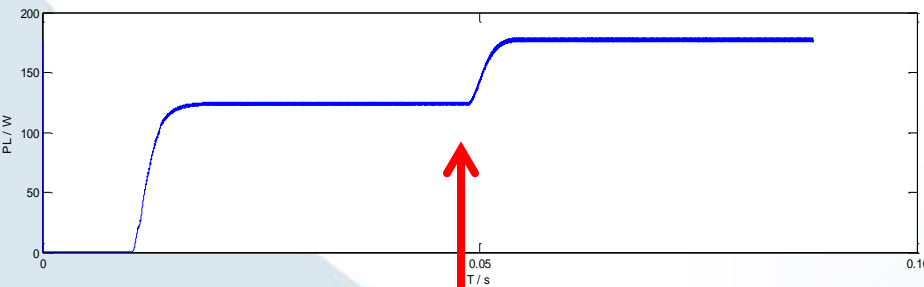
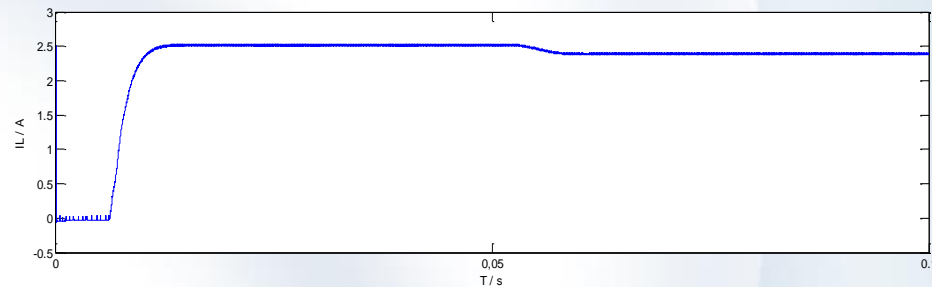
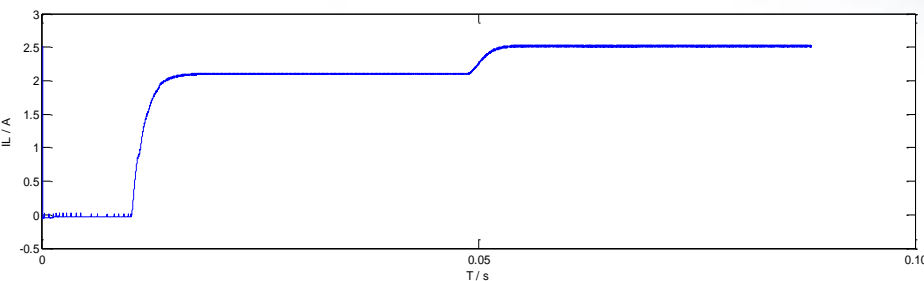
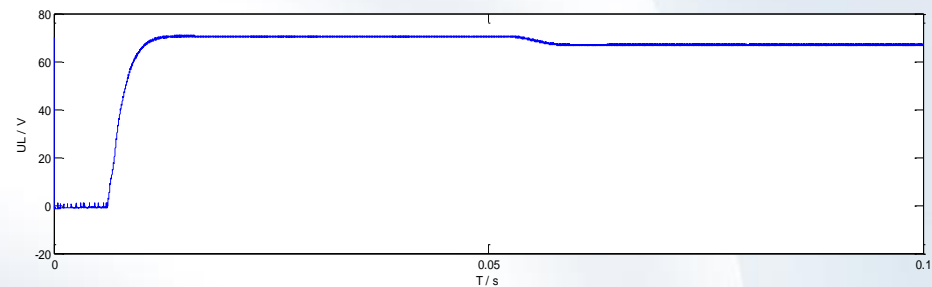
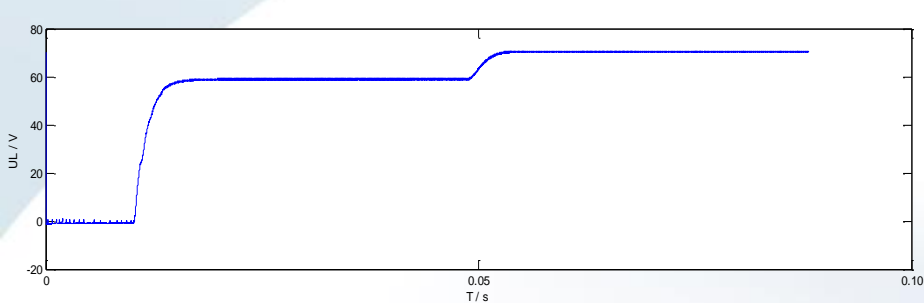


导纳增量法的原理图 32

导纳增量法算法流程图



■ 导纳增量法MPPT仿真结果



光照强度增强时负荷侧的输出波形

温度上升时负荷侧的输出波形

导纳增量法的优缺点：

- 导纳增量法控制精确；
- 响应速度较快；
- 适用于大气条件变化较快的场合；
- 通过修改逻辑判断式减小了振荡，但是在步长和阈值的选择上也存在一定的困难；
- 另外，该方法对硬件的要求较高，因而整个系统的硬件造价较高。

◆ 4. 波动相关控制法 (Ripple Correlation Control, RCC)

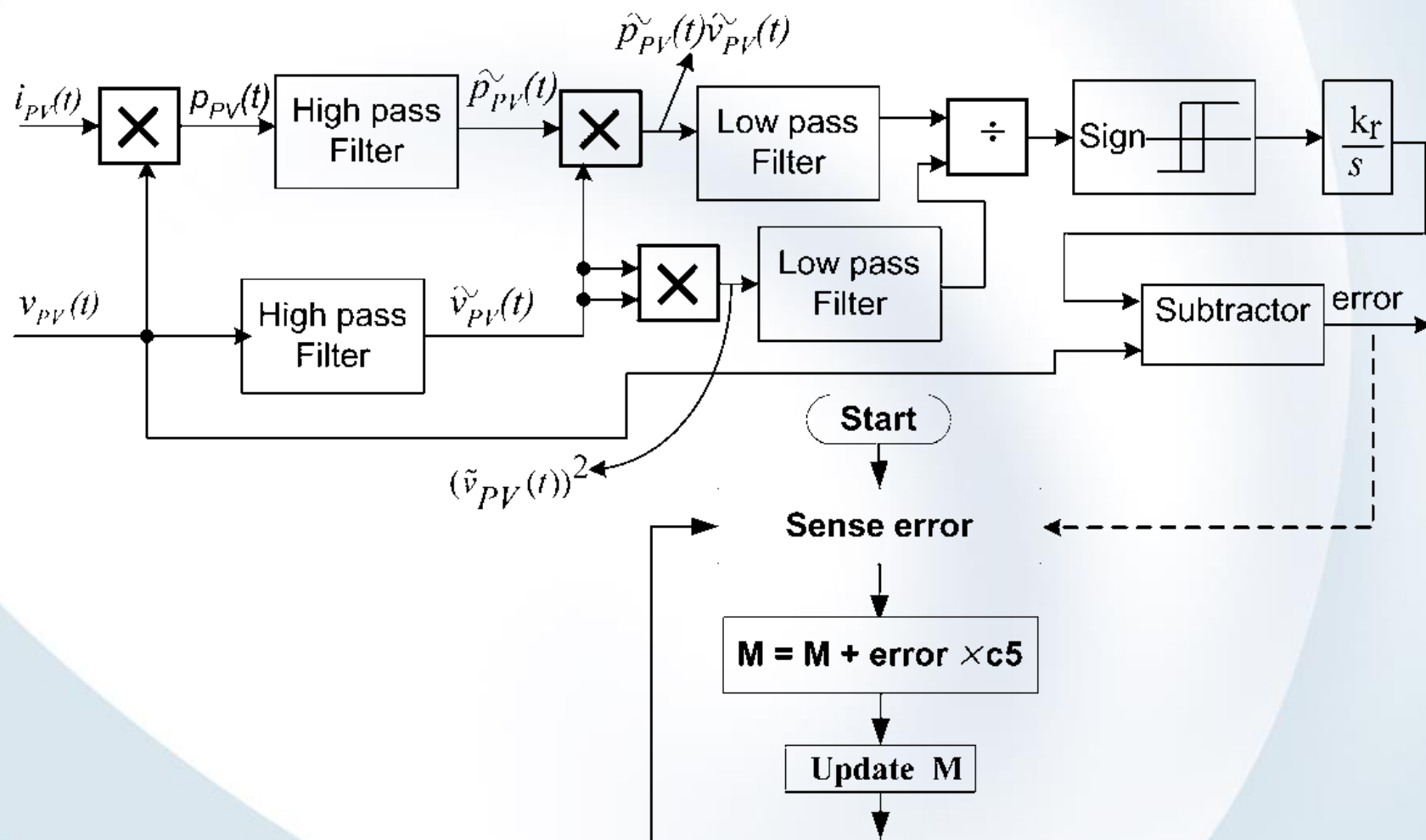
- 与扰动观测法类似；
 - 波动相关控制法利用的是光伏阵列输出端与变流器连接时，变流器开关的导通和关断对光伏阵列电压和电流的扰动。RCC法适用于各种拓扑结构的变流器，将功率对时间的倒数与电压或电流对时间的倒数相关联，这样可以使功率曲线的斜率为0从而达到最大功率点。
- RCC法的判据之一：

$$D = k \int \frac{dp}{dt} \frac{di_L}{dt} dt$$

波动相关控制法优缺点

- 波动相关控制法利用了光伏系统自然存在的扰动，不需要像传统的扰动观测法那样人工给电压和电流加扰动信号；
- 不需要预先获得光伏阵列的参数；
- 可使用一些简单并且廉价的电路来实现相关的功能。
- 但是，采用波动相关控制法需要变流器工作在连续导电模式。

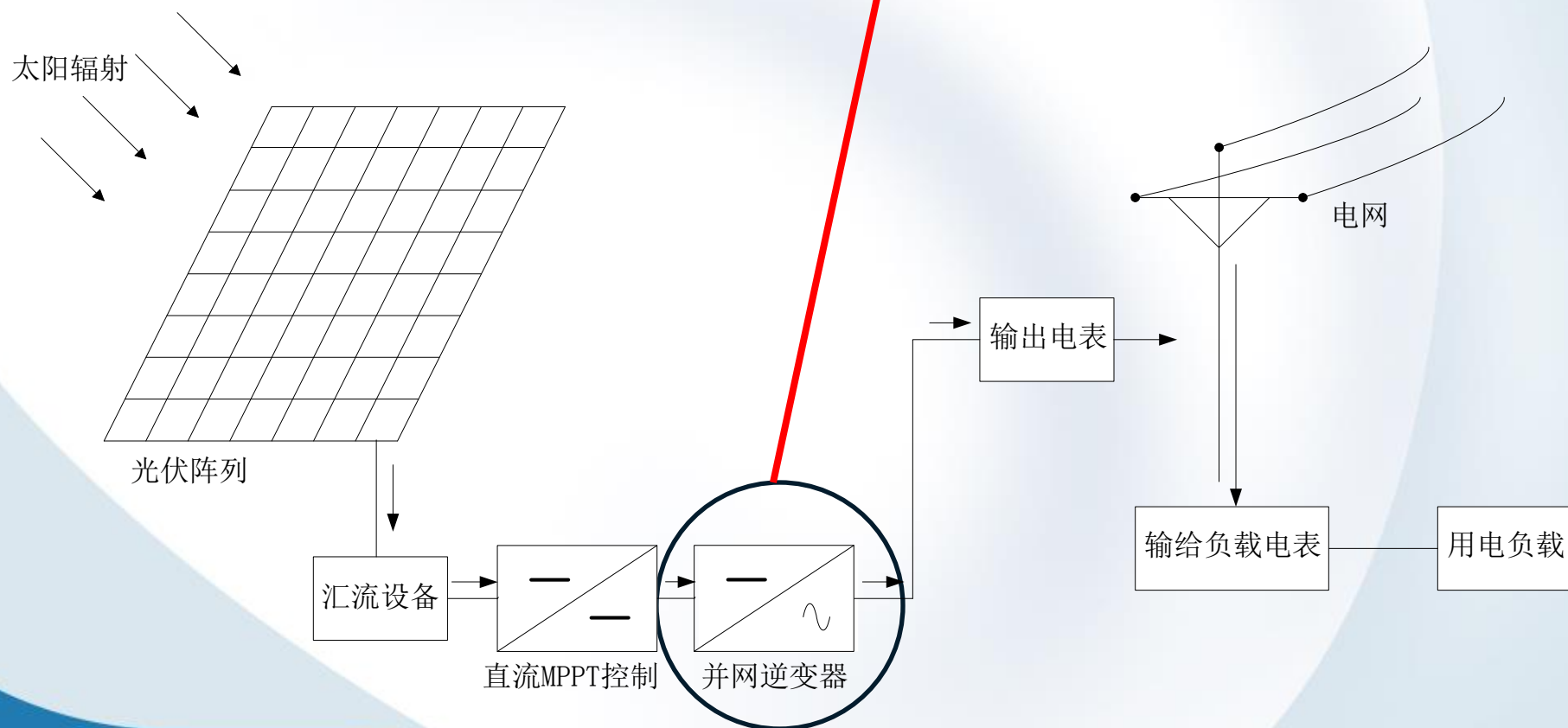
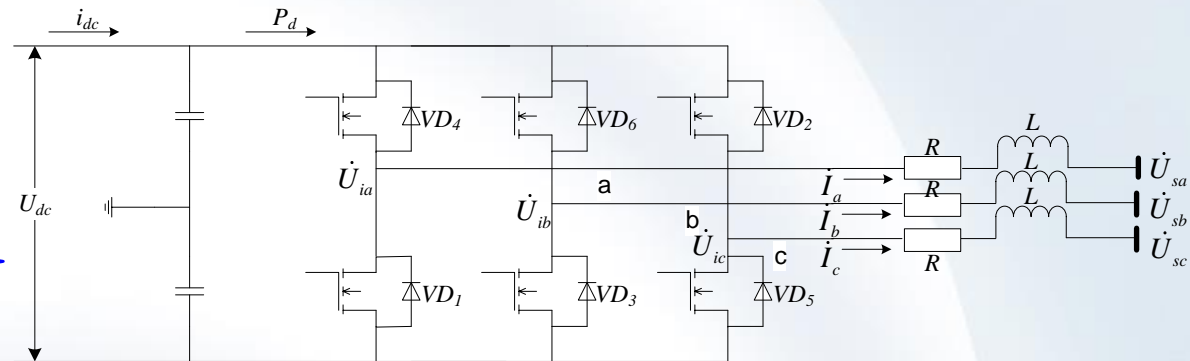
波动相关控制法流程图



光照强度突变时不同MPPT算法阶跃响应的性能比较

MPPT算法	时间常数 τ /s	实现难度	暂态跟踪速率	算法精度
扰动观测法	0.866	简单	慢	精确
导纳增量法	0.866	复杂	慢	精确
恒压跟踪法	0.574	简单	快	不太精确
变步长扰动观测法	0.645	复杂	快	最精确
β 方法	0.216	复杂	更快	精确
系统振荡法	0.233	简单	更快	不太精确
波动相关控制法	0.145	复杂	最快	不太精确

并网控制对象：
电压源逆变器



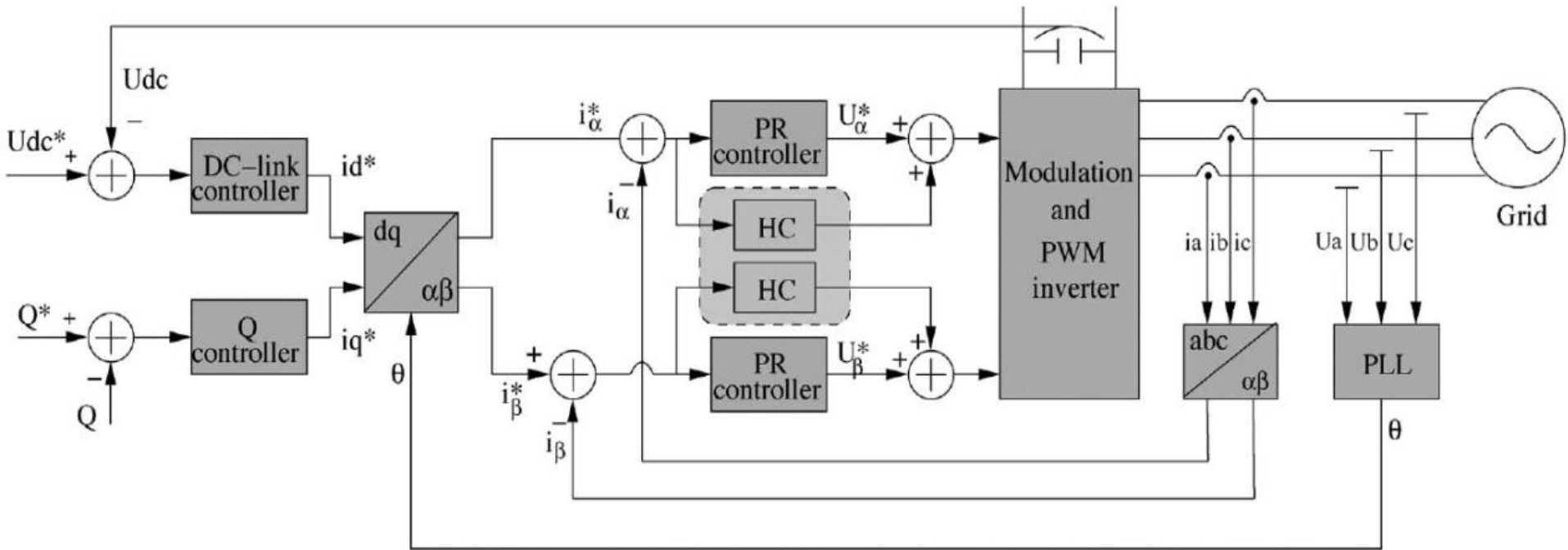
并网型光伏发电系统整体拓扑结构图

三、光伏并网逆变器控制策略

- 光伏逆变器控制策略
 - 基于电压定向的控制策略
 - 基于电压定向的矢量控制策略（电流闭环）
 - 基于电压定向的直接功率控制策略（功率闭环）
 - 基于虚拟磁链定向的控制策略
 - 基于虚拟磁链定向的矢量控制策略
 - 基于虚拟磁链定向的直接功率控制策略

三、光伏并网逆变器控制策略

- 1. 基于电流闭环的矢量控制策略
 - 将静止坐标系下的交流量交换到同步旋转坐标系下，电流的跟踪问题转换为调节问题，采用PI控制实现无差调节。
 - 在同步旋转坐标系下，可实现有功和无功功率的解耦控制。
 - 同步坐标系d轴方向的变量选取的不同，可分为电网电压定向的控制(VOC)和虚拟磁链定向的控制(VFOC)。



电网电压定向的光伏并网逆变器矢量控制系统示意图

三、光伏并网逆变器控制策略

• 2.直接功率控制(DPC)

- 将并网逆变器输出的瞬时有功功率和无功功率作为被测控量进行闭环控制。
- 基本的控制思路:
 - 检测并网逆变器输出的瞬时有功、无功功率
 - 检测值与给定值送入滞环比较器进行比较
 - 确定电网侧电压矢量所在的扇区
 - 根据滞环比较器的输出及电压矢量的位置，确定换流器阀组的状态

三、光伏并网逆变器控制策略

- 四种控制策略及框图见参考书目4，第五章的5.2、5.3节：
 - 张兴，曹仁贤，《太阳能光伏并网发电及其逆变控制》，北京：机械工业出版社，2010.

四、孤岛检测

- 分布式发电**孤岛效应**的概念：
 - 当电网由于电气故障、误操作或自然因素等原因**中断供电时**，分布式发电系统**未能检测出停电状态**而将自身**切离市电网络**，仍然向周围的负载提供电能，从而形成一个电力公司无法控制的**自给供电网络**。

四、孤岛检测

- 孤岛效应的危害:

- ① 孤岛系统中的电压和频率将会发生较大的波动，从而对电网设备和用户设备造成损坏。
- ② 孤岛系统重新接入电网时，重合闸时系统中的分布式发电装置可能与电网不同步而使断路器受到损坏，并且可能产生很高的冲击电流，从而损害孤岛系统中的分布式发电装置，甚至导致电网重新跳闸。
- ③ 可能导致故障不能清除，从而导致电网设备的损害，并且干扰电网正常供电系统的自动或手动恢复。
- ④ 使得一些被认为已经与所有电源断开的线路带电，这会给相关人员带来电击的危险。

四、孤岛检测

- 孤岛效应发生：
 - 电网断电时，如果逆变器输出功率与负载功率之间存在较大差异，则**系统电压、频率会发生较大变化**，很容易检测到孤岛效应；
 - 相反，如果输出功率和负载功率相匹配，则断路器跳闸后，电压、频率变化不大，孤岛效应将不易检测。
- 孤岛检测：
 - 逆变器输出电压是光伏输出功率和负载需求功率之比的函数。
 - 孤岛系统的频率是光伏输出有功和负载谐振频率的函数。
 - **$\Delta P > \pm 20\%$** 时，利用**过/欠频率检测**可检出孤岛效应；
 - **$\Delta Q > \pm 5\%$** 时，利用**过/欠电压检测**可检出孤岛效应。

四、孤岛检测

- 反孤岛策略（Anti-islanding）

- 反孤岛的被动式方法：

- 当并网逆变器检测出逆交器输出的电网公共连接点PCC处的电压/频率/相位差/电压谐波等超出正常范围时，通过控制命令停止逆交器并网运行。

- 主动式反孤岛策略：

- 频移法：主要包括主动频移(AFD)、Sandia频移和滑模频移等。
 - 功率扰动法：有功功率扰动法、无功功率扰动法。
 - 阻抗测量法：被动测量技术和主动测量技术。

第三章 小结

- 光生伏特效应原理
- 太阳能电池分类，光伏发电系统分类、特点
- 光伏电池等值电路、数学模型和输出外特性
 - 重要技术参数： U_{oc} 、 I_{sc} 、 U_m 、 I_m 、 FF
- 光照强度和温度变化时光伏电池的动态修正模型
- **MPPT**概念及常用控制方法
 - 扰动观测法、导纳增量法原理
- 光伏逆变器的控制策略
- 孤岛效应概念、孤岛检测、反孤岛策略

