



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 2

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

含风电电力系统稳态潮流计算

2.1 传统电力系统的稳态潮流计算

熟练掌握电力系统的稳态潮流计算模型。

2.2 风力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。

2.3 含新能源的配电网潮流计算

了解含新能源接入配电网的潮流计算方法。

2.1 传统电力系统的稳态潮流计算

◆ 元件模型

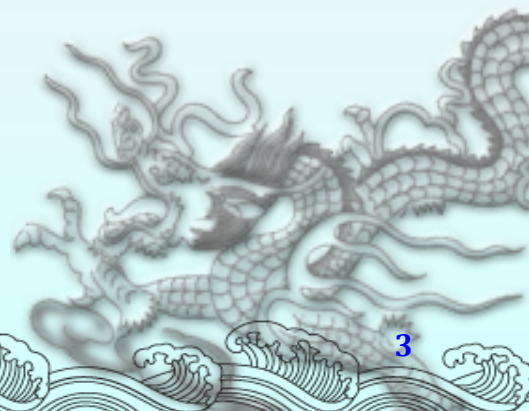
- ◆ 线路（电阻、电抗、电导、电纳、 Π 型等值电路）
- ◆ 变压器（漏阻抗、激磁阻抗、 Γ 型、 Π 型等值电路）

◆ 网络方程

- ◆ 节点导纳矩阵、节点类型

◆ 节点功率方程

- ◆ 功率平衡方程、修正方程、约束条件
- ◆ 雅克比矩阵、牛顿-拉夫逊法



一、网络方程及节点导纳矩阵

- ◆ 电力网络中有 n 个节点，基于KCL定律，则 $I=YU$ 可以按向量和矩阵的形式列出 n 个节点方程式为：

$$I = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

节点导纳矩阵

◆ 特点:

- ◆ (1) 导纳矩阵的阶数等于电力网络的节点数。
- ◆ (2) 导纳矩阵各行非对角元素中非零元素的个数等于对应节点所连的不接地支路数。
- ◆ (3) 导纳矩阵的元素很容易根据网络接线图和支路参数直观地求得，形成节点导纳矩阵的程序比较简单。
 - ◆ 导纳矩阵各对角元素，即节点的自导纳等于相应节点之间的支路导纳之和。
 - ◆ 导纳矩阵非对角元素，即节点之间的互导纳等于相应节点之间的支路导纳的负值。
- ◆ (4) 导纳矩阵为对称矩阵，由网络的互易特性易知。
- ◆ (5) 导纳矩阵是稀疏矩阵。

二、节点类型

- ◆ (1) **PQ节点**：给定节点的注入有功功率 P 和注入无功功率 Q 。
 - ◆ 属于这一类节点的有：
 - ◆ 纯负荷节点（如变电所母线）
 - ◆ 有功和无功功率都给定的发电机节点（包括节点上带有负荷）
 - ◆ 联络节点（注入有功功率和无功功率都等于零）
 - ◆ 它们的节点电压有效值 U 和相角 θ 未知。

二、节点类型

- ◆ (2) **PV节点**：给定节点的注入有功功率 P 和节点电压有效值 U ，待求量是节点的注入无功功率 Q 和电压的相角 θ 。
 - ◆ 这类节点通常是发电机节点，其有功功率给定而且通常具有比较大的无功容量，它们能通过自动电压调节器的作用使母线电压保持为给定值。
 - ◆ 有时将一些装有无功补偿设备的变电站母线也处理为PV节点。

二、节点类型

- ◆ (3) **平衡节点**：潮流计算中必须设置一个平衡节点，通常此类节点的电压有效值 U 为给定值，电压相角 $\theta=0$ ，即系统中其他节点的电压相位以它为参考；待求的则是其注入有功功率和无功功率。
 - ◆ 由于所有的PQ节点和PV节点的注入有功功率都已给定，而网络中的总功率损耗是未知的，因此平衡节点必须平衡全系统的功率和损耗而不可以给定。
 - ◆ 潮流计算中原则上可以选择任一个发电机节点作为平衡节点，但通常取容量较大出线较多的发电机节点，以便当有功损耗估计出入较大时，对它的注入有功功率产生影响较小。

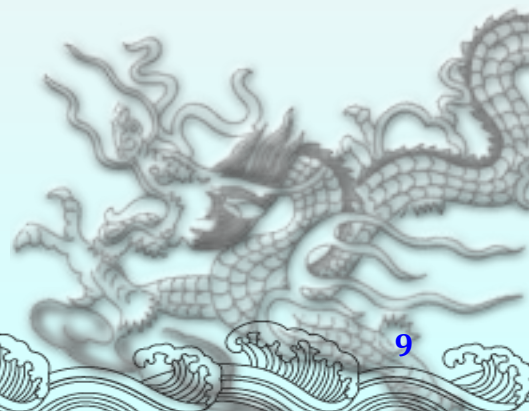
三、节点功率方程式

- 节点注入电流为线性方程组，其共轭和节点电压相乘，构成节点注入功率非线性方程组，实部虚部展开分别得到有功和无功功率注入方程组：

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$S_i = P_i + jQ_i = \sum \hat{I}_i \dot{U}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), P_i = P_{Gi} - P_{Li}, Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

$$P_i - jQ_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$



潮流方程

◇ 潮流方程的极坐标形式:

$$\begin{cases} P_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

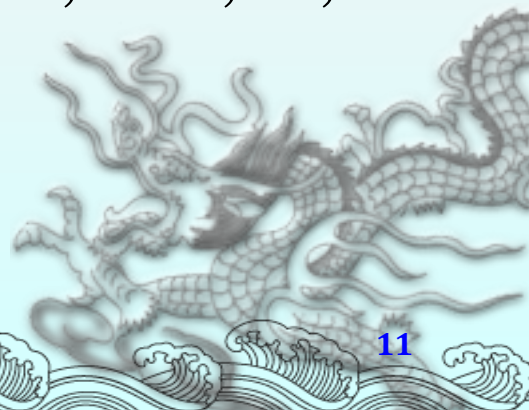
◇ 潮流方程的直角坐标形式:

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases}$$

潮流方程

◆ 特点:

- ◆ 1.它是一组代数方程（不含微分方程），因而表征的是电力系统的稳态运行特性。
- ◆ 2.它是一组非线性方程，因而只能用迭代方法求其数值解。
- ◆ 3.由于方程中的电压和导纳既可以表为直角坐标，又可表为极坐标，因而潮流方程有多种表达形式。
- ◆ 4.它是一组 n 个复数方程，因而实数方程数为 $2n$ 个但方程中共含 $4n$ 个变量： P ， Q ， U 和 θ ， $i=1, 2, \dots, n$ ，故必须先指定 $2n$ 个变量才能求解。



◆ 思考题1:

- ◆ 为什么电力系统稳态潮流方程是非线性的？是什么导致了其非线性？

三、潮流方程的节点约束条件

- ◆ 节点电压上下限，应满足小于节点最大额定电压并大于最小额定电压，即：

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

- ◆ 发电机的有功功率和无功功率上下限，应小于节点最大额定功率并大于最小额定功率，即：

$$\begin{cases} P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \\ Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, G_n)$$

四、潮流方程的修正方程式

- ◆ 牛顿法潮流计算的核心问题是修正方程式的建立和求解。
- ◆ 先对网络中个节点的编号作如下约定：
 - ◆ (1)网络中共有 n 个节点，编号为 $1, 2, 3, \dots, n$ ，其中包含 1 个平衡节点，编号为 n ；
 - ◆ (2)网络中有 m 个PQ节点，编号为 $1, 2, 3, \dots, m$ ；
 - ◆ (3)网络中有 $n-m-1$ 个PV节点，编号为 $m+1, m+2, \dots, n-1$

极坐标的修正方程式

- ◆ 平衡节点有功、无功功率平衡方程，和PV节点的无功平衡方程不用参加计算：
 - ◆ 平衡节点的注入功率不可能事先给定，从而不可能列出相应的表达式；
 - ◆ 同理，PV节点的无功功率也无法给定，而电压给定，不必求取。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - \left[U_i \sum_{j \in i} U_j \sum_{j=1}^n G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right] & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \Delta Q_i = Q_i - \left[U_i \sum_{j \in i} U_j \sum_{j=1}^n G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right] & i = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

极坐标的修正方程式

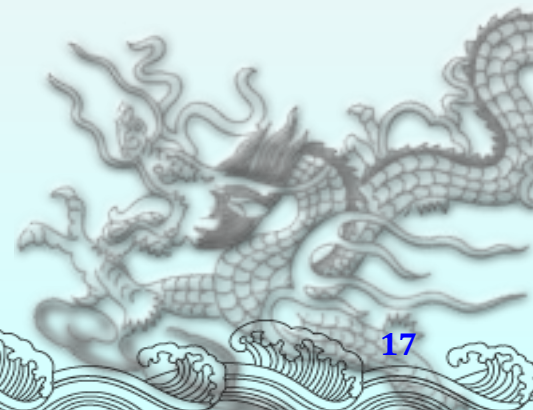
◇ 左边向量是节点注入功率的**不平衡量**（也称**失配量**）：

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1(x) \\ \Delta P_2(x) \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1}(x) \\ \hline \Delta Q_1(x) \\ \Delta Q_2(x) \\ \vdots \\ \Delta Q_m(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1,n-1} & N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1,m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2,n-1} & N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{n-1,1} & H_{n-1,2} & \cdots & H_{n-1,n-1} & N_{n-1,1} & N_{n-1,2} & \cdots & N_{n-1,m} \\ \hline M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1,n-1} & L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1,m} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2,n-1} & L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ M_{n-1,n-1} & M_{n-1,2} & \cdots & M_{n-1,n-1} & L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \cdots & L_{n-1,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \hline \Delta U_1 / U_1 \\ \Delta U_2 / U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_m / U_m \end{bmatrix}$$

雅克比矩阵 (Jacobian Matrix) 元素

◆ 其中，非对角线元素计算式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ L_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} H_{ij} = L_{ij} \\ N_{ij} = -M_{ij} \end{array} \right.$$



雅克比矩阵元素

◆ 对角线元素为：

$$\left\{ \begin{aligned} H_{ii} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = U_i^2 B_{ii} + (Q_{Gi} - Q_{Li}) \\ N_{ii} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - 2U_i^2 G_{ii} = -U_i^2 G_{ii} - (P_{Gi} - P_{Li}) \\ M_{ii} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = U_i^2 G_{ii} - (P_{Gi} - P_{Li}) \\ L_{ii} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ii} = U_i^2 B_{ii} - (Q_{Gi} - Q_{Li}) \end{aligned} \right.$$

雅克比矩阵元素

- ◇ 极坐标Jacobian矩阵特点：
 - ◇ 雅克比矩阵的阶数是 $n+m-1$ 。
 - ◇ 如果节点 i 和节点 j 之间的互导纳为零，则雅克比矩阵各子块**H**、**N**、**M**和**L**中的相应元素也为零，因此雅克比矩阵也是**稀疏矩阵**。
 - ◇ 雅克比矩阵中的两个对角子块是**不对称**的，但各元素之间存在关系。
 - ◇ 雅克比矩阵中**各元素都是节点电压有效值和相位的函数**，因此在整个迭代过程中所有元素都将随着节点电压相量的逐次修正而改变。

直角坐标的修正方程式

◇ 直角坐标下修正方程式的维数发生变化

◇ 补充PV节点的电压方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_i = P_i - \sum_{j \in i} [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)], i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \Delta Q_i = Q_i - \sum_{j \in i} [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)], i = 1, 2, \dots, m \\ \Delta U_i^2 = U_i^2 - (e_i^2 + f_i^2), \quad i = m+1, m+2, \dots, n-1 \end{array} \right.$$

直角坐标的修正方程式

◇ 修正方程式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \hline \Delta P_p \\ \Delta U_p^2 \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta U_{n-1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{1p} & N_{1p} & H_{1,n-1} & N_{1,n-1} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{1p} & L_{1p} & J_{1,n-1} & L_{1,n-1} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & H_{2p} & N_{2p} & H_{2,n-1} & N_{2,n-1} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & J_{2p} & L_{2p} & J_{2,n-1} & L_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline H_{p1} & N_{p1} & H_{p2} & N_{p2} & H_{pp} & N_{pp} & H_{p,n-1} & N_{p,n-1} \\ R_{p1} & S_{p1} & R_{p2} & S_{p2} & R_{pp} & S_{pp} & R_{p,n-1} & S_{p,n-1} \\ H_{n-1,1} & N_{n-1,1} & H_{n-1,2} & N_{n-1,2} & H_{n-1,p} & N_{n-1,p} & H_{n-1,n-1} & N_{n-1,n-1} \\ R_{n-1,1} & S_{n-1,1} & R_{n-1,2} & S_{n-1,2} & R_{n-1,p} & S_{n-1,p} & R_{n-1,n-1} & S_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta f_p \\ \Delta e_p \\ \Delta f_{n-1} \\ \Delta e_{n-1} \end{bmatrix}$$

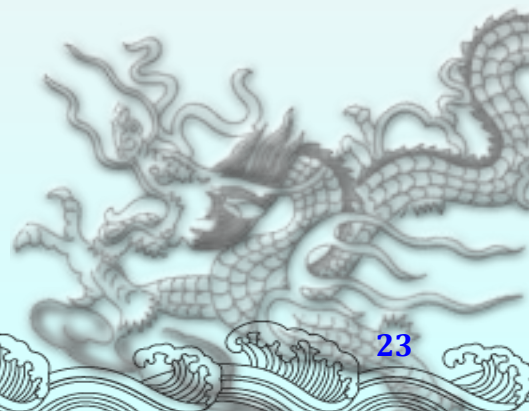
直角坐标的修正方程式

- ◇ 直角坐标Jacobian矩阵特点：
 - ◇ 修正方程数目为 $2(n-1)$ 个。
 - ◇ 雅可比矩阵的元素都是节点电压的函数，每次迭代，雅可比矩阵都需要重新形成。
 - ◇ 按节点号顺序而构成的分块雅可比矩阵将和节点导纳矩阵具有相同的稀疏结构，是一个高度稀疏的矩阵。
 - ◇ 雅可比矩阵不是对称矩阵。

五、牛顿拉夫逊法

- ◆ 牛顿—拉夫逊法是常用的解非线性方程组的方法，也是当前广泛采用的计算潮流的方法，设有非线性方程组如下：

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n \end{cases}$$



五、牛顿拉夫逊法

◆ 在近似解附近展开，
取线性项：

$$\begin{cases} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_2 \\ \dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_n \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n = y_1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n = y_2 \\ \dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n = y_n \end{cases}$$

五、牛顿拉夫逊法

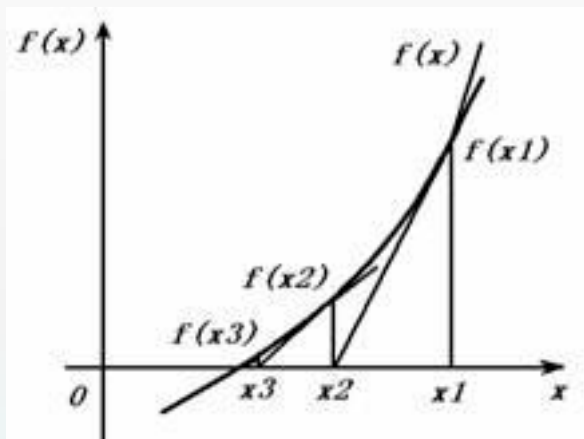
- ◆ 如果近似解与精确解相差不大，则 Δx_i 的高次方可以略去，写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots \\ y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \dots \\ \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

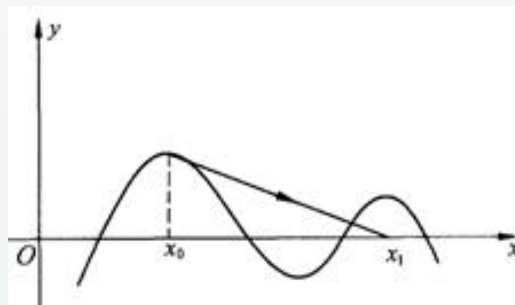
$$\Delta f = J \Delta x \quad \leftarrow \quad y - f(x^{(k)}) = \left. \frac{df}{dx} \right|_k \Delta x^{(k)}$$

五、牛顿拉夫逊法

◇ 牛顿—拉夫逊法的几何解释:



迭代收敛



不收敛情况

因此，牛顿拉夫逊法对初值的选择比较严格！

六、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、功率平衡方程；
- 3、给定各节点电压初值，置迭代次数 $k=1$ ；
- 4、计算各节点功率最大失配量，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；
- 6、求解修正方程式；
- 7、修正节点电压有效值和相位， $k=k+1$ ，返回Step4；
- 8、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。

◆ 思考题2:

- ◆ 在电力系统稳态潮流计算中的约束条件，如发电机的有功、无功上下限，及各节点电压上下限，何时使用这些限制？

七、其他潮流计算方法（了解）

- ◇ 快速解耦潮流（亦称PQ分解法）
- ◇ 直流潮流
- ◇ 随机潮流
- ◇ 约束潮流
- ◇ 最优潮流
- ◇ 三相潮流
- ◇ 动态潮流
- ◇ 开断潮流
- ◇ 谐波潮流



2.2 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

1. 风力机数学模型

◆ 风力机**机械功率**的表达式：

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

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。

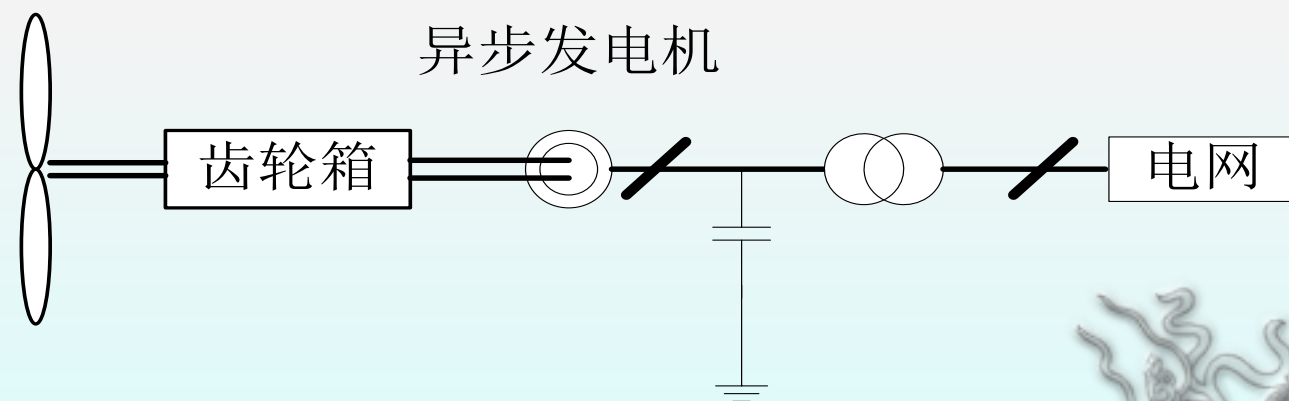
一、风力发电的数学模型及等值电路

1. 风力机数学模型

- ◆ 风力机机械功率的表达式给出了风能转换为机械能的关系，即风能利用系数 C_p 。
- ◆ 风力发电中，机械能转换为发出的电能的关系又如何？
 - ◆ 风力发电系统各部分转换效率：
 - ◆ 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，欧洲逆变器效率普遍较高，可达到97.2%）

2.异步发电机数学模型（大型风电场常用）

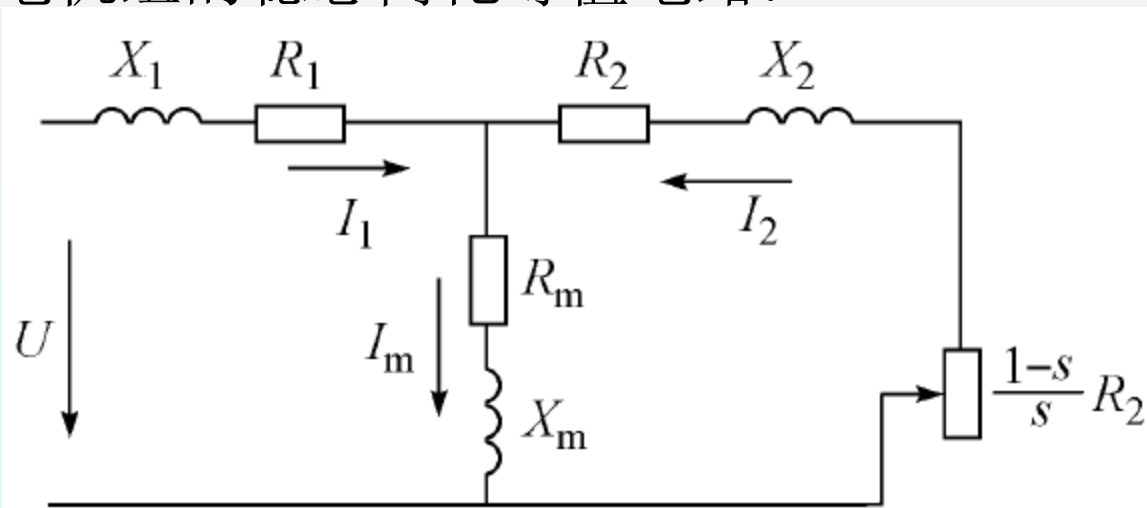
- ◆ 异步风力发电机组主要由风力机、异步发电机组组成，风力机和发电机之间通过多级齿轮箱等装置连接（机械传动、摩擦、发热、逆变控制等会产生一定的能量损耗）。



风力发电机组结构原理图

3.异步发电机组的稳态等值电路

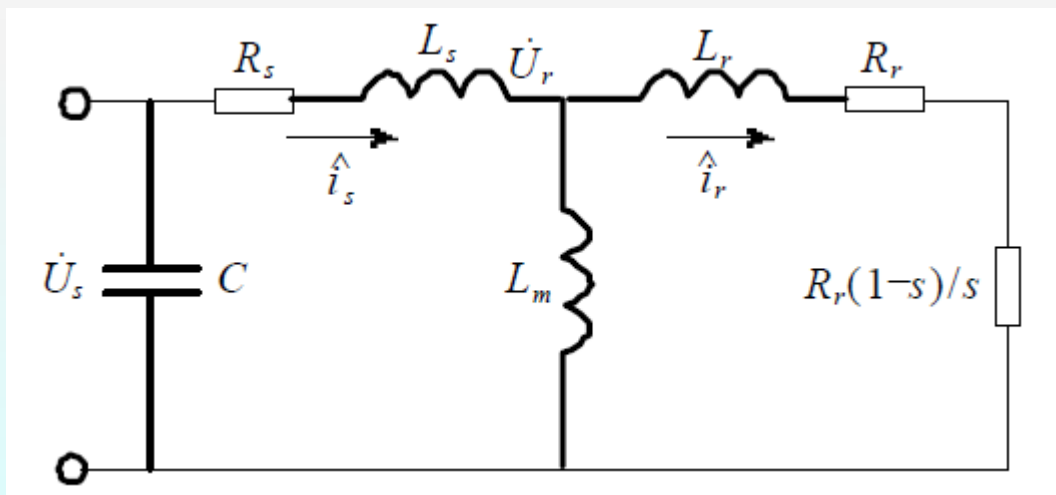
- ◆ 风力机的**风能利用率主要取决于风速**，即风力发电机组的有功功率主要由风速决定。
- ◆ 自然风吹动风轮机叶片，将风能转化为机械能，由此获得的机械功率扣除掉机械损耗后即为传递到异步发电机转子上的机械功率 P_{Ω} ，在等效电路中对**应可变电阻 $r_2(1-s)/s$** ，($s < 0$ 为转差，亦称滑差)。
- ◆ 异步发电机组的稳态简化等值电路：



异步风力发电机组稳态简化等值电路

3.异步发电机组的稳态等值电路

- ◆ 异步发电机在**超同步**速运行情况下，定子和转子同时向电网馈电运行；
- ◆ 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**吸收无功功率提供其建立励磁电流。



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，风电的出力时随机性的，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表示成这几种节点类型之一??
- ◆ 目前学术界还没有完全统一的观点——使用较多的是基于PQ模型，改进PQ模型，RX模型的风电稳态潮流计算模型。

◇ PQ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 不可能全部转换为电功率 P ，即动能转换为电能的发电机效率为 η ，其也由风速决定：

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

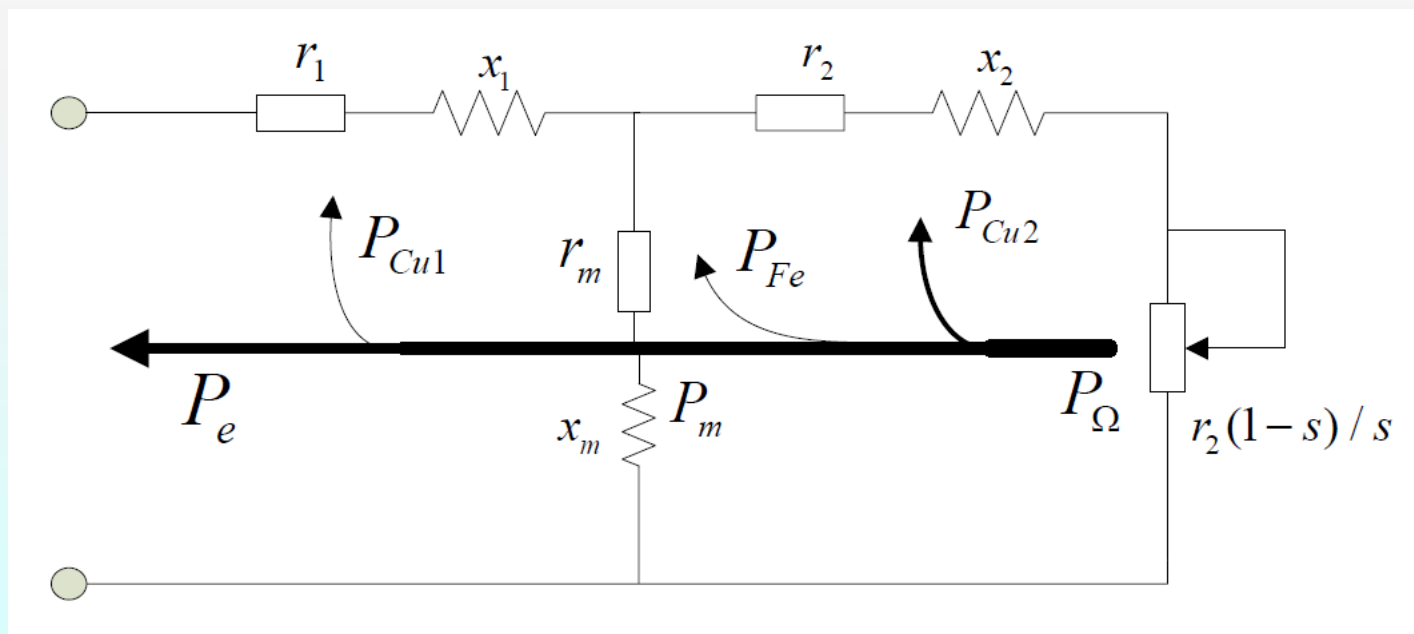
将风电机组等值成PQ节点，并认为风电机组中电容器自动分组投切，可以使风电场的功率因数恒定不变，即：

$$Q = \frac{P}{\tan \varphi}$$

◇ 2. 改进PQ模型

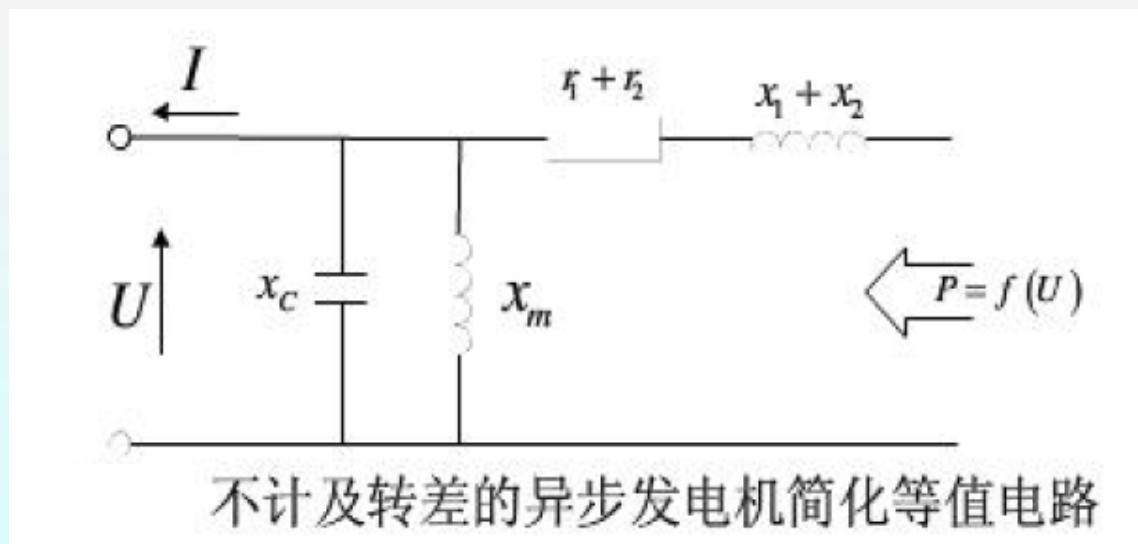
◇ 改进PQ模型是将风电场无功消耗表示为其有功和机端电压的函数。

- ◆ 机械功率 P_{Ω} ，在等效电路中对应变阻 $r_2(1-s)/s$ 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 。



◆ 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：



◆ 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的无功补偿部分： $(-U^2/x_c)$ ，如果没有并联补偿， x_c 为无穷大，即减去这一部分无功功率。

◆ 3.RX模型

◆ **RX模型是将风电场处理为一个阻抗接在母线上。**

◆ 由异步发电机原理和等值电路可知，其等值阻抗为：

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

◆ 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（**典型的额定转差值：-0.0004**）：

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

◆ 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： $(-U^2/x_c)$ 。

◇ RX模型的特点:

- ◇ 风速变化，引起风力机转速、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，增补一个风力机的功率平衡方程。

三种风力发电潮流计算模型比较

模型	简化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成变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；但需两步迭代：通过常规潮流迭代过程计算异步发电机的机端电压，然后通过异步发电机转差的迭代过程计算异步发电机的转差。
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

三、含风电的电力系统潮流计算

◆ 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、无功功率是机端电压的函数，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、无功功率-电压特性，可以得到以下修正方程：

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

- ◆ 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：

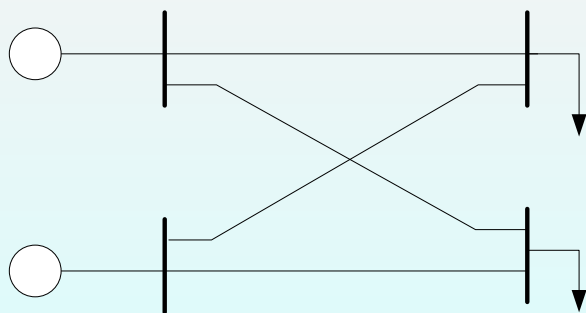
$$\begin{cases} \frac{\partial P_{em}}{\partial s} = \frac{(1-3s+s^2)r_2^2 - s^2 x_k^2}{(r_2^2 + s^2 x_k^2)^2} U^2 r_2 \\ \frac{\partial P_{em}}{\partial U} = 2U r_2 \frac{s(1-s)}{r_2^2 + s^2 x_k^2} \\ \frac{\partial P_{em}}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$$



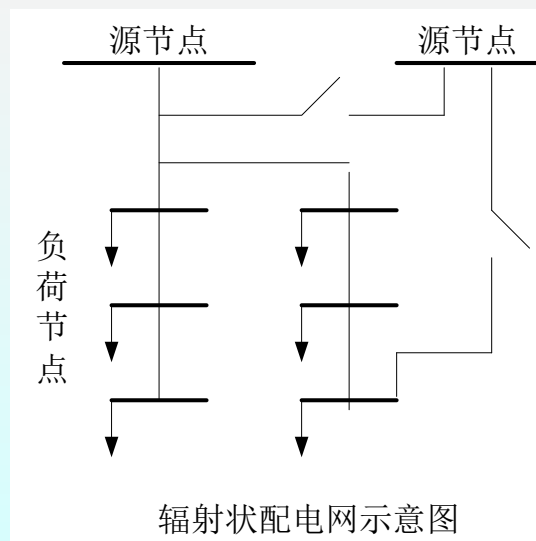
2.3 含新能源的配电网潮流计算

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 $R \ll X$ ，配电网中无此参数条件

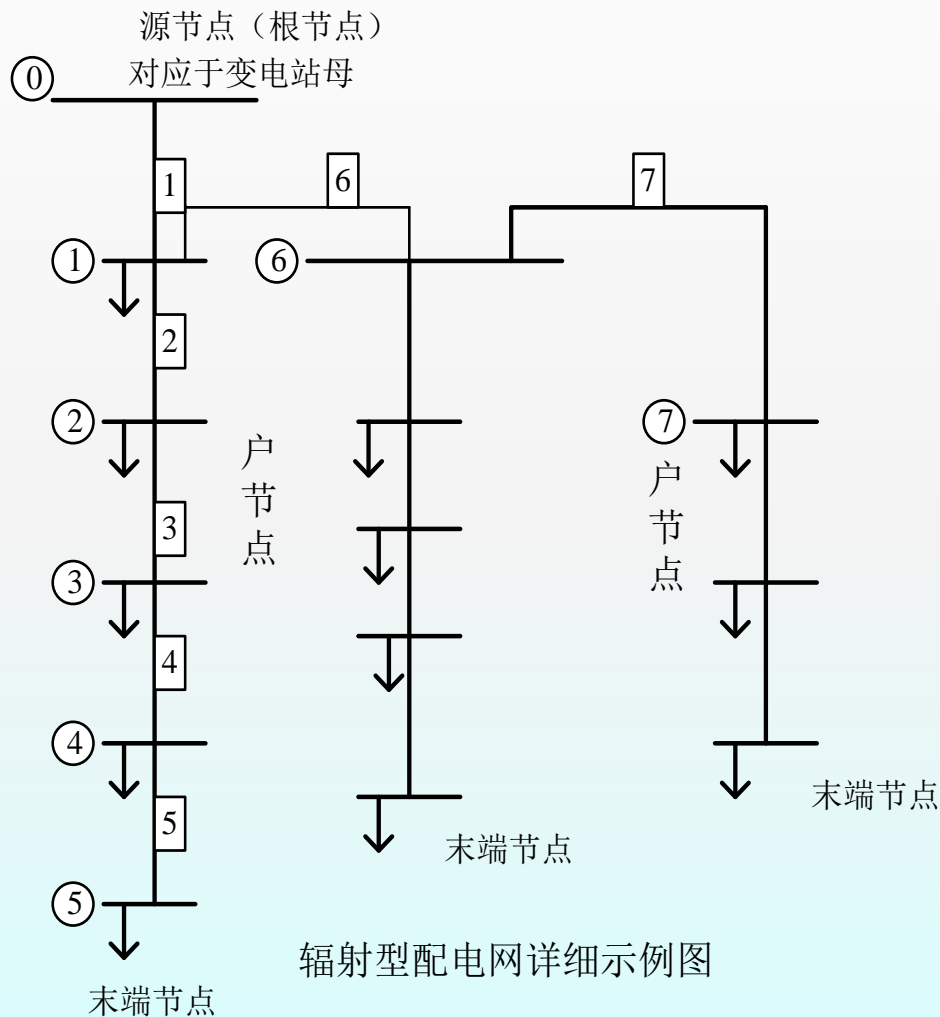


简单输电网示意图



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、含新能源配电网潮流计算

◆ 1) 传统配电网潮流计算节点类型:

- ◆ V θ 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化模型, 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、燃料电池等分布式电源，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 P-Q (V) 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-Q(V)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超限，如超限转为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。

上机实验及大作业报告

- ◆ **题 目**：《含风电场的潮流计算实验设计》
- ◆ **分 组**：4个人一组，分组讨论完成
- ◆ **日 期**：2016年4月10日之前交
- ◆ **资 料**：运行程序、报告填空
- ◆ **下 载**：交大主页->教师个人主页->电气学院->刘俊主页：<http://gr.xjtu.edu.cn/web/eeliujun>

实验目的

- ◆ 熟悉电网和风电场的参数计算
- ◆ 熟悉含风电场的潮流计算程序
- ◆ 分析含风电场下电力系统潮流
- ◆ 分析无功补偿、风电场规模、风电场接入位置等重要因素的影响

本实验前期知识包括电力系统潮流计算和风电机组建模两部分。

实验内容

- ◆ 本实验要求完成一个风电场接入到IEEE 14节点标准测试系统中的潮流计算和相关重要因素的影响。需要填写的数据和文字分析用 表示出来。主要包括：
 - ◆ 风电场接入系统的联络输电线路和变压器参数计算
 - ◆ 基本的潮流计算结果
 - ◆ 风电无功补偿的影响分析
 - ◆ 风电场规模的影响分析
 - ◆ 风电场接入位置的影响分析
 - ◆ 自主性分析

实验程序使用说明

- ◆ Windflow.exe: 实验的计算程序，当数据文件的信息完全时直接双击就可以进行计算，将自动生成计算结果Result.txt文件；
- ◆ Windsystem.txt: 输入的数据文件，包括了测试系统的电网侧信息，该数据格式将在后面进行详细说明。这个文件本身信息不全，实验的第一步就是根据已知信息将这个文件数据补全，进行基本潮流计算。然后针对不同影响因素，修改本文件进行计算。
- ◆ Windfarm.txt: 输入的风电场数据文件。这个文件本身信息是完整的，可以直接进行基本潮流计算。然后针对不同影响因素，修改本文件进行计算。
- ◆ 有30%无功补偿额定风速下潮流分布【实验书上结果】.txt: 基本潮流计算的结果数据，用于各种情况的比较。

第二讲 小结

◆ 传统电力系统稳态潮流计算

- ◆ 节点导纳矩阵
- ◆ 节点类型
- ◆ 潮流方程
- ◆ 修正方程式
- ◆ 雅克比矩阵

◆ 含风力发电的稳态潮流计算模型

- ◆ 简化PQ模型
- ◆ 改进PQ模型
- ◆ RX模型

◆ 新能源发电的配电网潮流计算

- ◆ 潮流模型
- ◆ 新型节点类型

