



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 7

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第四章 新能源电力系统稳态运行分析与计算

4.1 传统电力系统的潮流计算

熟练掌握电力系统潮流计算模型。

4.2 风力发电和光伏发电并网的潮流计算

熟练掌握风力发电接入系统的潮流计算模型。

熟练掌握光伏发电接入系统的潮流计算模型。

4.3 含新能源电力系统的随机潮流计算

了解风力发电接入系统的随机潮流模型。

了解光伏发电接入系统的随机潮流模型。

4.4 新能源并网后电力系统的频率控制

重点掌握新能源接入后系统一次、二次调频方法。

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

掌握新能源对系统电压水平的影响及无功补偿控制。

- 思考题：

- 什么是电力系统潮流计算？

- 根据给定的运行条件和网架结构确定整个系统的运行状态，如各母线上的电压（幅值及相角）、网络中的功率分布以及功率损耗等。



• 电力系统潮流计算的意义是什么？

(1) 三大计算中，电力系统潮流计算的结果是电力系统稳定计算和故障分析（短路计算）的**基础**。

(2) 在系统**规划**阶段，通过潮流计算，合理规划电源容量及接入点，合理规划网架，选择无功补偿方案，满足规划水平的大、小方式下潮流交换控制、调峰、调相、调压的要求。

• 电力系统潮流计算的意义是什么？

- （3）编制年**运行**方式时，在预计负荷增长及新设备投运基础上，选择典型方式进行潮流计算，发现电网中薄弱环节，供调度员日常调度控制参考，并对规划、基建部门提出改进网架结构，加快基建进度的建议。
- （4）正常**检修**及特殊运行方式下的潮流计算，用于日运行方式的编制，指导发电厂开机方式，有功、无功调整方案及负荷调整方案，满足线路、变压器热稳定要求及电压质量要求。
- （5）预想事故、设备退出运行对**静态安全**的影响分析及作出预想的运行方式调整方案。

传统电力系统的稳态潮流计算

- 元件模型

- 线路（电阻、电抗、电导、电纳、 Π 型等值电路）
- 变压器（漏阻抗、激磁阻抗、 T 型、 Γ 型、 Π 型等值电路）

- 网络方程

- 网络方程、节点导纳矩阵、节点类型

- 潮流方程

- 功率平衡方程、修正方程式、约束条件
- 雅克比矩阵、牛顿-拉夫逊法

牛拉法稳态潮流计算的流程

1、读入系统原始数据；

2、形成网络节点导纳矩阵 Y ；

3、置各节点电压初值 U_0 ，至迭代次数 $k=1$ ；

4、计算各节点功率最大失配量 ΔP_i 、 ΔQ_i ，如不满足收敛精度，继续Step5；如满足，跳往Step8；

5、形成潮流方程的雅克比矩阵 J ；

6、求解修正方程式；

7、修正节点电压向量 U_k ， $k=k+1$ ，返回Step4；

8、计算平衡节点的有功无功功率、PV节点无功功率、各线路和变压器的传输功率、网络损耗，输出收敛后结果。



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 8

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第四章 新能源电力系统稳态运行分析与计算

4.1 传统电力系统的潮流计算

4.2 风力发电和光伏发电并网的潮流计算

熟练掌握风力发电接入系统的潮流计算模型。

熟练掌握光伏发电接入系统的潮流计算模型。

4.3 含新能源电力系统的随机潮流计算

了解风力发电接入系统的随机潮流模型。

了解光伏发电接入系统的随机潮流模型。

4.4 新能源并网后电力系统的频率控制

重点掌握新能源接入后系统的一次、二次调频方法。

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

掌握新能源对系统电压水平的影响及无功补偿控制。

4.2.1 风力发电并网的潮流计算

一、风力发电的数学模型及等值电路回顾

1. 风力机数学模型回顾

- 风力机机械功率的表达式：

$$P_m = \begin{cases} 0 & v_w < v_{in} \\ \frac{1}{2} \rho S v_w^3 C_p(\lambda, \theta) & v_{in} \leq v_w < v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v_w \end{cases}$$

ρ ——空气密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

v_w ——风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

$S=\pi R_{ae}^2$ ——风力机叶片的扫风面积/ m^2 ;

R_{ae} ——风轮机半径/m;

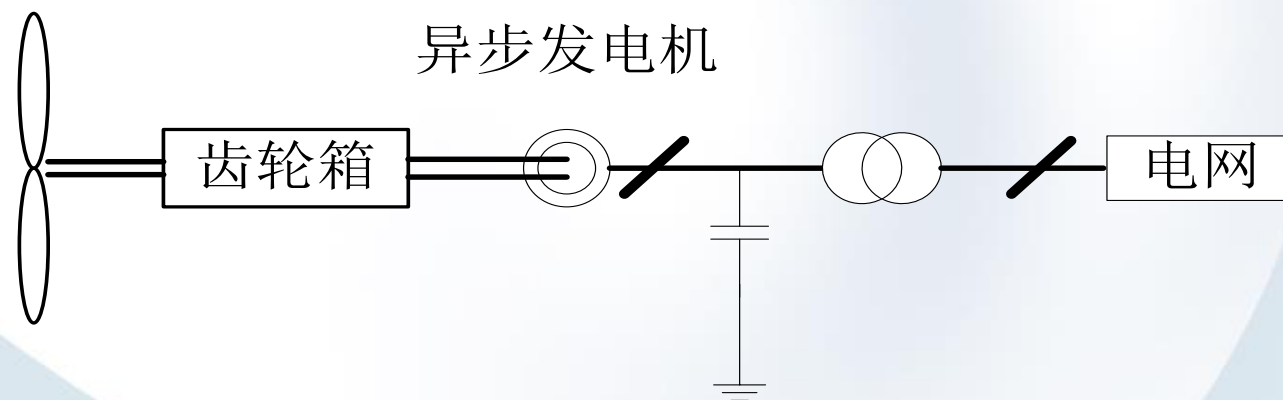
v_{in} 、 v_{out} ——风力机的切入风速和切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

C_p ——风力机的风能利用系数。

一、风力发电的数学模型及等值电路

1. 风力机数学模型回顾

- 风力机机械功率的表达式给出了风能和机械能的转换关系，即乘以风能利用系数 C_P 。
- 异步风力发电机组主要由风力机、异步发电机组成，风力机和发电机之间通过多级齿轮箱等机械装置连接（机械传动、摩擦、发热等均会产生一定的能量损耗）。



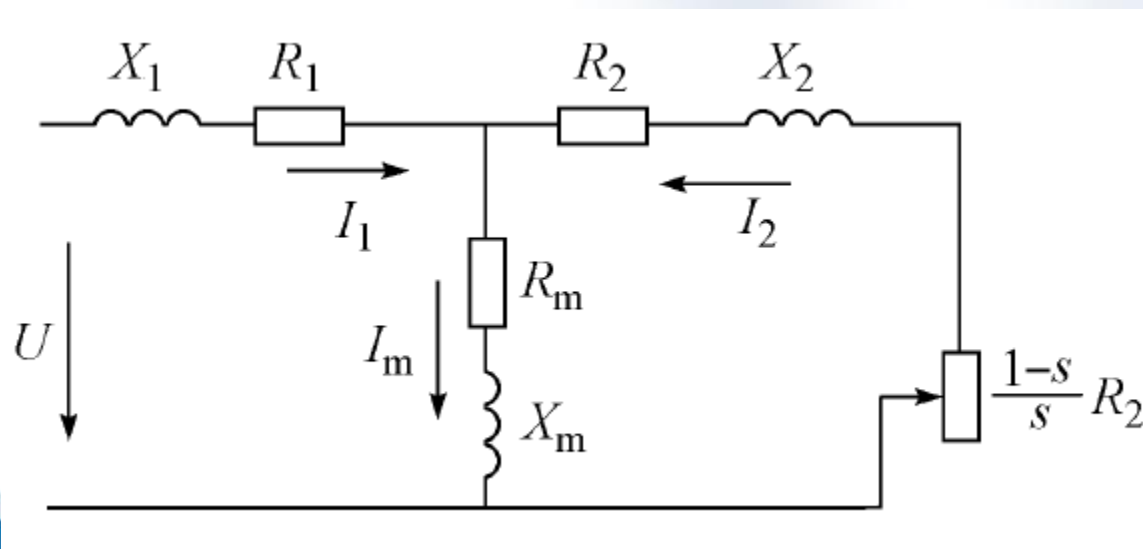
风力发电机组结构原理图

1. 风力机数学模型回顾

- 风力发电系统中，机械能和电能的转换关系？
 - 取决于风力发电系统各部分的转换效率：
 - 风轮叶片： **15~50%** (C_p)
 - 发电机： **52~95%** （永磁同步风力发电机比异步感应风机高）
 - 控制逆变器： **25~98%** （目前，欧洲逆变器效率较高，可达97.2%）

2. 异步发电机组的稳态等值电路回顾

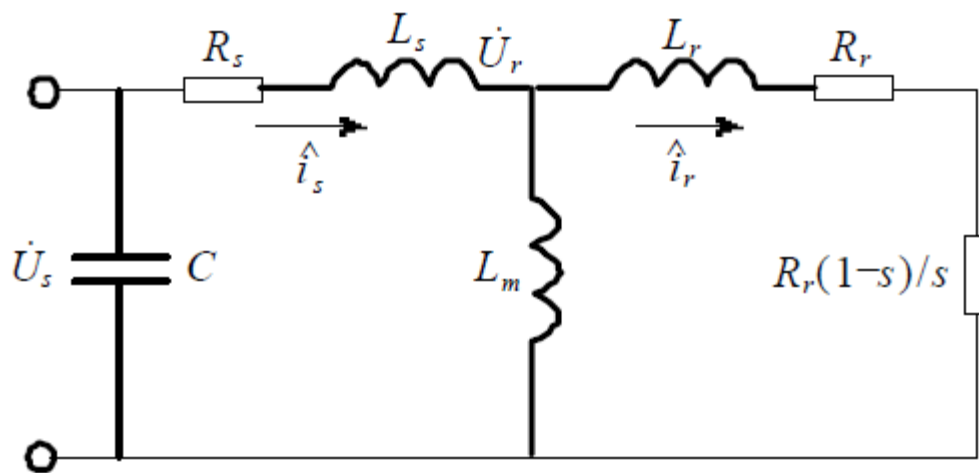
- 在风力发电机组风轮的额定转速固定时，风能利用率主要取决于风速，即风力发电机组的有功功率主要由风速决定。
- 自然风吹动风轮机叶片，将风能转化为机械能，由此获得的机械功率扣除机械损耗后即为传递到异步发电机转子上的机械功率 P_m ，在等效电路中对应为可变电阻 $r_2(1-s)/s$ ，（ $s < 0$ 为转差，亦称滑差）。
- 异步发电机组的稳态简化等值电路：



异步风力发电机组稳态简化等值电路

2.异步发电机组的稳态等值电路回顾

- 异步发电机主要工作在**亚同步**情况，定子向电网送电；此时吸收**风力机**提供的机械能，发出有功功率；
- 从**电网或电容器**吸收无功功率，提供励磁电流。



基于电容器无功建立磁场的异步风机稳态等值电路

二、风力发电的稳态潮流模型

- 不同于传统的火电、水电机组，风电的出力是随机性的，而且**在每次迭代计算中还必须考虑每步的发电功率，是否超出当前风能的限值。**
- 在传统的电网潮流计算中，节点的类型一般有PQ节点、PV节点及平衡节点3种。然而**风力发电机组能否描述成传统的节点类型，需进行必要分析。**
- 异步风力发电——目前使用较多的是简单PQ模型、改进PQ模型和RX模型的风电稳态潮流计算模型。

- 异步风电机组潮流计算模型

- 1. 简单PQ模型

稳态情况下，风力机从风能中吸收的机械功率 P_m 不能完全转换为电功率 P ，即动能转换为电能的发电机效率为 η ，其也由风速决定：

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad \longrightarrow \quad P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \eta$$

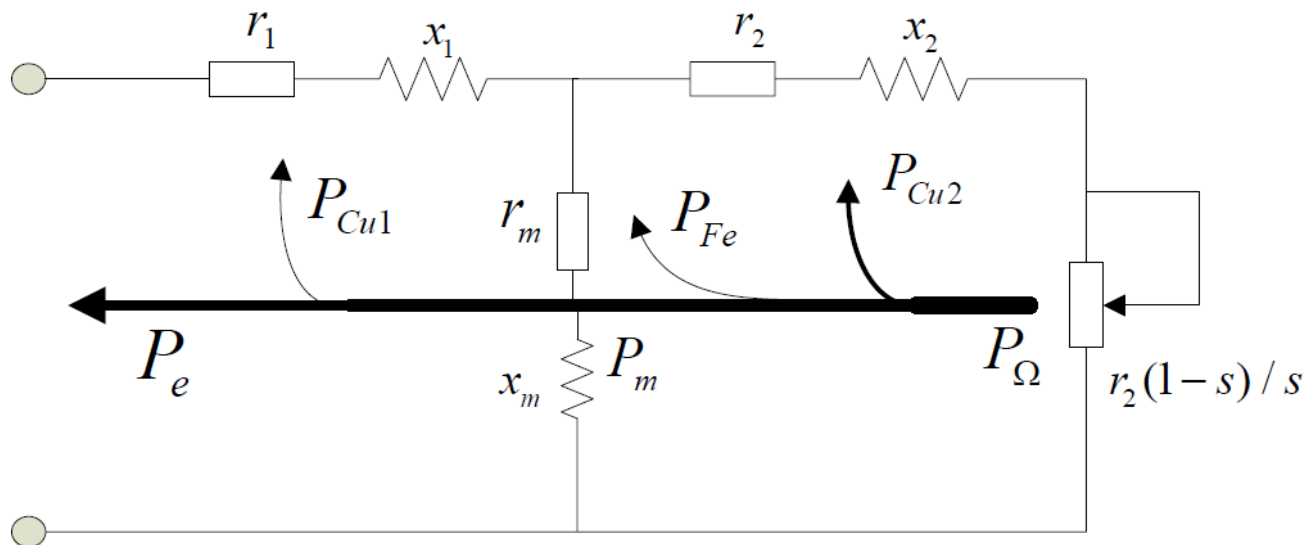
将风电机组等值成PQ节点，并认为风电机组中电容器自动分组投切，可保持风电场的功率因数恒定不变，即：

$$Q = P \tan \varphi$$

– 2. 改进PQ模型

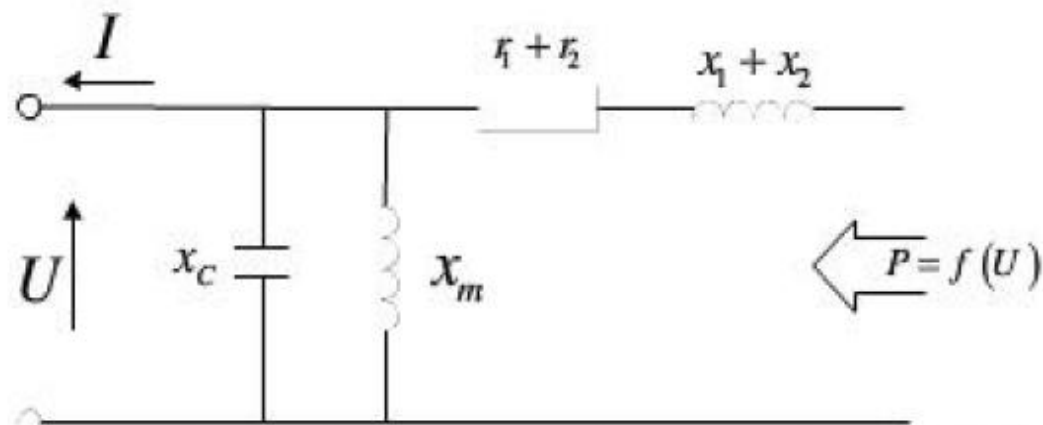
– 改进PQ模型是将风电场无功消耗表示为其有功功率和机端电压的函数。

- 机械功率 P_{Ω} ，在等效电路中对应可变电阻 $r_2(1-s)/s$ 上的功率；
- P_{Ω} 中扣除转子铜耗 P_{Cu2} 和铁心损耗 P_{Fe} ，得到输入定子绕阻的电磁功率 P_M ；
- 再扣除定子铜耗 P_{Cu1} 即得到注入电网的电功率 P_e 。



– 2. 改进PQ模型

- 无功功率为有功功率和机端电压的函数；
- 通常不计及异步电动机转差的影响；
- 如考虑机端并联电容器补偿，并忽略铁耗后将激磁电抗移至电路首端，异步发电机 Γ 型简化等值电路如下所示：



不计及转差的异步发电机简化等值电路

- 则无功功率表达为有功功率和机端电压的函数：

$$Q_C = U^2 \frac{x_c - x_m}{x_c x_m} + x_k \frac{U^2 + 2r_k P_C}{2(r_k^2 + x_k^2)} - x_k \frac{\sqrt{(U^2 + 2r_k P_C)^2 - 4P_C^2(r_k^2 + x_k^2)}}{2(r_k^2 + x_k^2)}$$

- 忽略绕组的铜耗，有：

$$Q_C = U^2 \frac{x_c - x_m}{x_c x_m} + \frac{U^2}{2x_k} - \frac{\sqrt{U^4 - 4P_C^2 x_k^2}}{2x_k}$$

- 其中考虑了并联电容器组无功补偿容量部分，如果没有并联补偿，容性电纳为0，即 x_c 为无穷大，异步风力发电机吸收的无功功率需略去： $-U^2/x_c$ 。

$$Q_C = \frac{U^2}{x_m} + \frac{U^2}{2x_k} - \frac{\sqrt{U^4 - 4P_C^2 x_k^2}}{2x_k}$$

• 3.RX模型

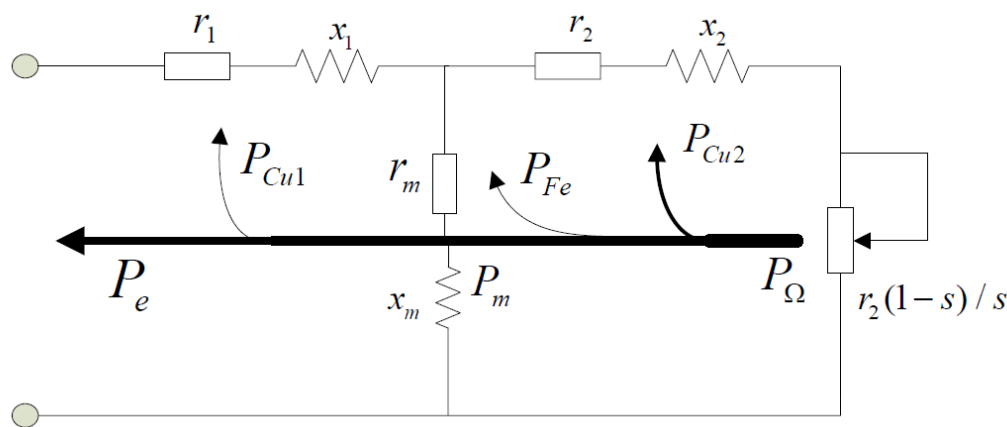
– **RX模型是将风电场处理为一个阻抗接在母线上。**

- 由异步发电机原理可知，其等值阻抗为：

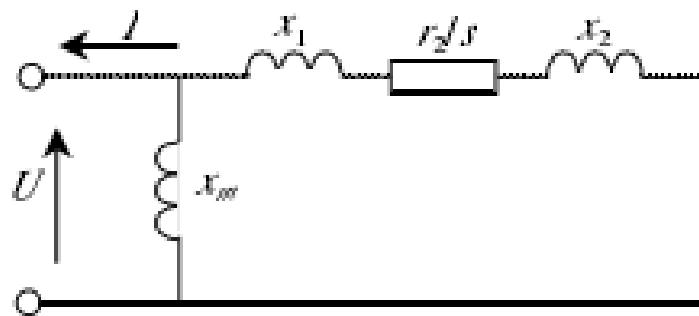
$$Z = r_1 + jx_1 + jx_m // (\frac{r_2}{s} + jx_2)$$

- 异步风力发电机发出的有功功率 P_c 与转子电流 I_2 、异步发电机转差 s 之间的关系为：

$$P_C = -I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$$



◆ 异步发电机RX模型的有功无功功率计算公式：



由简化电路可得异步发电机的有功功率：
$$P_C = \frac{-U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2}$$

式中 $x_k = x_1 + x_2$ 。经计算得到：

$$s = \frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_C^2 x_k^2 r_2^2}}{2P_C x_k^2}$$

同理，异步发电机的无功功率：
$$Q_C = \frac{-U^2 [(r_2 / s)^2 + x_k^2 + x_k x_m]}{[(r_2 / s)^2 + x_k^2] x_m}$$

因此，异步发电机功率因数角 φ 与转差 s 关系为：

$$\varphi = \arctan \frac{r_2^2 + x_k (x_k + x_m) s^2}{r_2 x_m s}$$

由此也可推导得到，异步发电机的无功功率 Q_c 与有功功率 P_c 之间的关系为：

$$Q_c = \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_c$$

同理，如果考虑了机端并联电容器组无功补偿的情况下，异步发电机从并网点吸收的无功功率中应该增加负的无功补偿部分： $-U^2/x_c$ 。

- RX模型的特点：
 - 风速变化，引起风轮机转速、尖速比、风能利用系数 C_p 与风力机机械功率也随之变化；
 - 转差 s 变化，异步发电机发出的有功功率 P_c 随之变化；
 - 根据功率守恒原理，这两个功率应相等。迭代过程中当这两个功率不等时，转差 s 需要修正，最终使风力机机械功率与发电机电磁功率相平衡，需增补一个功率平衡方程。

请思考：针对风力发电的简单PQ模型，如何进行含风电的电力系统潮流计算？

- 节点导纳矩阵 [填空1] (是/否)需要改变？
- 节点注入功率 [填空2] (是/否)需要改变？
- 修正方程式 [填空3] (是/否)需要改变？
- 雅克比矩阵 [填空4] (是/否)需要改变？
- 电压修正 [填空5] (是/否)需要改变？

含风电的电力系统潮流计算

- 改进PQ模型

- 在改进PQ模型下的潮流计算中，形成雅克比矩阵：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} U \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U / U \end{bmatrix}$$

- 由于风电输出有功功率、无功功率是电压的函数，因此需要对雅克比矩阵中相关项进行修改，即对风电并网节点增加下面的项：

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial U}, \quad \frac{\partial \Delta Q_c}{\partial U}$$

含风电的电力系统潮流计算

- RX模型

- 在潮流计算中综合考虑异步机有功功率特性和无功功率-电压特性，可以得到以下修正方程：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{em} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} U & \frac{\partial \Delta P}{\partial s} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} U & \frac{\partial \Delta Q}{\partial s} \\ \frac{\partial P_{em}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{em}}{\partial U} U & \frac{\partial P_{em}}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U / U \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad \Delta P_{em} = P_m - P_C = 0$$

- 运用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算时，只需要修改雅克比矩阵中的对应元素即可，其他元素的表达式无需变化。

— 对应风电机组节点*i*的功率为：

$$\begin{cases} \Delta P = \sum_{k=1}^M P_{ik} - U_i \sum_{n \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q = \sum_{k=1}^M Q_{ik} - U_i \sum_{n \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

其中： P_{ik} 由风电场风速*v*决定， Q_{ik} 是机端电压的函数。

— 根据风力发电机组等值电路推导雅可比矩阵中偏导数的表达式：

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{em}}{\partial s} = \frac{(1-3s+s^2)r_2^2 - s^2 x_k^2}{(r_2^2 + s^2 x_k^2)^2} U^2 r_2 \\ \frac{\partial P_{em}}{\partial U} = 2U r_2 \frac{s(1-s)}{r_2^2 + s^2 x_k^2} \\ \frac{\partial P_{em}}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$$

三种风力发电潮流计算模型比较

模型	简单PQ模型	改进PQ模型	RX模型
模型特点	风电机组等值成PQ节点，并认为风电机组中电容器自动分组投切，可使风电场的功率因数恒定不变。	未考虑异步发电机转差的影响；等值模型的有功功率、无功功率与机端电压有关。这样，将异步风力发电机等值为变PQ节点。	考虑了异步发电机本身的特性，即考虑了转差的影响；但需考虑异步发电机有功、无功与异步发电机的机端电压、转差的关系，同时求解机端电压和转差。
复杂度	模型简单	模型复杂，计算量大	模型复杂，计算量大
精确度	偏差略大	较准确	较准确
适用场合	风电场出力较小	均可	均可



4.2.2 光伏发电并网的潮流计算

- 光伏系统的前两部分：
 - 光伏**电池模型**（第三章）
 - 直流**MPPT模型**（第三章）
- 光伏**逆变器并网模型**（本章）

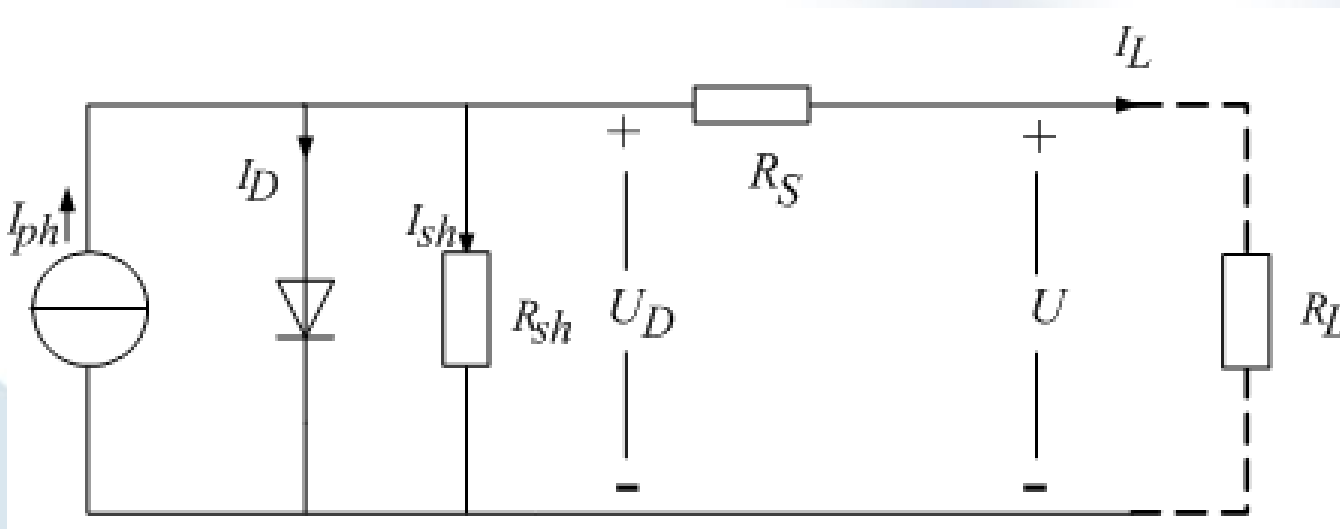
光伏系统并网结构

- 光伏发电系统构成：
 - 太阳能光伏电池
 - 功率调理单元（Power Conditioning Unit, PCU）
 - DC/DC直流Boost升压斩波电路，包括实现MPPT功能的功率控制环节
 - DC/AC换流逆变器电路，包括控制功率因数或无功输出的电压控制环节
 - 换流变压器，或换流电抗器，或交流滤波器等元件并网

一、光伏电池等效电路及数学模型

- 1. 单体光伏电池数学模型（回顾）

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



- 光伏电池的工程用数学模型

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

• 2.直流Boost升压电路模型

- 当光照强度和环境温度变化时，光伏电池输出电压和电流成非线性关系变化，其输出功率也随之改变；
- 当光伏电池如果直接连接于不同的负载时，由于光伏电池输出特性与负载阻抗特性可能不匹配，也使得光伏电池输出功率降低。

解决办法：

在光伏电池输出端与逆变器或负载之间加入斩波电路，利用斩波电路的调制比与触发角的控制，使光伏电池工作于输出外特性曲线上最佳的直流电压运行点，从而使得光伏电池输出功率最大，即MPPT技术。

• 3. 光伏逆变电路模型

– 单极性SPWM单相逆变器为例：

$$U_{ac} = MU_{dc} = \frac{\sqrt{2}mU_{dc}}{2}$$

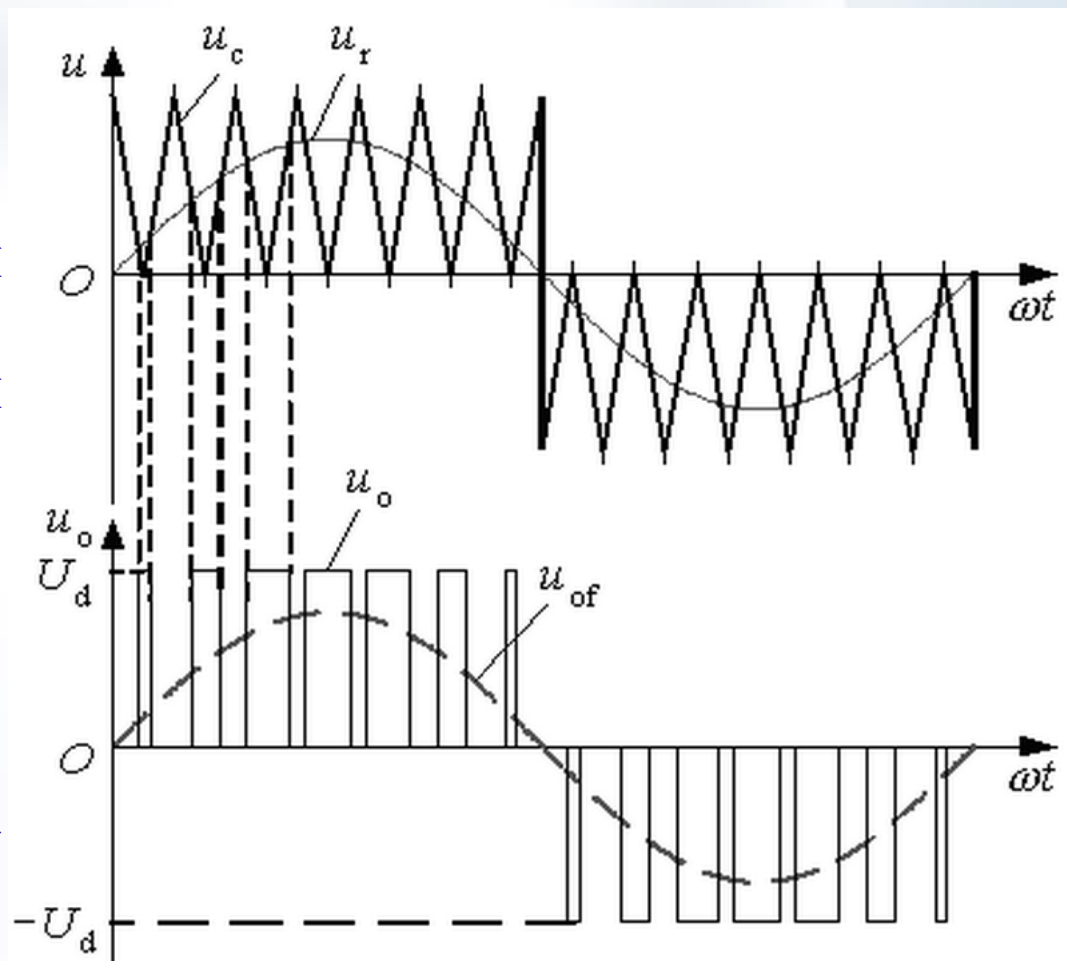
● 单极性SPWM调制（全桥）基波有效值为 $0.707U_{dc}$ ；

● 双极性SPWM调制（全桥）基波有效值也是 $0.707U_{dc}$ ；

● 二电平SVPWM线电压基波有效值是 $0.707U_{dc}$ ；

● 三电平SVPWM相电压基波有效值为 U_{dc} ($0.707 \times 1.732/2$)，线电压再乘以1.732；

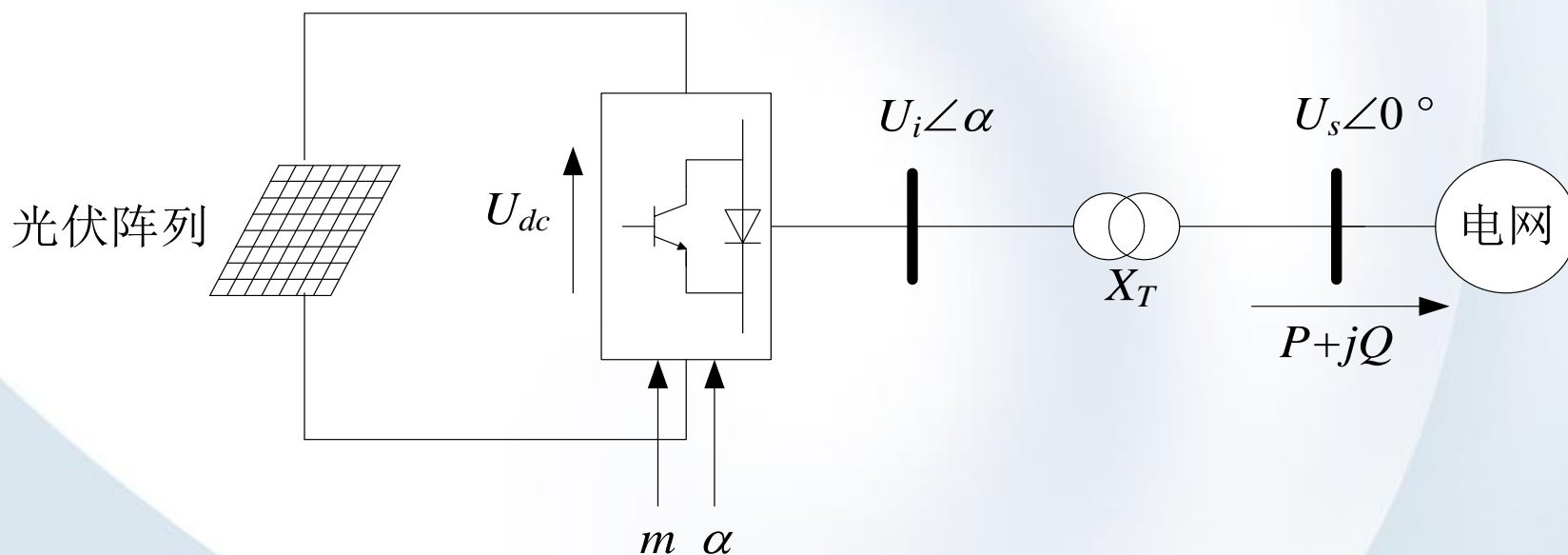
● 三相SPWM控制，相电压基波幅值为 $0.5U_{dc}$ ，线电压有效值为 $0.612U_{dc}$ 。



单极性SPWM调制方式原理

二、光伏发电潮流计算模型

- 1. 光伏系统并网单线图简化等效电路
— 忽略并联支路，忽略换流变压器电阻：



光伏系统并网等效电路

2. 含光伏发电稳态潮流计算

- 计算思想：
 - 对含电力电子换流器的光伏发电系统，**借鉴**含异步风力发电系统潮流计算中改进PQ模型的基本思想，即将异步风电机组的**有功和无功功率写成与电压相关的函数**，其功率函数对潮流计算的影响包含于雅克比矩阵的对应元素中。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} U \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U / U \end{bmatrix}$$

光伏稳态潮流模型

- 光伏发电也是通过电力电子换流器并网，将光伏电站所接入的节点注入功率看做是与电压相关的负荷，光伏并网节点的电压与当前光照和温度下光伏阵列的直流电压有关，而逆变器变量包括PWM的调制比 m 和触发角 α ：

$$U_i = mU_{dc}$$

- 光伏电源对并网节点 s 注入的有功、无功功率为：

$$\begin{cases} P_{in} = \frac{U_i U_s}{X_T} \sin(\alpha - 0) = \frac{m U_{dc} U_s}{X_T} \sin \alpha \\ Q_{in} = \frac{U_i U_s \cos(\alpha - 0)}{X_T} - \frac{U_s^2}{X_T} = \frac{m U_{dc} U_s \cos \alpha}{X_T} - \frac{U_s^2}{X_T} \end{cases}$$

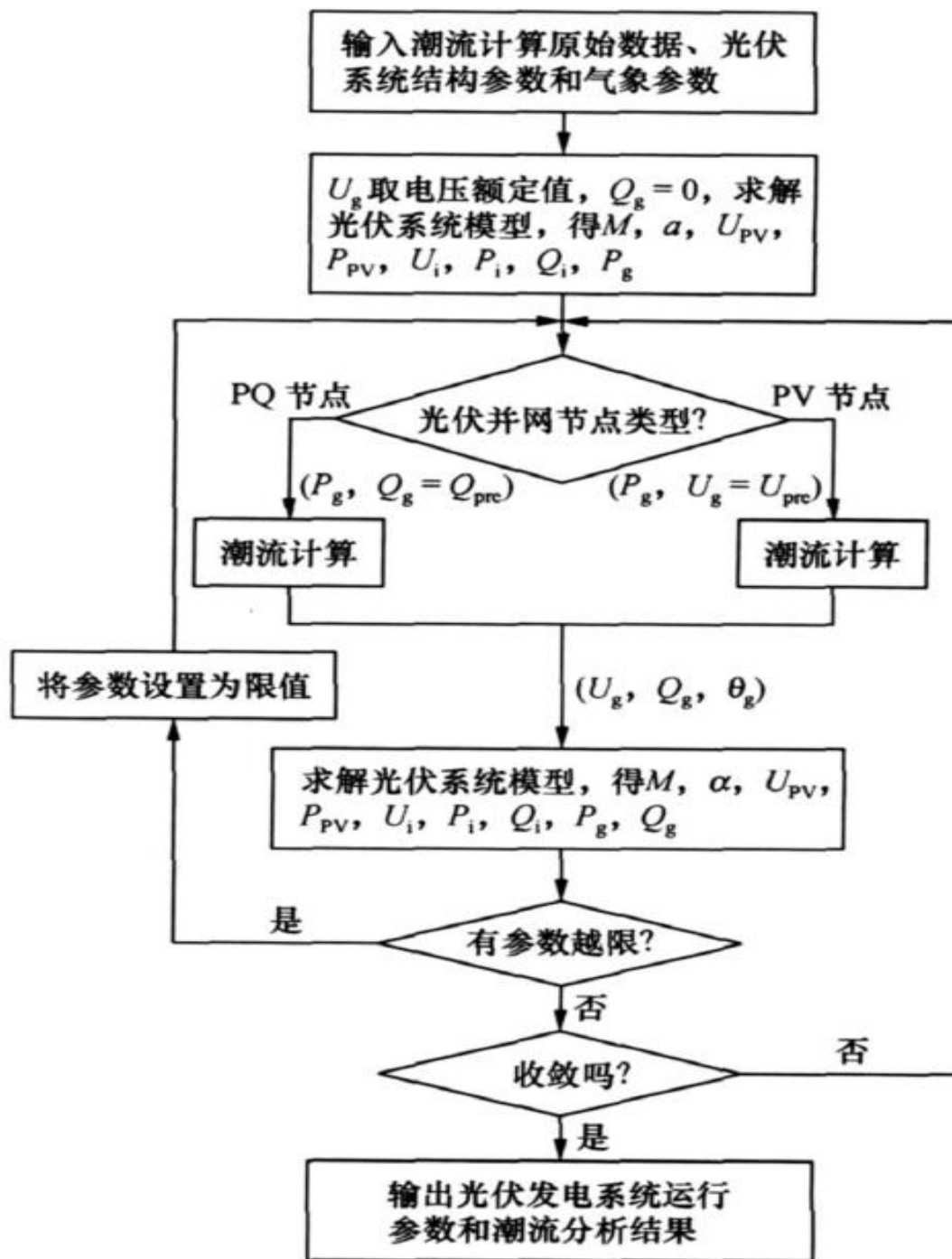
光伏稳态潮流模型

- 1.具备无功电压控制功能的光伏发电系统的并网逆变器，可以向电网注入无功功率，如果无功容量充足，**保证并网电压恒定时**，即可看作**PV节点**处理。
- 2.而目前的光伏电站正常运行时，通常基于最大化有功出力运行要求，让光伏逆变器**控制为恒功率因数模式**，而另外加装无功补偿装置。
 - 即将光伏并网节点作为**PQ节点**处理，此时的无功注入为有功功率的一定比例，或无功设备输出的上限或下限值。

$$\begin{cases} \Delta P_s = P_{in} + P_{Gs} - P_{Ls} - V_s \sum_{j \in s} V_j (G_{sj} \cos \theta_{sj} + B_{sj} \sin \theta_{sj}) = 0 \\ \Delta Q_s = Q_{in} + Q_{Gs} - Q_{Ls} - V_s \sum_{j \in s} V_j (G_{sj} \sin \theta_{sj} - B_{sj} \cos \theta_{sj}) = 0 \end{cases} \quad Q_{in} = P_{in} \tan \varphi$$

含波动性光伏的潮流计算流程图

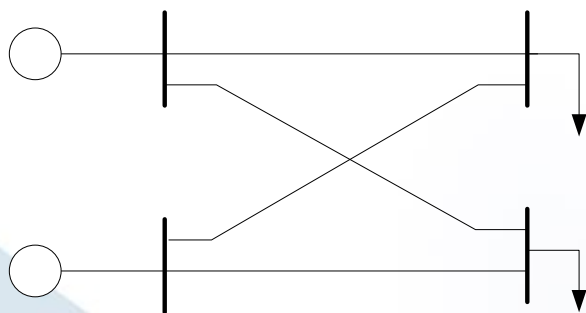
- 光伏发电系统各状态变量由气象条件和电网状态共同决定：
 - 光伏发电功率注入电网会影响电网功率分布和电压分布。
 - 通过交替求解并网光伏系统模型与电网潮流计算，可全面评估光伏系统和区域电网的稳态性能。



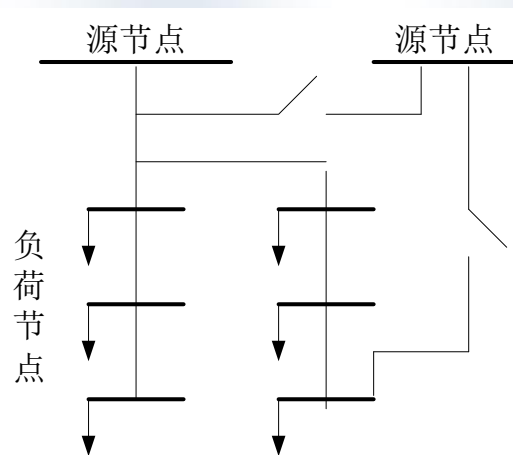
4.2.3 含新能源的配电网潮流计算

• 一、传统配电网潮流计算

- 电力网络分为：输电网，配电网
- 网络结构特点：
 - 输电网闭环设计，闭环运行，具有多网孔的特点
 - 配电网闭环设计，开环运行，具有辐射型网络或少网孔型网络
- 线路参数：在输电网有 $R \ll X$ ，配电网中无此约束条件

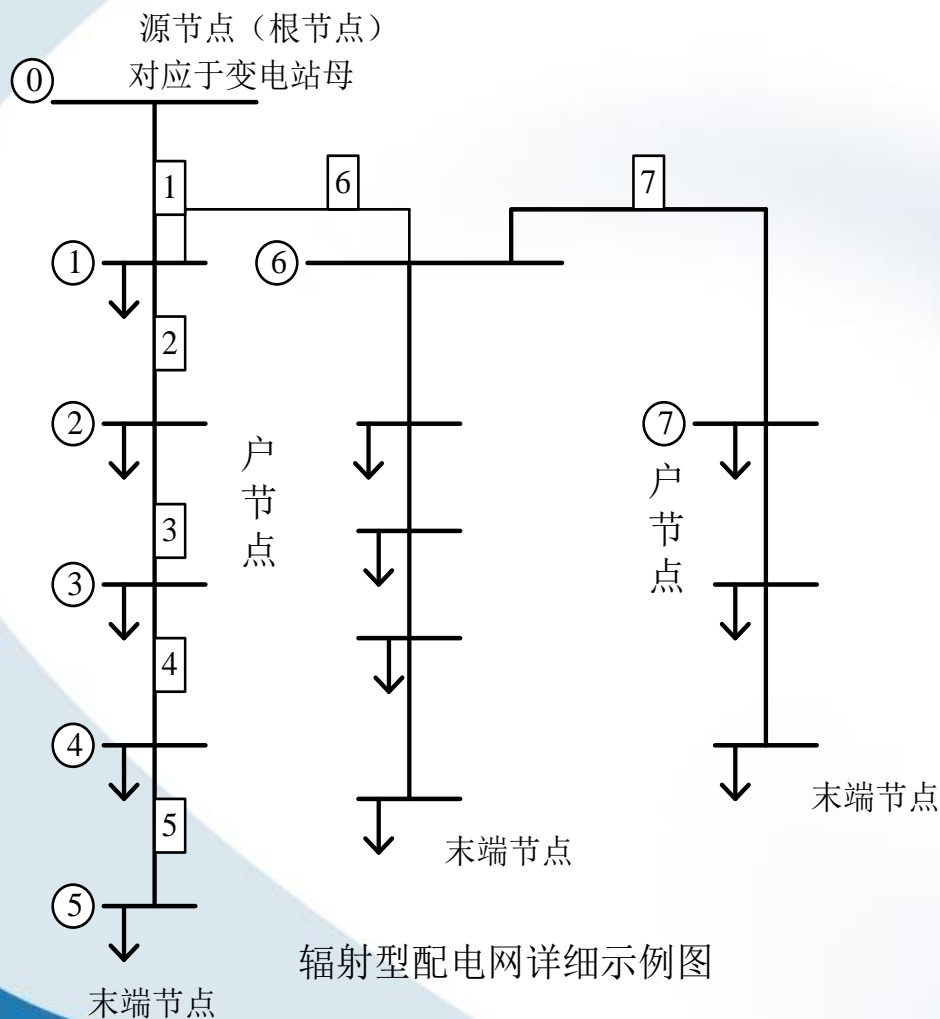


简单输电网示意图



辐射状配电网示意图

一、传统配电网潮流计算



• 网络描述

— 节点类型：

- 源节点（0#）
- 用户节点
- 末端节点

— 支路功率：

- 单向流动

一、传统配电网潮流计算

- 名词术语:

- **馈入功率**--任意节点的流入功率
- **馈入电流** --任意节点流入电流
- **馈入支路**--馈入功率与馈入电流相应的支路（一个节点只能有一个馈入支路）
- **馈出功率**--任意节点流出到接续支路的功率
- **馈出电流** -- 流出到接续支路的电流
- **馈出支路** -- 相应的支路（一个节点有多个馈出支路）
- **负荷功率** -- 任意节点流出到用户中的功率

一、传统配电网潮流计算

- 潮流计算方法：网络结构和线路参数不同，使输电网和配电网的潮流计算方法不同。
 - 输电网——
 - Newton-Raphson 牛顿拉夫逊法
 - Fast Decoupled 快速解耦法（P-Q分解法）
 - 配电网 ——
 - 牛顿类方法（NR法、PQ分解法）
 - 母线类算法（Zbus法、Ybus法）：网络等值阻抗、待求节点等值阻抗不易获取
 - 支路类算法（回路法、前推回代法、基于支路电流的潮流计算方法）

配电网潮流计算方法性能比较分析表

特性	多电源处理能力	收敛阶数	算法稳定性	计算速度
NR法	有	二阶方法， 平方收敛特性	对初值敏感	较长
PQ分解法	有	一阶方法	稳定	较长
母线类算法	有	一阶方法	稳定	较长
支路类算法	只能对一条馈线计算潮流；不能直接处理多电源的PV节点，需迭代联络线潮流。		一阶方法	稳定
				速度快， 但是当配电网的复杂程度增大时，迭代次数线性增长。

二、含新能源的配电网潮流计算

- 1) 传统配电网潮流计算节点类型：
 - 平衡节点（变电站出线），PQ节点（用户、末端节点）
- 2) 含新能源分布式发电电源的节点类型

① PQ节点

- 处理为负的负荷，如异步风力发电机简单PQ模型，此时风力发电机的有功功率和无功功率为当前风速下的定值。

② PV节点

- 采用同步发电机的内燃机、燃气轮机等，和所有通过电压控制逆变器并网的分布式电源，无功功率能够支撑给定的电压要求的节点。

二、含新能源的配电网潮流计算

• 2) 含新能源分布式发电电源的节点类型

③ PI节点

- 通过注入电流为恒定的逆变器并网的光伏、部分风电、燃气轮机、蓄电池等分布式电源，对应的无功功率由状态变量电压、恒定电流幅值和有功计算出：

$$Q_{k+1} = \sqrt{|I|^2 (e_k^2 + f_k^2) - P^2}$$

④ PV-(Q)节点

- 对有并联电容器组补偿的异步风电机组，根据每步迭代后的电压计算异步发电机吸收的无功和功率因数，
- 再算出投入的电容器组数，重新计算实际补偿的无功功率，将发电机原本吸收之无功与电容器组补偿之无功的差值作为吸收的无功功率，转换为PQ节点处理。

三、含新能源配电网潮流计算流程(牛顿法)

1、读入系统原始数据;

2、形成网络节点导纳矩阵;

3、给定各节点电压幅值、相角初值, 至迭代次数 $k=1$;

4、对分布式电源的PV节点设置无功功率限值;

5、将PI和P-V(Q)型节点转换为当前电压值下的PQ节点;

6、计算各节点功率最大失配量, 如不满足收敛精度, 继续Step7; 如满足, 跳往Step10;

7、形成潮流方程的雅克比矩阵;

8、求解修正方程式;

9、修正节点电压向量, $k=k+1$, 返回Step5; 同时检验PV节点的无功输出有无越限, 如越限转为PQ节点处理;

10、计算平衡节点有功无功功率、PV节点无功功率、各线路和变压器传输的功率、网络损耗, 输出收敛后结果。

