



石家莊鐵道大學
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

复杂电力系统潮流的计算机算法

电力网络方程

主讲：田行军

CH4. 复杂电力系统潮流的计算机算法



在线开放课程

基本要求：本章着重介绍运用电子计算机计算电力系统潮流分布的方法。它是复杂电力系统稳态和暂态运行的基础。

运用计算机计算的步骤，一般包括建立数学模型，确定解算方法，制定框图和编制程序，本章着重前两步。

1、建立数学模型

节点电压方程、导纳矩阵的形成与修改

2、功率方程、节点分类及约束条件

3、迭代法计算潮流

功率方程的非线性性质

高斯—塞德尔法

用于潮流计算—速度慢、易于收敛

4. 牛顿—拉夫逊法计算潮流

原理：局部线性化

直角座标法、极座标法、PQ分解法

用于潮流计算—速度快、但注意初值选择

4.1 电力网络方程



网络元件：恒定参数

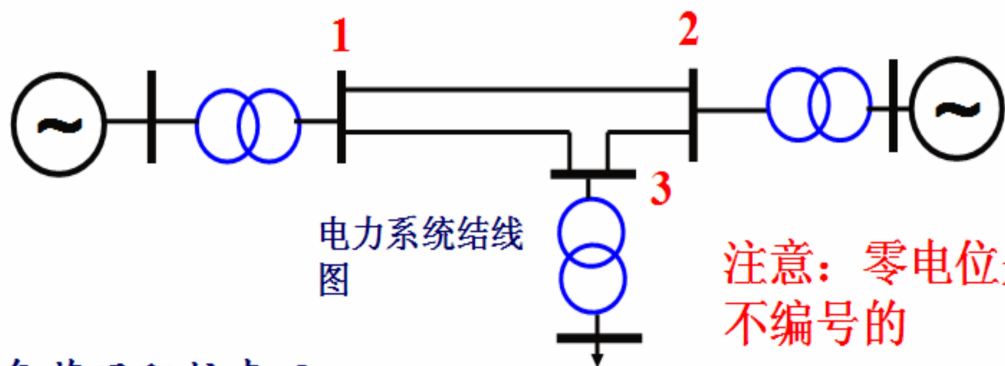
代数方程

发电机：电压源或电流源

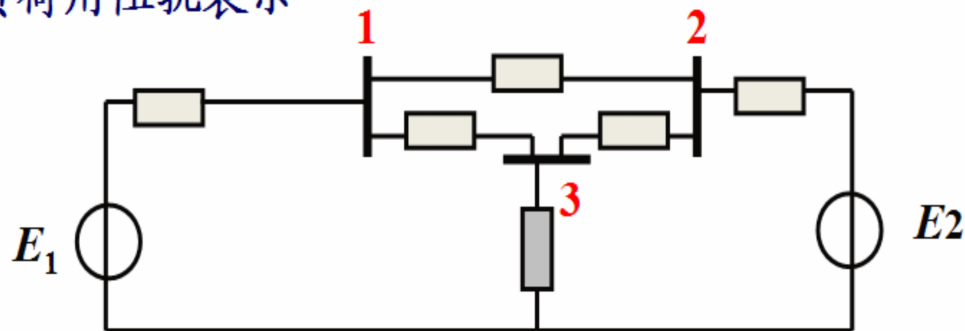
负荷：恒定阻抗或恒定功率

4.1 电力网络方程

一、节点电压方程 以母线电压作为待求量

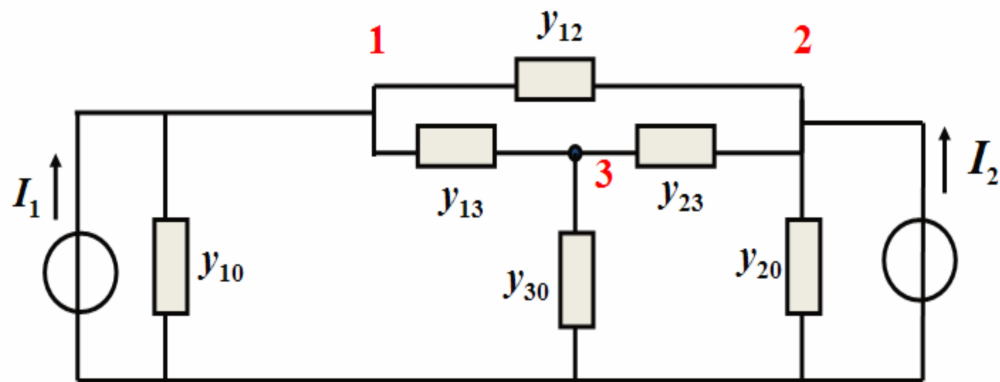


负荷用阻抗表示



4.1 电力网络方程

电压源变为电流源 零电位作为参考，根据基尔霍夫电流定律



$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 y_{10} + (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) y_{12} + (\dot{U}_1 - \dot{U}_3) y_{13}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 y_{20} + (\dot{U}_2 - \dot{U}_1) y_{21} + (\dot{U}_2 - \dot{U}_3) y_{23}$$

$$0 = \dot{U}_3 y_{30} + (\dot{U}_3 - \dot{U}_1) y_{31} + (\dot{U}_3 - \dot{U}_2) y_{32}$$

4.1 电力网络方程

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})\dot{U}_1 - y_{12}\dot{U}_2 - y_{13}\dot{U}_3 \\ &= Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 + Y_{13}\dot{U}_3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_2 &= -y_{21}\dot{U}_1 + (y_{20} + y_{21} + y_{23})\dot{U}_2 - y_{23}\dot{U}_3 \\ &= Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 + Y_{23}\dot{U}_3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0 &= -y_{31}\dot{U}_1 - y_{32}\dot{U}_2 + (y_{30} + y_{31} + y_{32})\dot{U}_3 \\ &= Y_{31}\dot{U}_1 + Y_{32}\dot{U}_2 + Y_{33}\dot{U}_3\end{aligned}$$

4.1 电力网络方程

其中

互
导
纳

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

自
导
纳

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{21} + y_{23}$$

$$Y_{33} = y_{30} + y_{31} + y_{32}$$

4.1 电力网络方程

对于 n 个独立节点的网络，其 n 个节点方程为

$$\begin{aligned} Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 + \cdots + Y_{1n}\dot{U}_n &= \dot{I}_1 \\ Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 + \cdots + Y_{2n}\dot{U}_n &= \dot{I}_2 \\ &\vdots \\ Y_{n1}\dot{U}_1 + Y_{n2}\dot{U}_2 + \cdots + Y_{nn}\dot{U}_n &= \dot{I}_n \end{aligned}$$

其矩阵形式为

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

4.1 电力网络方程

即

$$YU = I$$

Y 节点导纳矩阵

Y_{ii} 节点 i 的自导纳

Y_{ij} 节点 i 、 j 间的互导纳

4.1 电力网络方程

二、节点导纳矩阵

1、Y矩阵元素的物理意义:

①自导纳

$$Y_{ii} = \left(\frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_i} \right)_{(\dot{U}_j=0, j \neq i)} \left\{ \begin{array}{l} \text{节点 } i: \text{ 加单位电压 } U_i = 1 \\ \text{其余节点 } j: \text{ 全部接地 } U_j = 0 \\ \text{节点 } i \text{ 注入网络电流} \\ Y_{ii} \neq 0 \end{array} \right.$$

$$Y_{ii} = y_{i0} + \sum_j y_{ij}$$

4.1 电力网络方程

②互导纳

if $j \neq i$

$$Y_{ji} = \left(\frac{\dot{I}_j}{\dot{U}_i} \right)_{(U_j=0, j \neq i)}$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

节点*i*: 加单位电压 $U_i=1$

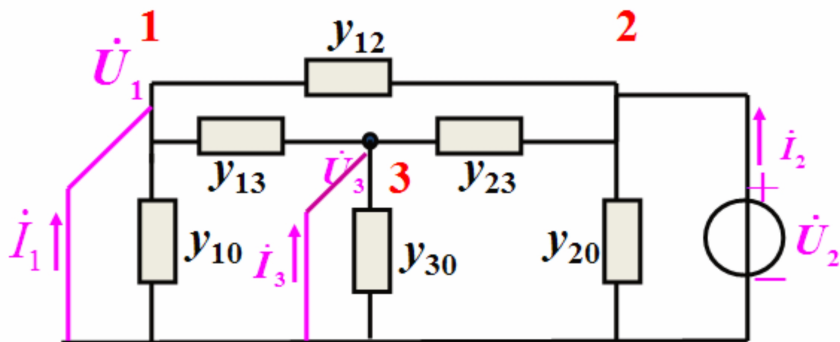
其余节点*j*: 全部接地 $U_j=0$

由地流向节点*j*的电流

稀疏性: 当 $y_{ij}=0$ 时 $Y_{ij}=0$

4.1 电力网络方程

2、节点导纳矩阵中互导纳的确定



$$Y_{12} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right)_{(\dot{U}_1 = \dot{U}_3 = 0)}$$
$$\dot{I}_1 = -\dot{U}_2 y_{12}$$

} → $Y_{12} = -y_{12}$

4.1 电力网络方程

3、节点导纳矩阵 Y 的特点

①直观易得

②稀疏矩阵

③对称矩阵

阶数：等于除参考节点外的节点数 n

对角元：等于该节点所连导纳的总和

非对角元 Y_{ij} ：等于连接节点 i 、 j 支路

导纳的负值

4.1 电力网络方程

三、节点导纳矩阵的修改

不同的运行状态：不同结线方式下的运行状况、变压器的投切或变比的调整等。

改变一个支路的参数或它的投切只影响该支路两端节点的自导纳和它们之间的互导纳，因此仅需对原有的矩阵作某些修改。

4.1 电力网络方程

电力网



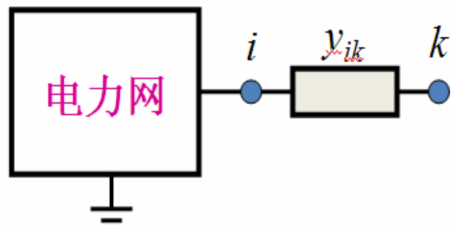
$$Y = Y^{(0)} + \Delta Y \Rightarrow Y_{ij} = Y_{ij}^{(0)} + \Delta Y_{ij}$$

$$Y^{(0)} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2j} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{j1} & Y_{j2} & \cdots & Y_{ji} & \cdots & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

4.1 电力网络方程

1、从原网络引出一条支路增加一个节点

Y 增加一行一列 $(n+1) \times (n+1)$



$$Y_{kk} = y_{ik}$$

$$Y_{ik} = Y_{ki} = -y_{ik}$$

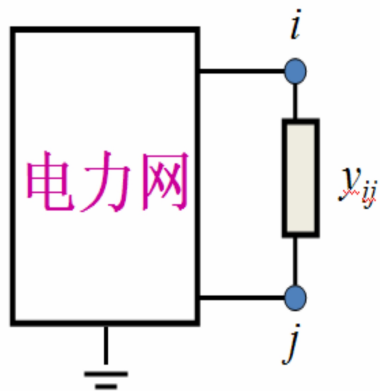
$$\Delta Y_{ii} = y_{ik}$$

$$Y_{ii} = Y_{ii}^{(0)} + \Delta Y_{ii}$$

4.1 电力网络方程

2、在原有网络节点*i*、*j*之间增加一条支路

*Y*阶次不变



$$\Delta Y_{ii} = \Delta Y_{jj} = y_{ij}$$

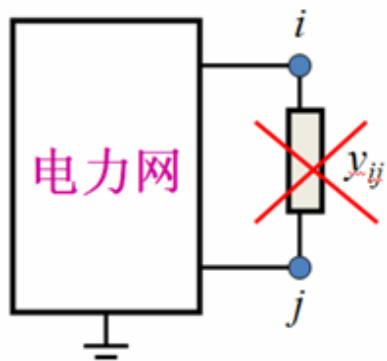
$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = -y_{ij}$$

$$Y_{ii} = Y_{ii}^{(0)} + \Delta Y_{ii}$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = Y_{ij}^{(0)} + \Delta Y_{ij}$$

4.1 电力网络方程

3、在原有网络节点*i*、*j*之间切除一条支路



Y 阶次不变

$$\Delta Y_{ii} = \Delta Y_{jj} = -y_{ij}$$

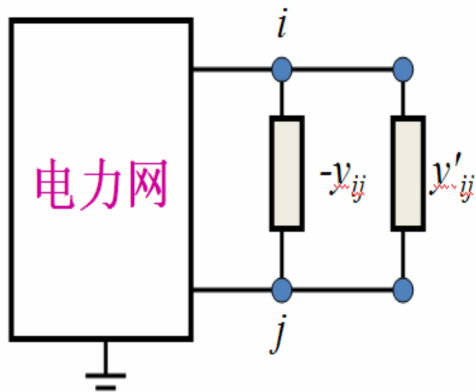
$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = y_{ij}$$

$$Y_{ii} = Y_{ii}^{(0)} + \Delta Y_{ii}$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = Y_{ij}^{(0)} + \Delta Y_{ij}$$

4.1 电力网络方程

4、在原有网络节点*i*、*j*之间的导纳由由 y_{ij} 改变为 y'_{ij}



$$\Delta Y_{ii} = y'_{ij} - y_{ij}$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = y_{ij} - y'_{ij}$$

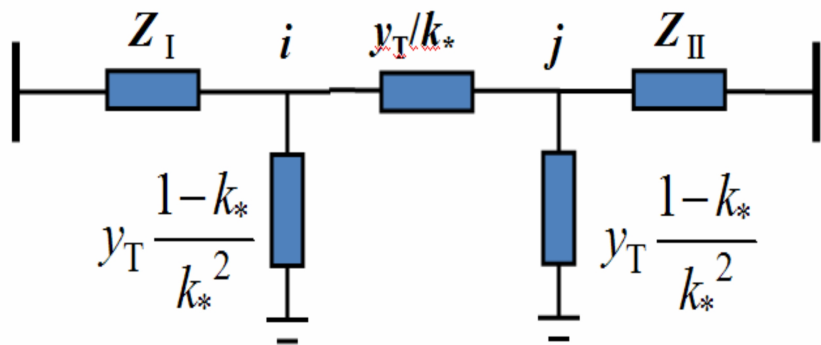
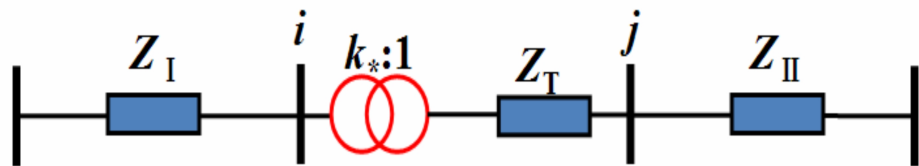
$$\Delta Y_{jj} = y'_{ij} - y_{ij}$$

$$Y_{ii} = Y_{ii}^{(0)} + \Delta Y_{ii}$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = Y_{ij}^{(0)} + \Delta Y_{ij}$$

4.1 电力网络方程

5、在原有网络节点*i*、*j*之间的变压器变比由 k_* 改变为 k_* '



4.1 电力网络方程

$$\Delta Y_{ii} = \left(\frac{y_T}{k'_*} + y_T \frac{1-k'_*}{k'^2_*} \right) - \left(\frac{y_T}{k_*} + y_T \frac{1-k_*}{k^2_*} \right)$$

$$= \left(\frac{1}{k'^2_*} - \frac{1}{k^2_*} \right) y_T$$

$$\Delta Y_{jj} = \left(\frac{y_T}{k'_*} + y_T \frac{k'_* - 1}{k'_*} \right) - \left(\frac{y_T}{k_*} + y_T \frac{k_* - 1}{k_*} \right) = 0$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = - \left(\frac{y_T}{k'_*} - \frac{y_T}{k_*} \right)$$

小结



在线开放课程

- 👉 介绍了节点电压方程的建立方法；
- 👉 介绍了导纳矩阵的特点和修改。

