

# CH17 电力系统暂态稳定性

- 暂态稳定分析计算的基本假设
- 简单电力系统暂态稳定的分析计算
  - ◆ 各种运行情况下的功率特性
  - ◆ 大扰动后的转子的相对运动
  - ◆ 等面积定则，极限切除角，暂态稳定性极值比较法
- 发电机转子运动方程的数值解法
- 复杂电力系统暂态稳定的分析计算
- 暂态稳定实际计算中系统各元件的数学模型

# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算的基本假设

## □ 电力系统机电暂态过程的特点

### ◆ 大扰动形式（扰动性质已知，可定量）

- ◇ 大容量负荷投切；
- ◇ 发电机、线路、变压器等元件投切；
- ◇ 短路故障；

### ◆ 机电暂态过程特点

- ◇ **电磁暂态过程**：运行变量快速变化，电压电流磁链的非周期分量，ms级；
- ◇ **机械暂态过程**：运行变量慢速变化，功角转速等，转子运动方程，秒级；
- ◇ **暂态稳定分析**：考虑发电机转子运动的机电相互作用，关注功角随时间变化

## □ 基本假设

### ◆ 忽略发电机定子电流非周期分量和转子电流基频分量对转子运动的影响；

- ◇ 发电机定、转子绕组电流、系统电压、发电机电磁功率均可以突变；

- ◇ 发电机Park方程中定子绕组电压方程为代数方程，电力网络各元件的电磁暂态亦忽略不计；

### ◆ 发生不对称故障时，不计负序和零序电流对转子运动的影响；

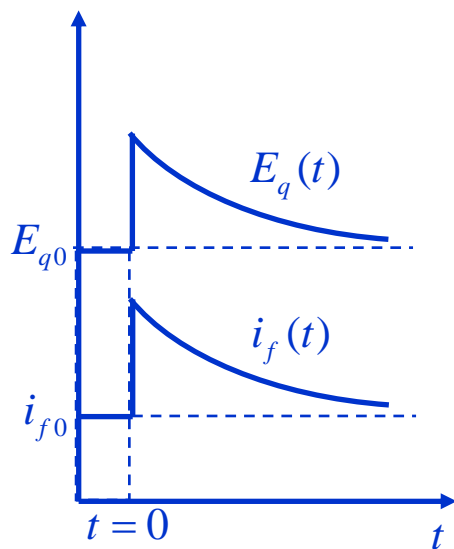
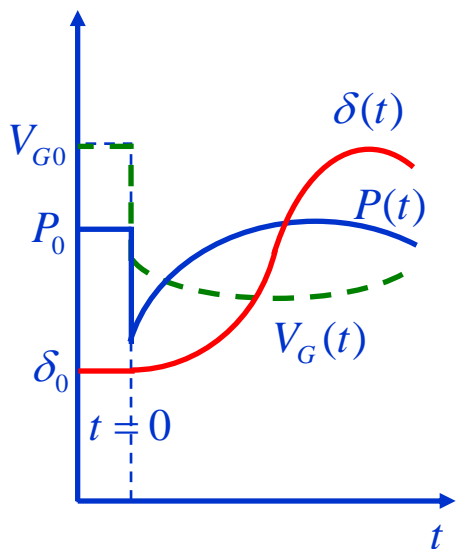
### ◆ 忽略暂态过程中发电机附加损耗

### ◆ 不考虑频率变化对系统参数的影响

# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算的基本假设

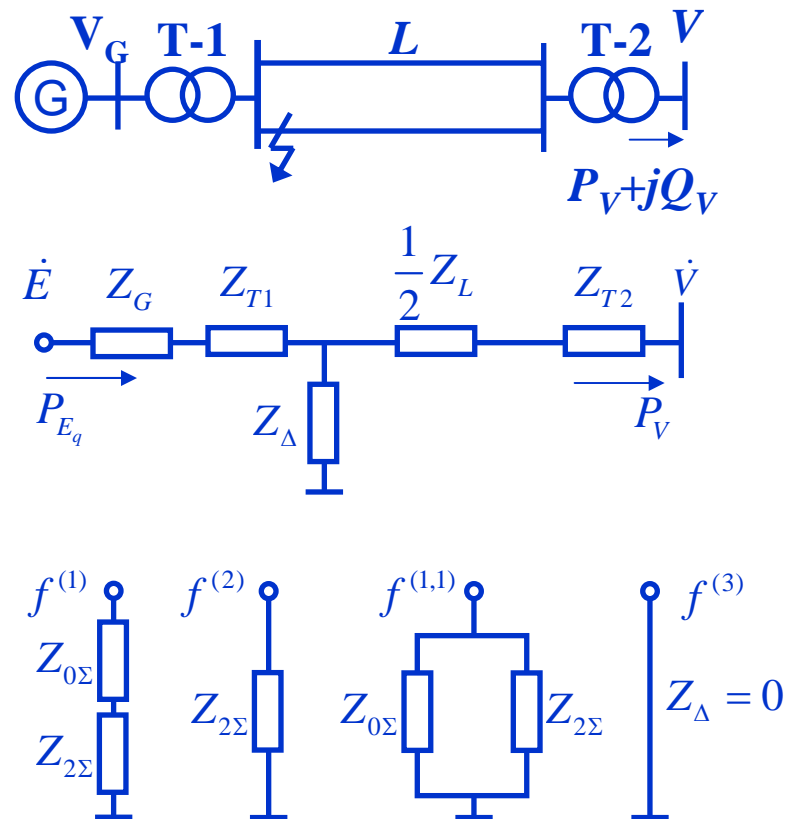
## 基本假设

- ◆ 忽略发电机定子电流非周期分量和转子电流基频分量对转子运动的影响；
- ◇ 发电机定、转子绕组电流、系统电压、发电机电磁功率均可以突变；



## 基本假设

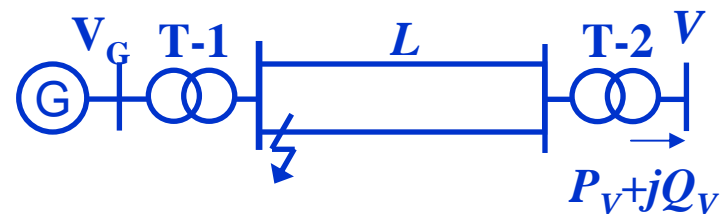
- ◆ 发生不对称故障时，不计负序和零序电流对转子运动的影响；



# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算

## □ 各种运行情况下的功率特性

- ◆ 发电机采用暂态电抗的暂态电势表示;
- ◆ 不考虑原动机调速器的作用



$$X_I = X'_d + X_{T1} + X_L/2 + X_{T2}$$

$$X_{II} = X_I + \frac{(X'_d + X_{T1})(X_L/2 + X_{T2})}{X_\Delta}$$

$$X_{III} = X'_d + X_{T1} + X_L + X_{T2}$$

$$P_I = \frac{EV}{X_I} \sin \delta = P_{mI} \sin \delta$$

$$P_{II} = \frac{EV}{X_{II}} \sin \delta = P_{mII} \sin \delta$$

$$P_{III} = \frac{EV}{X_{III}} \sin \delta = P_{mIII} \sin \delta$$

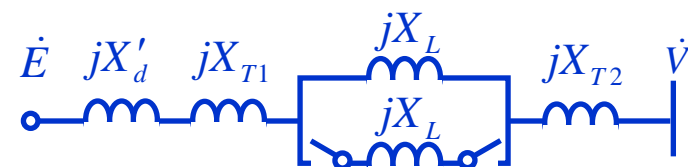
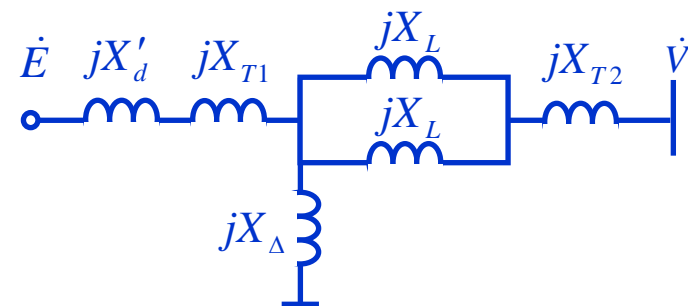
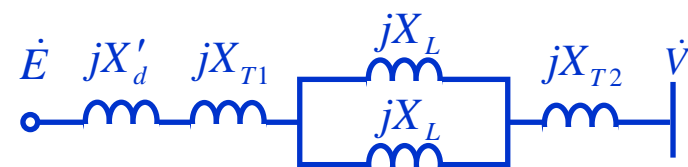
$$X_I < X_{II}$$

$$X_I < X_{III}$$

$$X_{III} < X_{II}$$

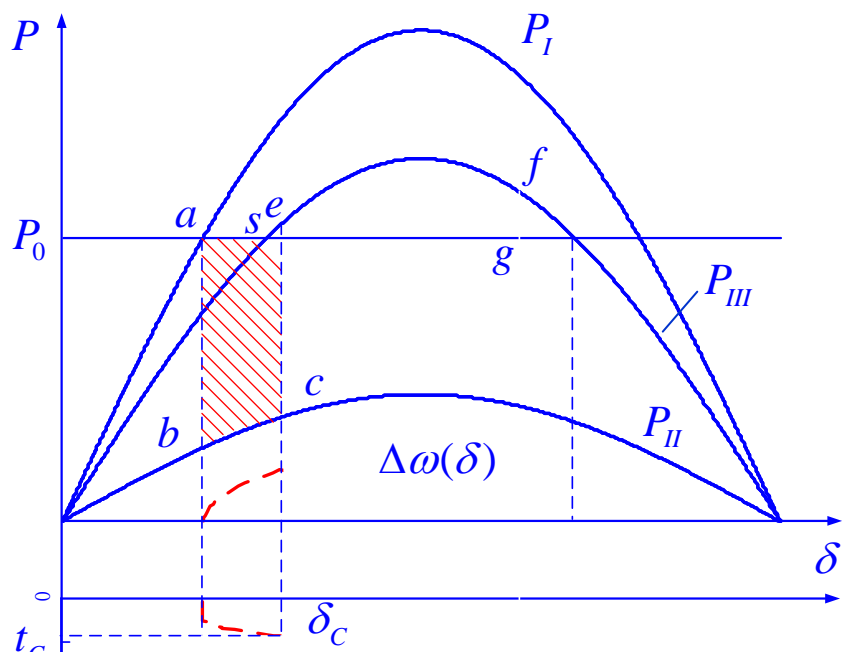
$$P_{mI} > P_{mII}$$

$$P_{mI} > P_{mIII}$$

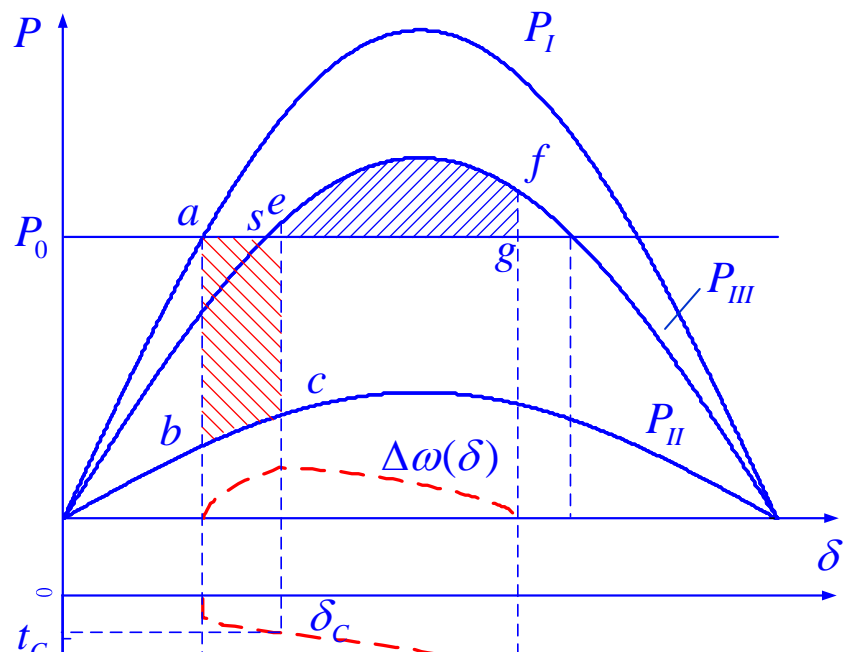


# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算—

## —大扰动后发电机转子的相对运动



	$a \rightarrow b \rightarrow c$
$\Delta\omega$	$0 \rightarrow \Delta\omega_{\max}$
$\delta$	$\delta_0 \rightarrow \delta_c$



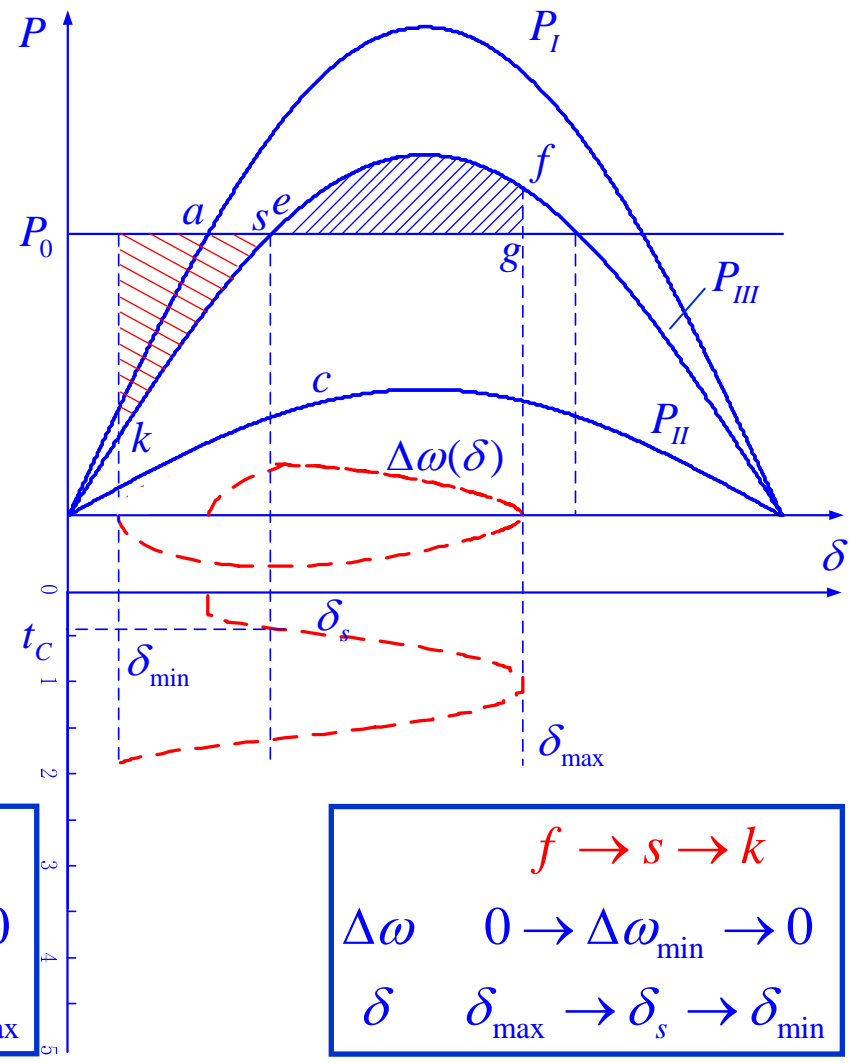
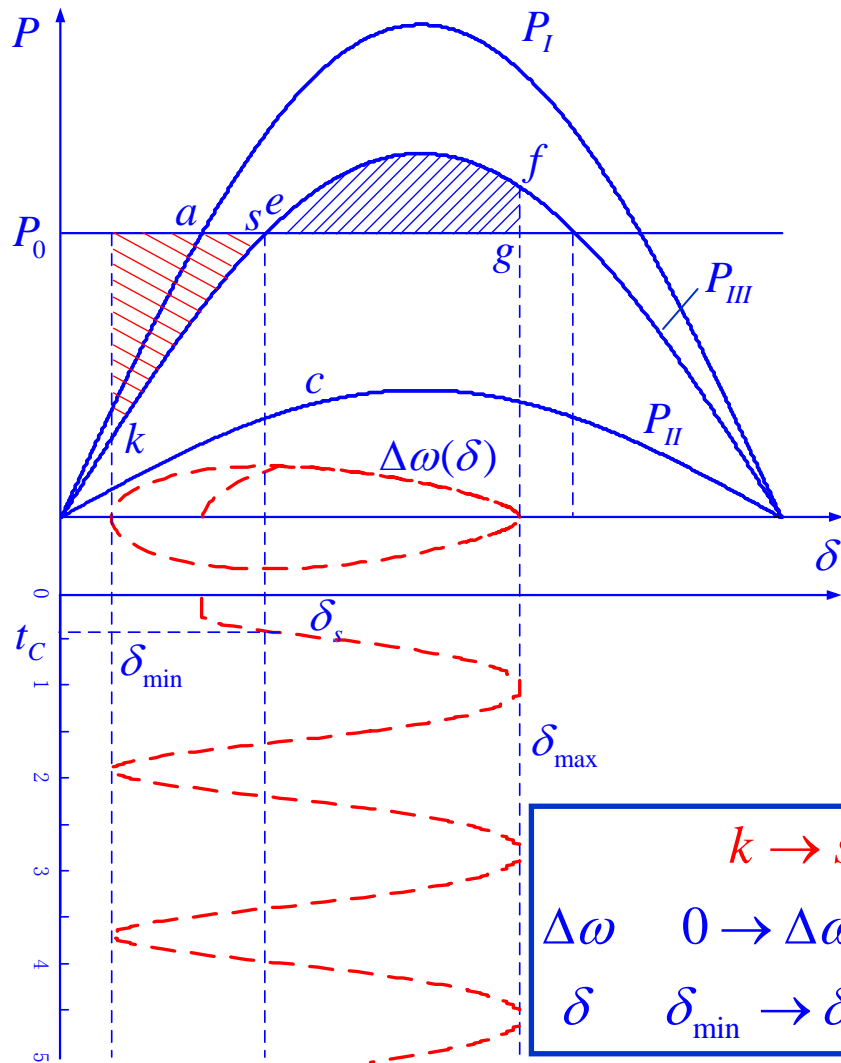
	$c \rightarrow e \rightarrow f$
$\Delta\omega$	$\Delta\omega_{\max} \rightarrow 0$
$\delta$	$\delta_c \rightarrow \delta_{\max}$

0  
1  
2  
3  
4  
5

0  
1  
2  
3  
4  
5

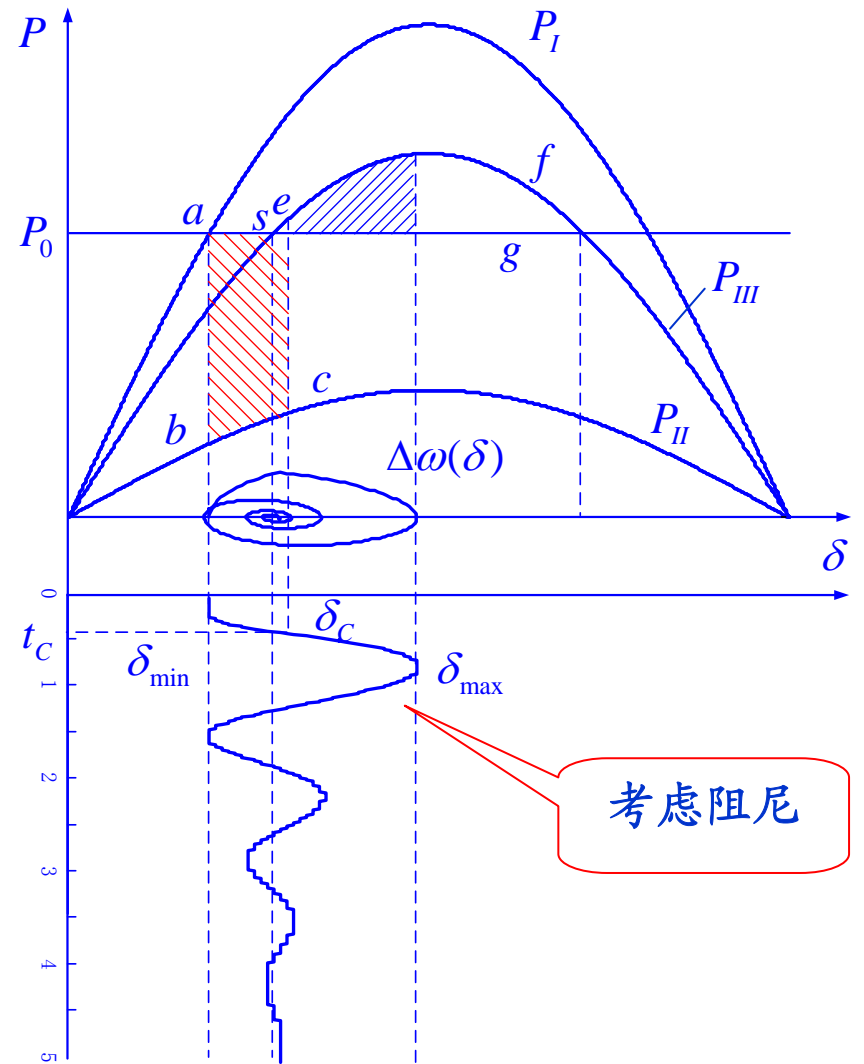
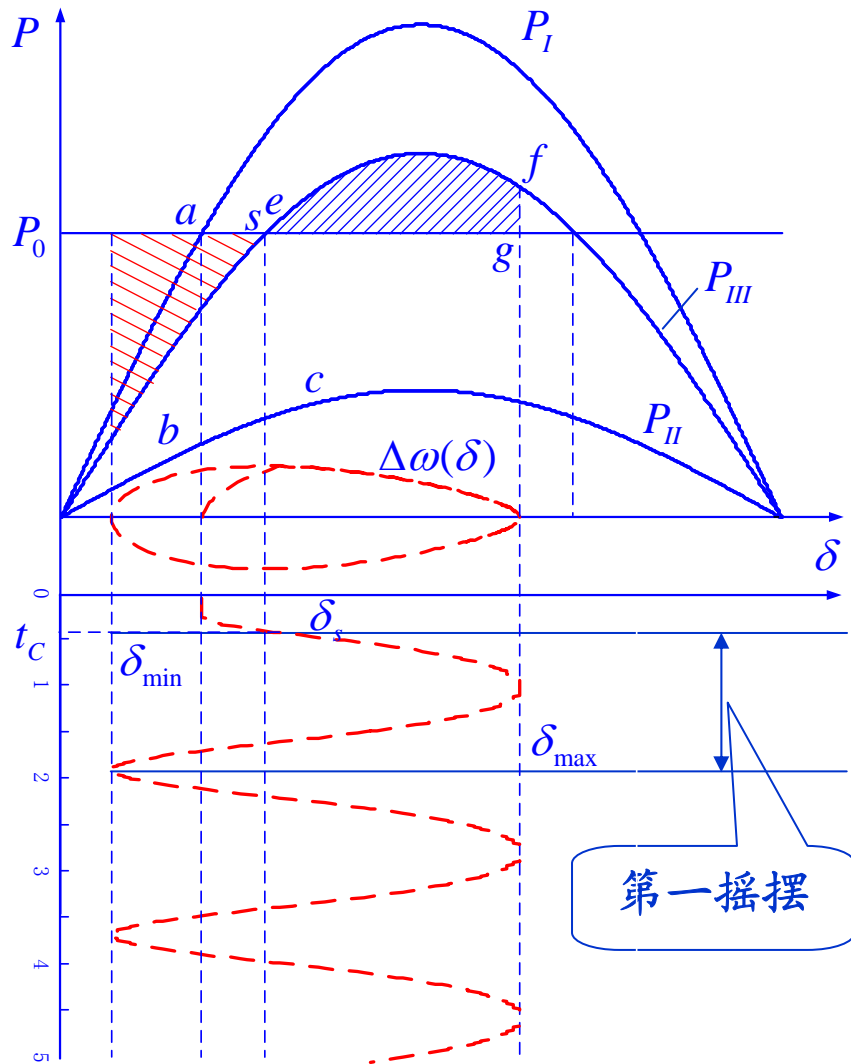
# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算—

## —大扰动后发电机转子的相对运动



# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算—

## —大扰动后发电机转子的相对运动



# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算

## □ 等面积定则

- ◆  $S_{abcd}$ ——加速面积，转子动能增加；
- ◆  $S_{defg}$ ——减速面积，转子动能减少；
- ◆  $S_{defg'}$ ——最大可能减速面积；

$$W_a = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta M_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \frac{\Delta P_a}{\omega} d\delta$$

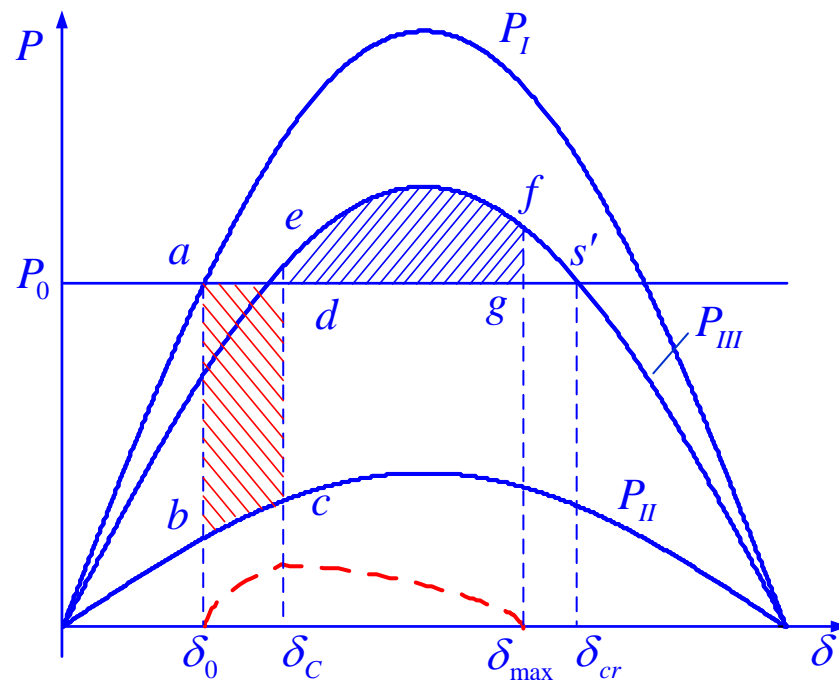
$$\approx \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta P_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta$$

$$W_b \approx \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} \Delta P_a d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta$$

$$W_{b \cdot \max} = S_{defg'} = \int_{\delta_c}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta$$

$$W_a + W_b = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta = 0$$



系统保持暂态稳定的条件：

$$|W_a| \leq |W_{b \cdot \max}|, \text{ 或 } W_a + W_{b \cdot \max} \leq 0$$



# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算

## □ 极限切除角

◆  $S_{abcd}$ ——加速面积，转子动能增加；

◆  $S_{des'}$ ——最大可能减速面积；

$$W_a + W_{b \cdot \max} = 0$$

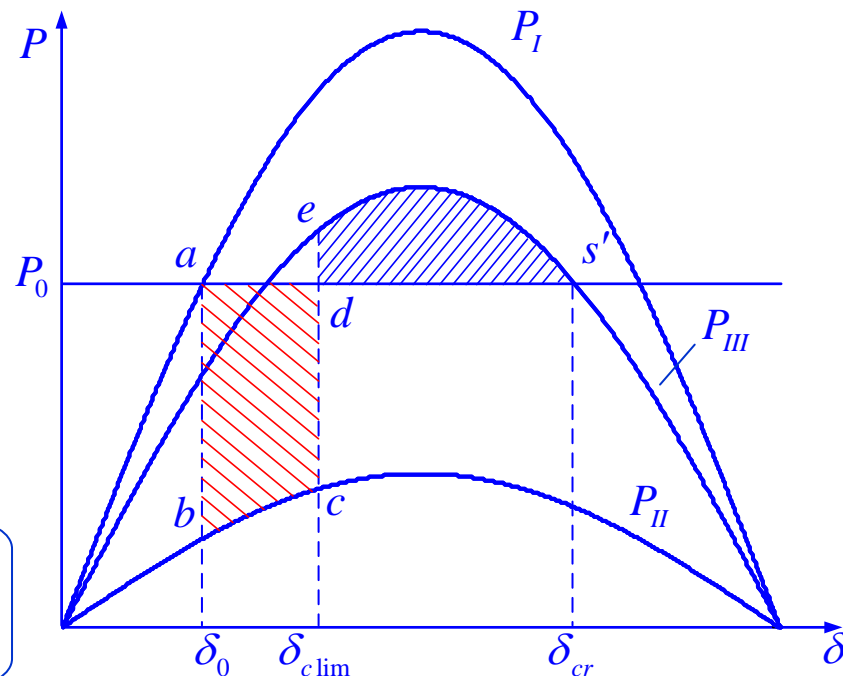
$$W_a = \int_{\delta_0}^{\delta_{c \lim}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta$$

$$W_{b \cdot \max} = \int_{\delta_{c \lim}}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{c \lim}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta$$

$$+ \int_{\delta_{c \lim}}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta = 0$$

功角单位  
为: rads



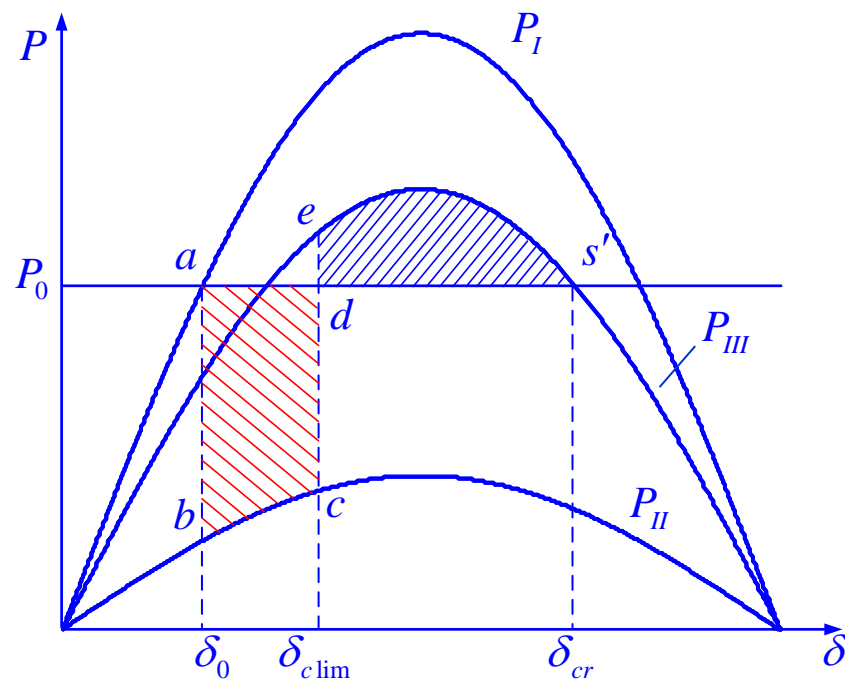
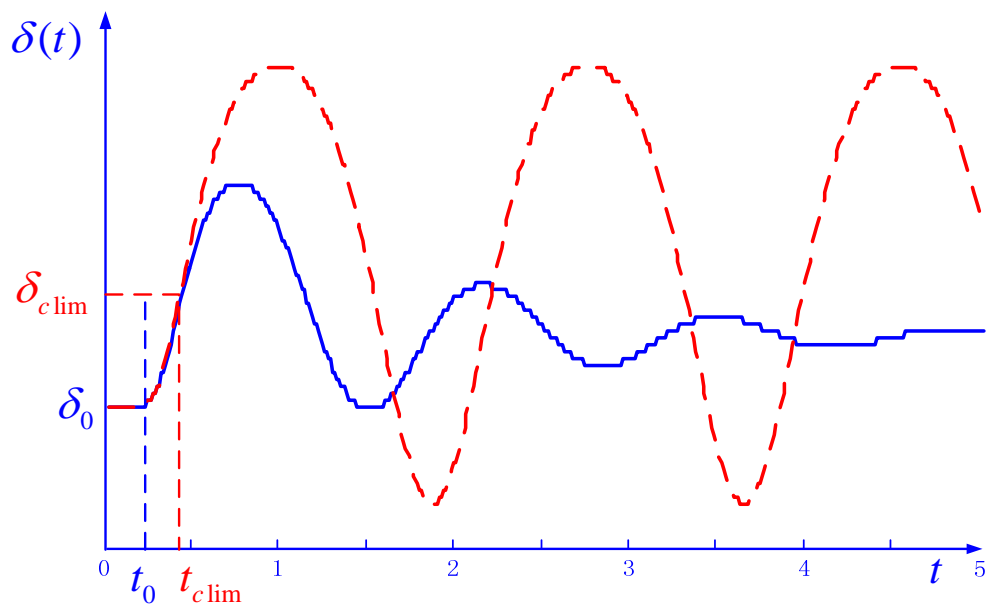
$$\delta_{c \lim} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}}$$

$$\delta_{cr} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{mIII}}$$

$$P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + (P_{mII} - P_{mIII}) \cos \delta_{c \lim} + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0 = 0$$

# 电力系统暂态稳定性—简单电力系统暂态稳定的分析计算

## □ 简单电力系统暂态稳定判断的极值比较法



$$\text{极限切除角: } \delta_{clim} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}}$$

$$\text{极限切除时间: } t_{clim} \leftarrow [\delta_{clim}, \delta(t)]$$

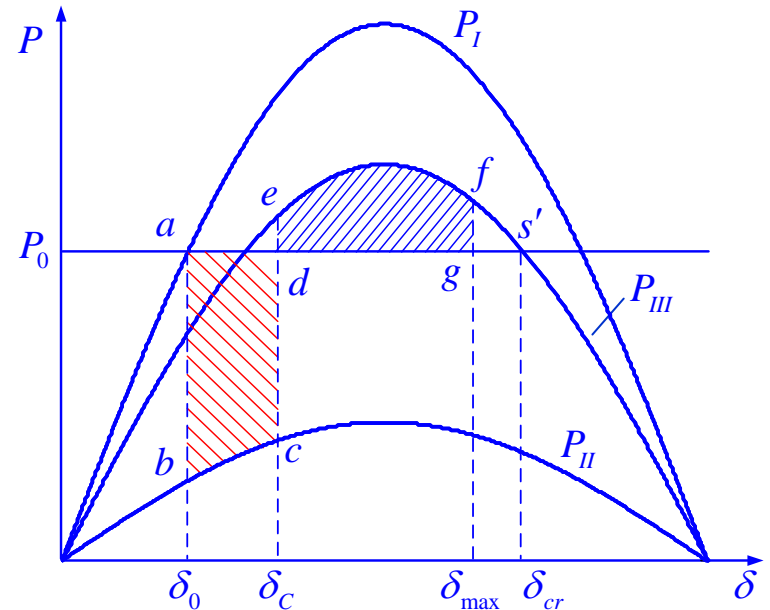
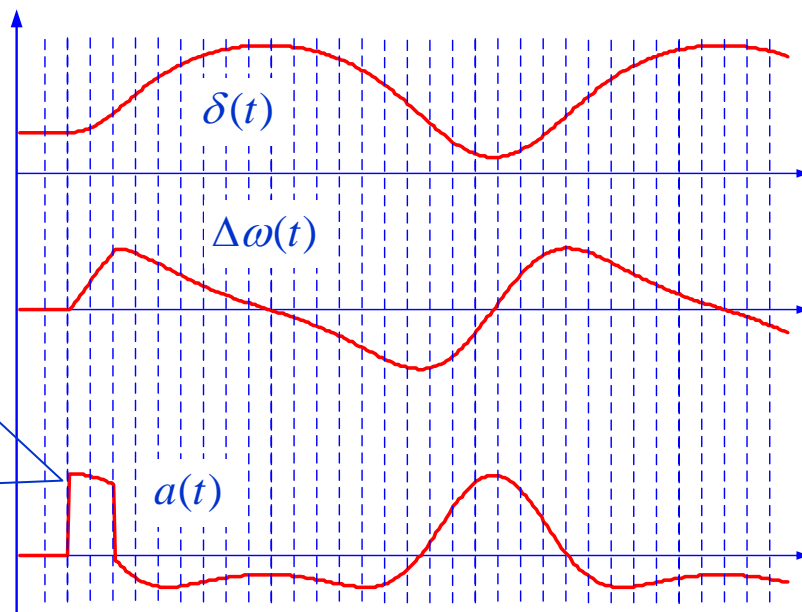
# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## □ 分段计算法

- ◆ 将计算时段（比如  $T=5s$ ）分为很小的区间，一般取区间间隔为  $0.01s$ ，称为计算步长；
- ◆ 每个步长区间内，近似认为转子作恒加速运动；

$$\frac{T_J}{\omega_N} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{1}{\omega} (P_T - P_e) = \frac{1}{\omega} (P_T - P_m \sin \delta) \Rightarrow a = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_N}{T_J} (P_T - P_m \sin \delta)$$

加速度与  
转子不平衡  
功率对应



# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## □ 分段计算法

- ◆ 将计算时段（比如  $T=5s$ ）分为很小的区间，一般取区间间隔为  $0.01s$ ，称为计算步长；
- ◆ 每个步长区间内，近似认为转子作恒加速运动；

$$a = \frac{\omega_N}{T_J} (P_T - P_m \sin \delta) \quad a\Delta t^2 = \frac{\omega_N}{T_J} \Delta t^2 \Delta P = K (P_T - P_m \sin \delta)$$

第  $k$  时段  $[t_k, t_{k+1}]$  —— 已知  $\delta_k$ , 计算  $\delta_{k+1}$

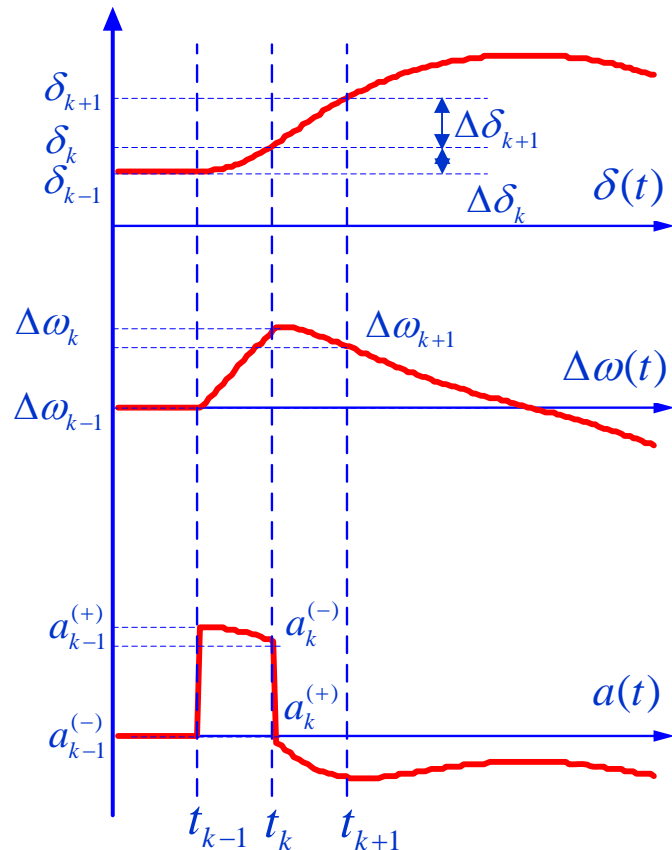
$$\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta_{k+1} \quad \Delta\delta_{k+1} = \Delta\omega_k \Delta t + \frac{1}{2} a_k^{(+)} \Delta t^2$$

$$\Delta\omega_k = \Delta\omega_{k-1} + \frac{1}{2} (a_{k-1}^{(+)} + a_k^{(-)}) \Delta t$$

$$\Delta\omega_k \Delta t = \Delta\omega_{k-1} \Delta t + \frac{1}{2} (a_{k-1}^{(+)} + a_k^{(-)}) \Delta t^2 = \Delta\delta_k + \frac{1}{2} a_k^{(-)} \Delta t^2$$

功角计算递推公式

$$\Delta\delta_{k+1} = \Delta\delta_k + \frac{1}{2} (a_k^{(-)} + a_k^{(+)}) \Delta t^2 = \Delta\delta_k + \frac{1}{2} K (\Delta P_k^{(-)} + \Delta P_k^{(+)})$$



# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## □ 分段计算法

- ◆ 将计算时段（比如  $T=5s$ ）分为很小的区间，一般取区间间隔为  $0.01s$ ，称为计算步长；
- ◆ 每个步长区间内，近似认为转子作恒加速运动；

$$a = \frac{\omega_N}{T_J} (P_T - P_m \sin \delta)$$

$$a \Delta t^2 = \frac{\omega_N}{T_J} \Delta t^2 \Delta P = K (P_T - P_m \sin \delta)$$

$$\Delta \delta_{k+1} = \Delta \delta_k + \frac{1}{2} (a_k^{(-)} + a_k^{(+)}) \Delta t^2 = \Delta \delta_k + \frac{1}{2} K (\Delta P_k^{(-)} + \Delta P_k^{(+)})$$

(1) 故障发生后的第1时段

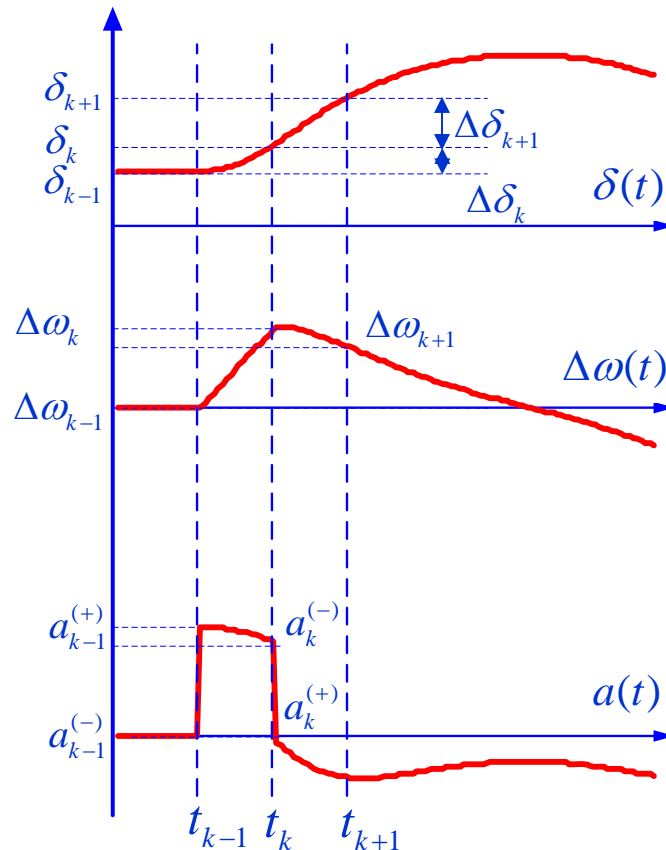
$$[t_0, t_1] \text{——} \delta_0, \quad \Delta P_0^{(-)} = 0, \quad \Delta P_0^{(+)} = (P_0 - P_{mII} \sin \delta_0)$$

$$\Delta \delta_1 = \Delta \delta_0 + \frac{1}{2} K (P_0 - P_{mII} \sin \delta_0), \quad \delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1$$

(2) 故障期间的第k时段

$$[t_k, t_{k+1}] \text{——} \delta_k, \quad \Delta P_k^{(-)} = \Delta P_k^{(+)} = (P_0 - P_{mII} \sin \delta_k)$$

$$\Delta \delta_{k+1} = \Delta \delta_k + K (P_0 - P_{mII} \sin \delta_k), \quad \delta_{k+1} = \delta_k + \Delta \delta_{k+1}$$



# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## □ 分段计算法

- ◆ 将计算时段（比如  $T=5s$ ）分为很小的区间，一般取区间间隔为  $0.01s$ ，称为计算步长；
- ◆ 每个步长区间内，近似认为转子作恒加速运动；

$$a = \frac{\omega_N}{T_J} (P_T - P_m \sin \delta)$$

$$a\Delta t^2 = \frac{\omega_N}{T_J} \Delta t^2 \Delta P = K (P_T - P_m \sin \delta)$$

$$\Delta\delta_{k+1} = \Delta\delta_k + \frac{1}{2} (a_k^{(-)} + a_k^{(+)}) \Delta t^2 \implies \Delta\delta_{k+1} = \Delta\delta_k + \frac{1}{2} K (\Delta P_k^{(-)} + \Delta P_k^{(+)})$$

(3) 故障切除后的第1时段

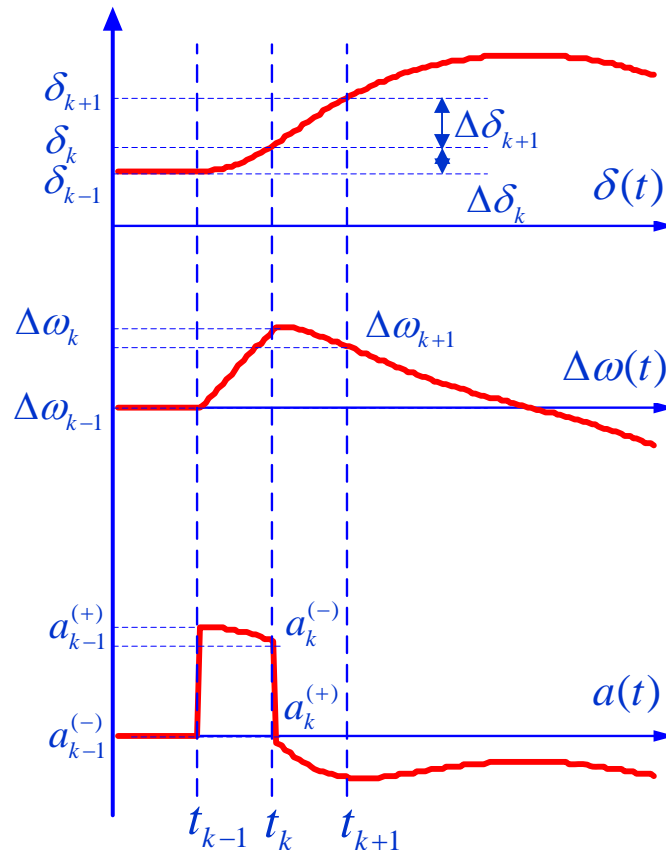
$$[t_k = t_c, t_{k+1}] \text{---} \Delta P_k^{(-)} = (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k), \Delta P_k^{(+)} = (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k)$$

$$\Delta\delta_{k+1} = \Delta\delta_k + KP_0 - \frac{1}{2} K (P_{mIII} + P_{mII}) \sin \delta_k, \quad \delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta_{k+1}$$

(4) 故障切除后的第k时段

$$[t_k, t_{k+1}] \text{---} \delta_k, \quad \Delta P_k^{(-)} = \Delta P_k^{(+)} = (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k)$$

$$\Delta\delta_{k+1} = \Delta\delta_k + K (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k), \quad \delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta_{k+1}$$



# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## 改进欧拉法算法原理

### 微分方程初值问题

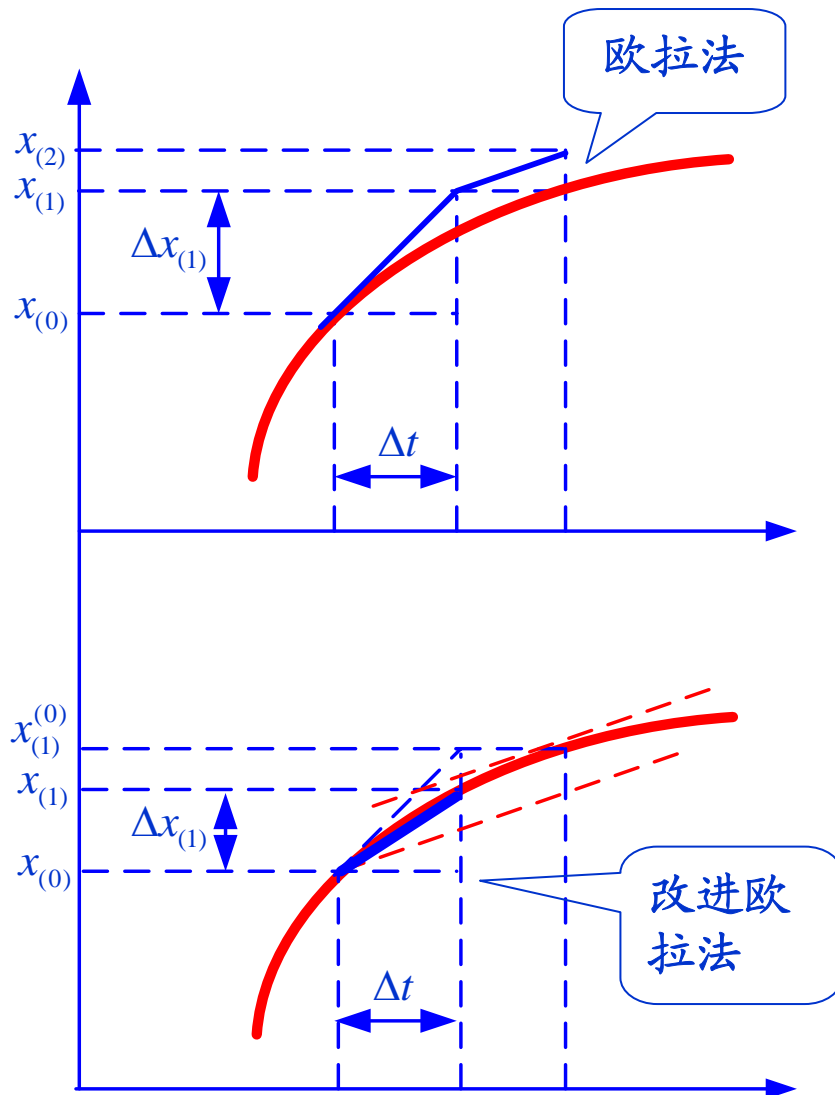
$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t)) \quad x(t_0) = x_0$$

$$\begin{cases} \left. \frac{dx}{dt} \right|_0 = f(x_0) \\ x_{(1)}^{(0)} = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_0 \Delta t \end{cases}$$

预估

校正

$$\begin{cases} \left. \frac{dx}{dt} \right|_1^{(0)} = f(x_{(1)}^{(0)}) \\ x_{(1)} = x_0 + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{dx}{dt} \right|_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_1^{(0)} \right] \Delta t \end{cases}$$



# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

## 改进欧拉法算法原理

### 改进欧拉法的递推公式

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t)) \quad x(t_0) = x_0$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{k-1} = f(x_{(k-1)})$$

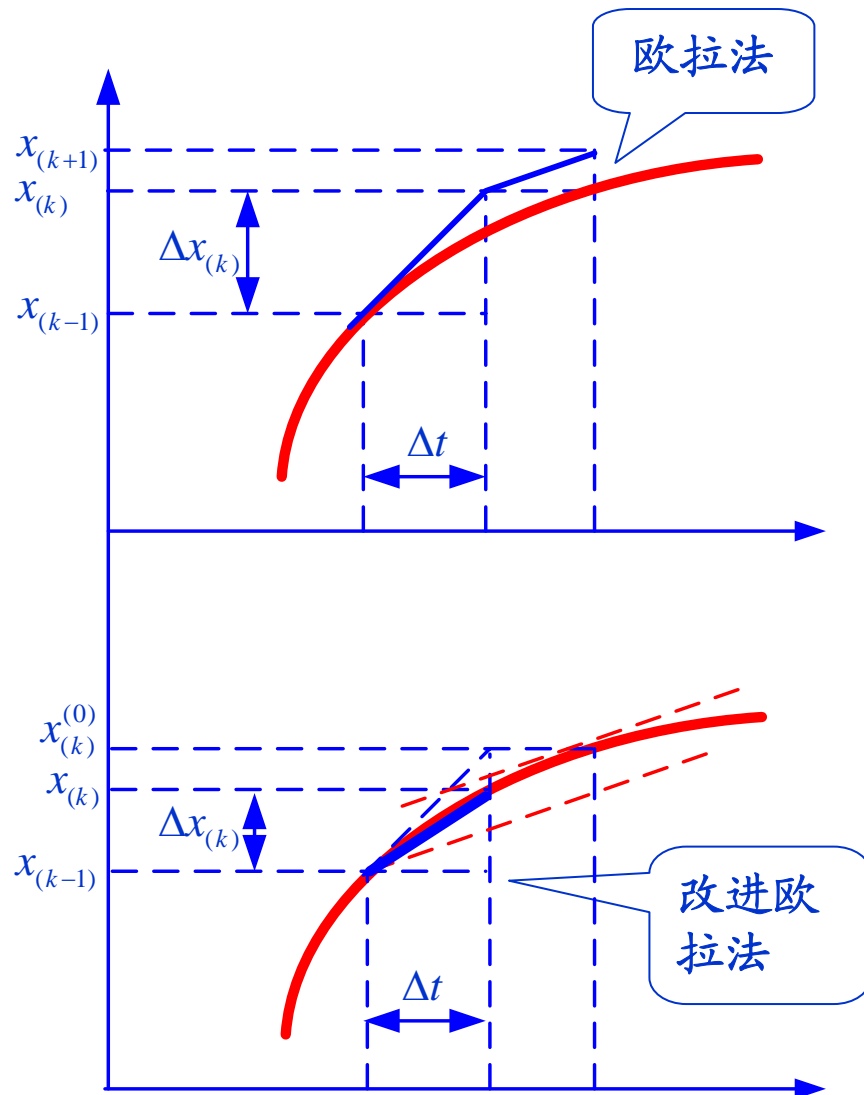
预估

$$x_{(k)}^{(0)} = x_{(k-1)} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{k-1} \Delta t$$

校正

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_k^{(0)} = f(x_{(k)}^{(0)})$$

$$x_{(k)} = x_{(k-1)} + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{dx}{dt} \right|_{k-1} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_k^{(0)} \right] \Delta t$$





# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_N = \Delta\omega = f_\delta(\delta, \Delta\omega) \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\omega_N}{T_J}(P_T - P_e) = f_\omega(\delta, \Delta\omega) \end{cases}$$

□ 改进欧拉法的递推公式

$$\begin{cases} \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} = f_\delta(\delta_{(k-1)}, \Delta\omega_{(k-1)}) = \Delta\omega_{(k-1)} \\ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} = f_\omega(\delta_{(k-1)}, \Delta\omega_{(k-1)}) = \frac{\omega_N}{T_J}(P_0 - P_m \sin \delta_{(k-1)}) \\ \delta_{(k)}^{(0)} = \delta_{(k-1)} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} \Delta t \\ \Delta\omega_{(k)}^{(0)} = \Delta\omega_{(k-1)} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} \Delta t \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_k^{(0)} = f_\delta(\delta_{(k)}^{(0)}, \Delta\omega_{(k)}^{(0)}) = \Delta\omega_{(k)}^{(0)} \\ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_k^{(0)} = f_\omega(\delta_{(k)}^{(0)}, \Delta\omega_{(k)}^{(0)}) = \frac{\omega_N}{T_J}(P_0 - P_m \sin \delta_{(k)}^{(0)}) \\ \delta_{(k)} = \delta_{(k-1)} + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_k^{(0)} \right] \Delta t \\ \Delta\omega_{(k)} = \Delta\omega_{(k-1)} + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_k^{(0)} \right] \Delta t \end{cases}$$

- ◆ 改进欧拉法与分段计算法精确度相同，对简单电力系统（包括某些多机电力系统的简化计算），分段计算法计算量小得多

# 电力系统暂态稳定性—发电机转子运动方程的数值解法

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_N = \Delta\omega = f_\delta(\delta, \Delta\omega) \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\omega_N}{T_J}(P_T - P_e) = f_\omega(\delta, \Delta\omega) \end{cases}$$

□ 改进欧拉法的递推公式

$$\begin{cases} \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} = f_\delta(\delta_{(k-1)}, \Delta\omega_{(k-1)}) = \Delta\omega_{(k-1)} \\ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} = f_\omega(\delta_{(k-1)}, \Delta\omega_{(k-1)}) = \frac{\omega_N}{T_J}(P_0 - P_m \sin \delta_{(k-1)}) \\ \delta_{(k)}^{(0)} = \delta_{(k-1)} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} \Delta t \\ \Delta\omega_{(k)}^{(0)} = \Delta\omega_{(k-1)} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} \Delta t \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_k^{(0)} = f_\delta(\delta_{(k)}^{(0)}, \Delta\omega_{(k)}^{(0)}) = \Delta\omega_{(k)}^{(0)} \\ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_k^{(0)} = f_\omega(\delta_{(k)}^{(0)}, \Delta\omega_{(k)}^{(0)}) = \frac{\omega_N}{T_J}(P_0 - P_m \sin \delta_{(k)}^{(0)}) \\ \delta_{(k)} = \delta_{(k-1)} + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{k-1} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_k^{(0)} \right] \Delta t \\ \Delta\omega_{(k)} = \Delta\omega_{(k-1)} + \frac{1}{2} \left[ \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{k-1} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_k^{(0)} \right] \Delta t \end{cases}$$

- ◆ 对系统扰动（故障/操作）发生后的第1个时间段的计算，改进欧拉法直接按扰动发生后的网络计算电磁功率；不同于分段算法

# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-1)

- 一回线路首端f点发生三相短路；0.1秒后线路两端断路器跳闸；判断系统暂态稳定性

- ◆ Step1 各种状态下的系统等值电路及发电机对系统转移阻抗

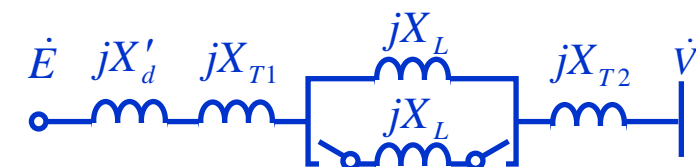
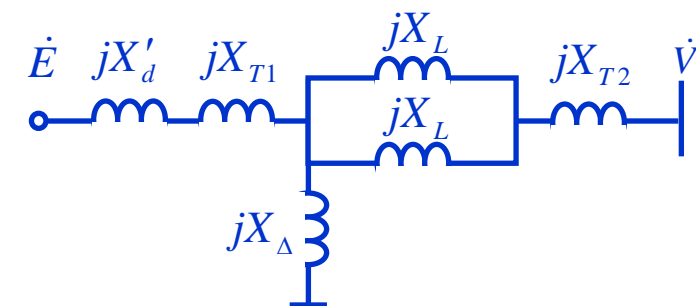
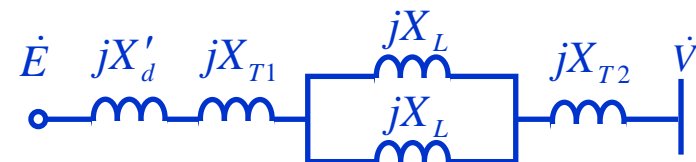
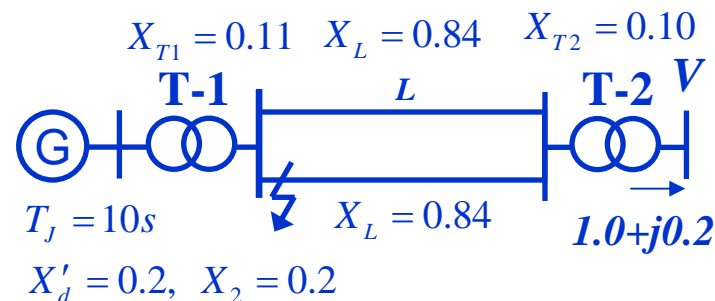
$$X_I = X'_d + X_{T1} + X_L/2 + X_{T2} = 0.83$$

$$X_{II} = X_I + \frac{(X'_d + X_{T1}) \left( \frac{X_L}{2} + X_{T2} \right)}{X_\Delta} = \infty$$

$$X_{III} = X'_d + X_{T1} + X_L + X_{T2} = 1.25$$

- ◆ Step2 计算正常状态下的发电机电势与功角

$$E = \sqrt{\left( V + \frac{QX_I}{V} \right)^2 + \left( \frac{PX_I}{V} \right)^2} = 1.4312$$



# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-1)

## ◆ Step2 计算正常状态下的发电机电势与功角

$$E = \sqrt{\left(V + \frac{QX_I}{V}\right)^2 + \left(\frac{PX_I}{V}\right)^2} = 1.4312$$

$$\delta_0 = \arctg\left(\frac{PX_I}{V}\right) / \left(V + \frac{QX_I}{V}\right) = 0.6186(\text{rads})$$

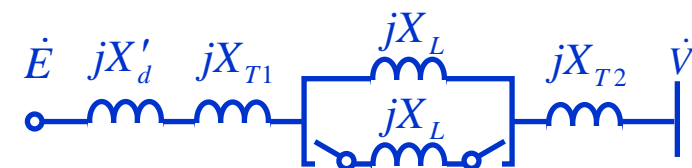
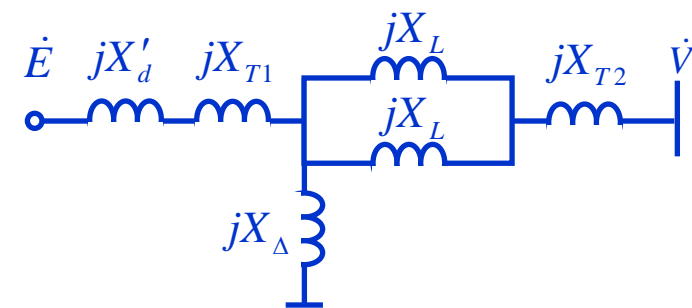
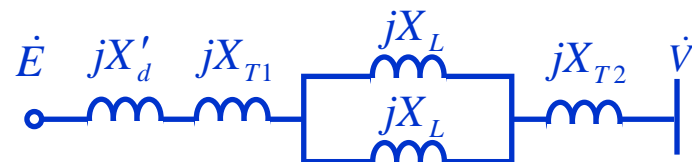
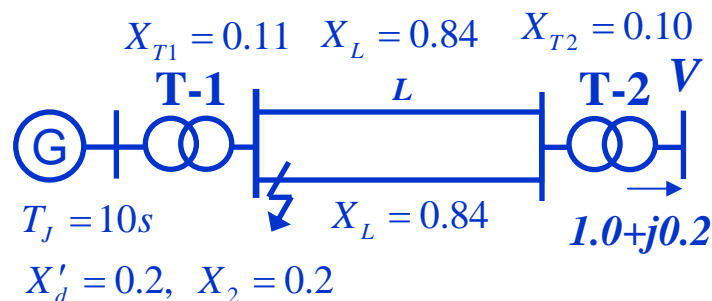
$$\delta_0 = 35.4446^\circ$$

## ◆ Step3 各种状态下的发电机电磁功率特性

$$P_I = \frac{EV}{X_I} \sin \delta = P_{mI} \sin \delta = 1.7244 \sin \delta$$

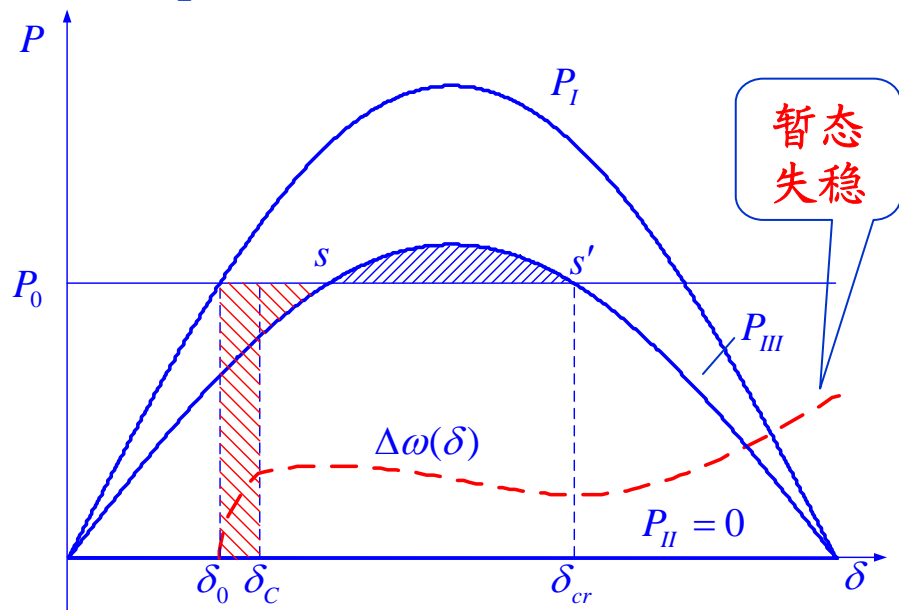
$$P_{II} = \frac{EV}{X_{II}} \sin \delta = P_{mII} \sin \delta = 0$$

$$P_{III} = \frac{EV}{X_{III}} \sin \delta = P_{mIII} \sin \delta = 1.1450 \sin \delta$$



# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-1)

## ◆ Step4 绘制发电机各种状态下的功率特性



## ◆ Step5 计算极限切除角

$$\delta_{cr} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{mIII}} = 2.0795(\text{rads}) = 119.1477^\circ$$

$$\delta_{c\text{lim}} = \arccos \frac{P_0(\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}} = 37.9233^\circ$$

## ◆ Step6 计算故障切除时刻发电机的功角—应用分段计算法;

(1) 故障发生后的第1时段

$$[t_0, t_1] \text{---} \delta_0, \quad \Delta P_0^{(-)} = 0, \quad \Delta P_0^{(+)} = (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_0)$$

$$\Delta \delta_1 = \Delta \delta_0 + \frac{1}{2} K (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_0), \quad \delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1$$

(2) 故障期间各时段—直到故障切除时刻 t<sub>c</sub>

$$[t_k, t_{k+1}] \text{---} \delta_k, \quad \Delta P_k^{(-)} = \Delta P_k^{(+)} = (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k)$$

$$\Delta \delta_{k+1} = \Delta \delta_k + K (P_0 - P_{mIII} \sin \delta_k), \quad \delta_{k+1} = \delta_k + \Delta \delta_{k+1}$$

$$\delta_c = \delta_0 + \frac{1}{2} \frac{\omega_N}{T_j} \Delta P \Delta t^2$$

$$= \delta_0 + \frac{1}{2} \frac{314.159}{10} \times 1.0 \times 0.1^2 = 44.4446^\circ$$

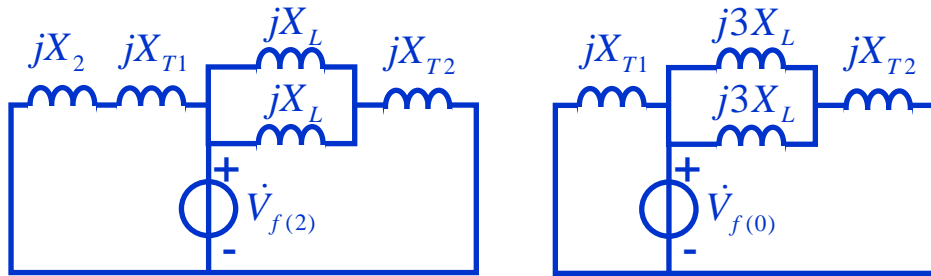
## Step7 极值判别法

$$\delta_{c\text{lim}} = 37.9233^\circ < \delta_c$$

# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-3)

- 一回线路首端f点发生两相短路接地；0.1秒后线路两端断路器跳闸；判断系统暂态稳定性

- ◆ Step1 各种状态下的系统等值电路及发电机对系统转移阻抗

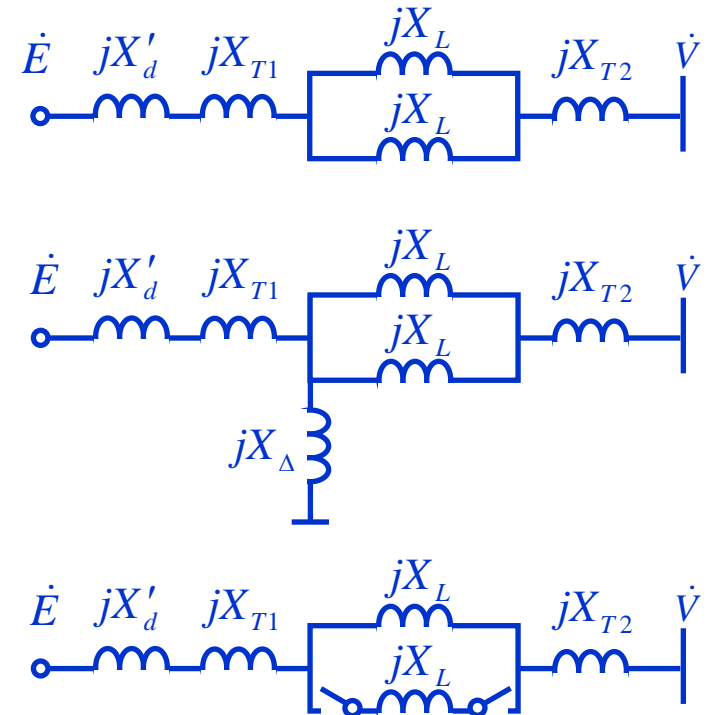
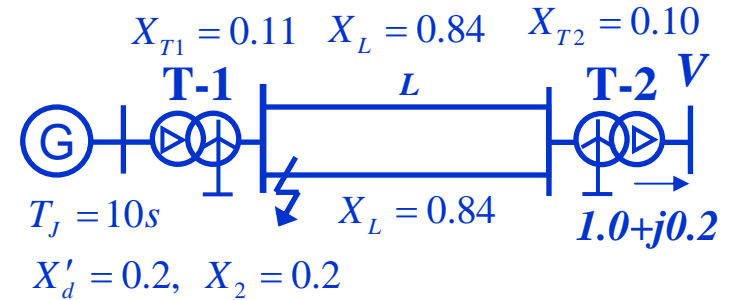


$$X_{2\Sigma} = (X_2 + X_{T1}) // (X_L/2 + X_{T2}) = 0.2019$$

$$X_{0\Sigma} = X_{T1} // (3X_L/2 + X_{T2}) = 0.1018$$

$$X_{\Delta} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 0.0677$$

$$X_I = 0.83 \quad X_{II} = 3.2125 \quad X_{III} = 1.25$$



# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-3)

## ◆ Step2 计算正常状态下的发电机电势与功角

$$E = \sqrt{\left(V + \frac{QX_I}{V}\right)^2 + \left(\frac{PX_I}{V}\right)^2} = 1.4312$$

$$\delta_0 = \arctg\left(\frac{PX_I}{V}\right) / \left(V + \frac{QX_I}{V}\right) = 0.6186(\text{rads})$$

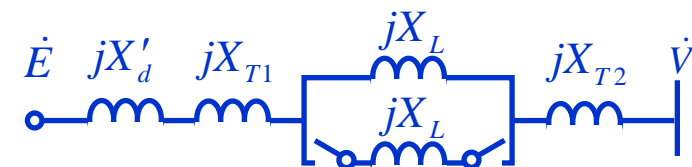
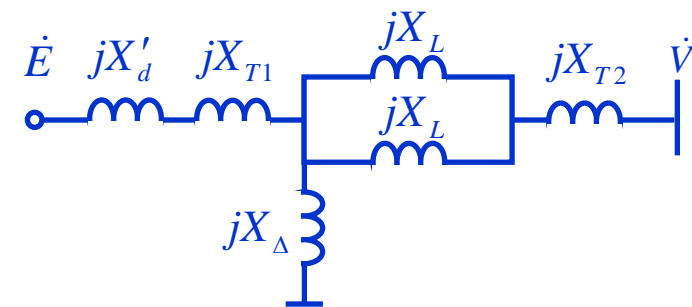
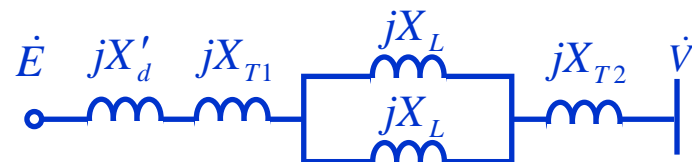
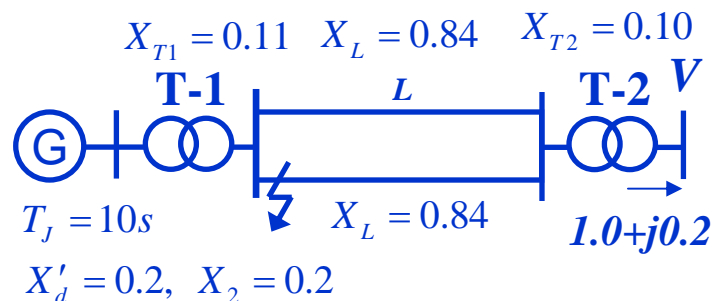
$$\delta_0 = 35.4446^\circ$$

## ◆ Step3 各种状态下的发电机电磁功率特性

$$P_I = \frac{EV}{X_I} \sin \delta = P_{mI} \sin \delta = 1.7244 \sin \delta$$

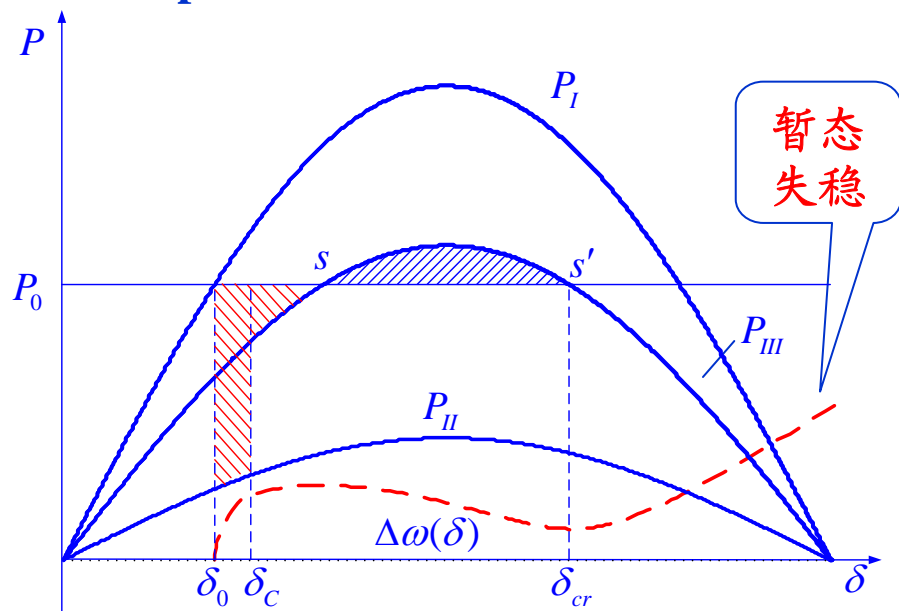
$$P_{II} = \frac{EV}{X_{II}} \sin \delta = P_{mII} \sin \delta = 0.4455 \sin \delta$$

$$P_{III} = \frac{EV}{X_{III}} \sin \delta = P_{mIII} \sin \delta = 1.1450 \sin \delta$$



# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-3)

◆ Step4 绘制发电机各种状态下的功率特性



◆ Step6 计算故障切除时刻发电机的功角—应用改进欧拉法;

$t$ (s)	$\delta$ ( $^{\circ}$ )	$\Delta \omega$ (rad/s)
0.20	35.44460481	0.00000000
0.22	35.71155419	0.46571556
0.24	36.51126412	0.92931766
0.26	37.84012097	1.38874532
0.28	39.69220260	1.84204421
<b>0.30</b>	<b>42.05943262</b>	<b>2.28742333</b>

◆ Step5 计算极限切除角

$$\delta_{cr} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{mIII}} = 2.0795(\text{rads}) = 119.1477^{\circ}$$

Step7 极值判别法

$$\delta_{clim} = 39.4325^{\circ} < \delta_c = 42.0594^{\circ}$$

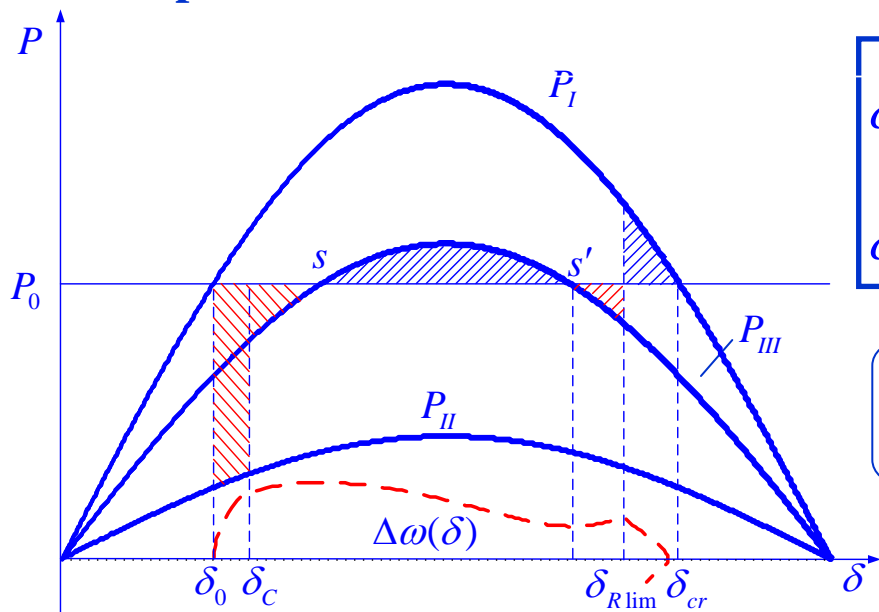
$$\delta_{clim} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}} = 39.4325^{\circ}$$



# 电力系统暂态稳定性—暂态稳定分析计算举例(Ex19-3)

◆ Step8 若采用自动重合闸成功，求极限重合闸角和极限重合时间

$$t_{Rlim} = 0.945s$$



$$\delta_{cr} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{mI}} = 2.5230(\text{rads}) = 144.5554^\circ$$

$$\delta_c = 0.7341(\text{rads}) = 42.0594^\circ$$

$t$ (s)	$\delta$ ( $^\circ$ )	$\Delta \omega$ (rad/s)
$t_{Rlim}$ 1.14	131.1138	1.4750
1.15	131.9713	1.5199
1.16	132.8556	1.5685

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_{Rlim}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{Rlim}}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{mI} \sin \delta) d\delta = 0$$

$$P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + (P_{mII} - P_{mIII}) \cos \delta_c - P_{mII} \cos \delta_0 + (P_{mIII} - P_{mI}) \cos \delta_{Rlim} + P_{mI} \cos \delta_{cr} = 0$$

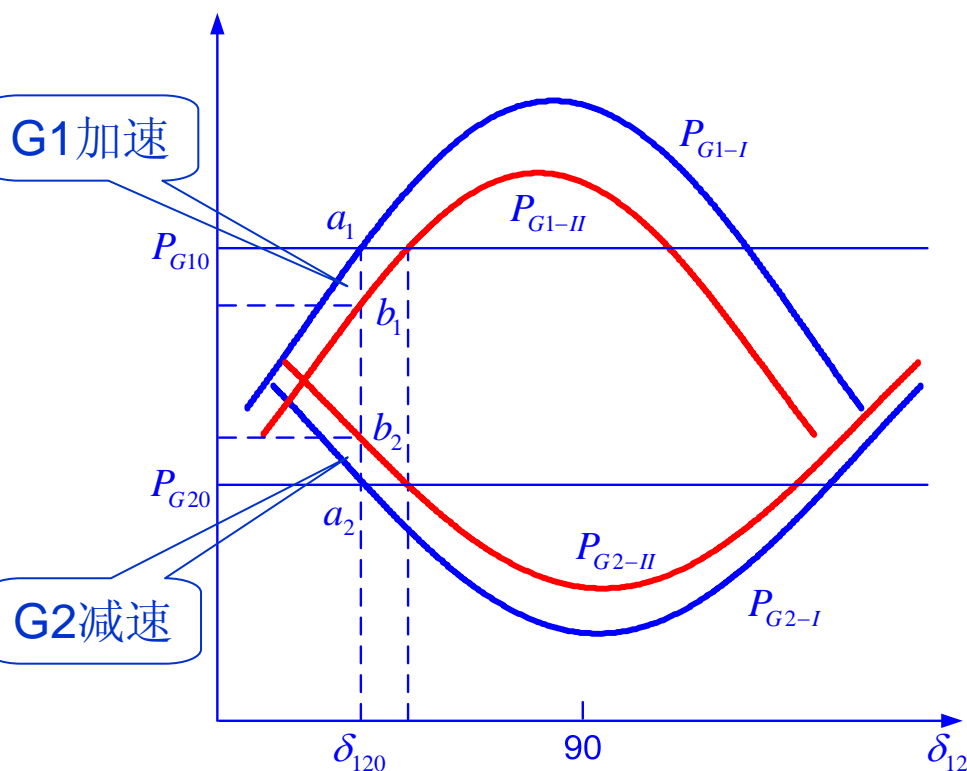
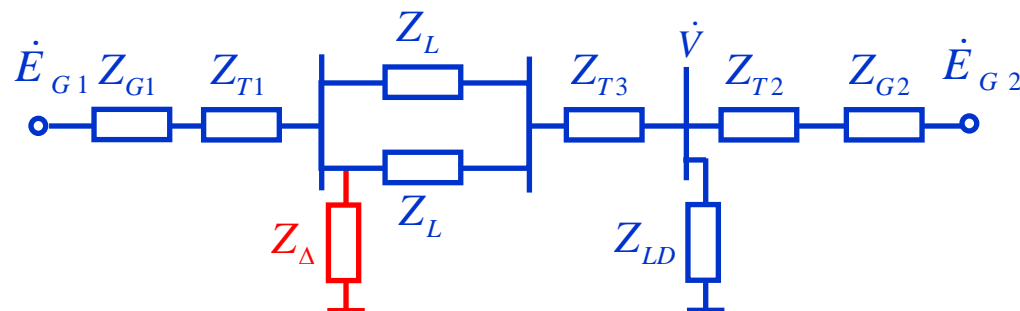
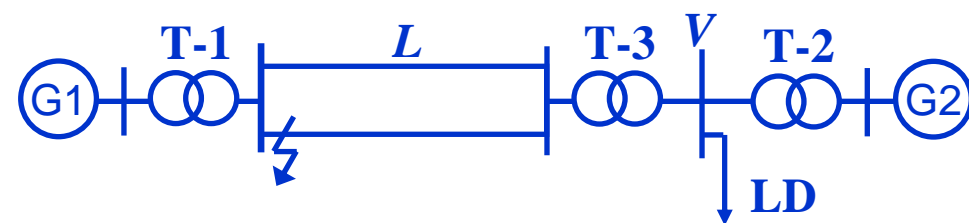
$$\delta_{Rlim} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) + (P_{mII} - P_{mIII}) \cos \delta_c - P_{mII} \cos \delta_0 + P_{mI} \cos \delta_{cr}}{P_{mI} - P_{mIII}} = 131.3486^\circ$$

# 电力系统暂态稳定性—复杂电力系统暂态稳定的分析计算

## 复杂电力系统大扰动后各发电机转子运动的特点

$$P_{G1-I} = \frac{E_{G1}^2}{|Z_{11-I}|} \sin \alpha_{11-I} + \frac{E_{G1}E_{G2}}{|Z_{12-I}|} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12-I})$$

$$P_{G2-I} = \frac{E_{G2}^2}{|Z_{22-I}|} \sin \alpha_{22-I} - \frac{E_{G1}E_{G2}}{|Z_{12-I}|} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12-I})$$



- ◆ 发生大扰动时，各发电机输出电磁功率按照扰动后的网络特性重新分配；
- ◆ 有的发电机承受因电磁功率小于原动机力矩而加速，有的则反之；

# 电力系统暂态稳定性—复杂电力系统暂态稳定的分析计算

## □ 复杂电力系统暂态稳定的近似计算

### ◆ 经典模型

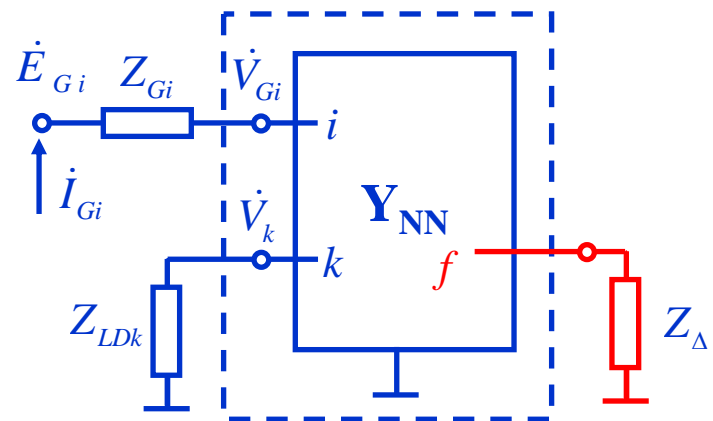
◆ 发电机用暂态电抗后的暂态电势表示

◆ 负荷用恒定阻抗表示

◆ 不计原动机的调节作用， $P_{Ti}=\text{常数}$

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_N = \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_N}{T_{ji}} (P_{Ti} - P_{ei}), \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$
$$P_{ei} = \frac{E_{Gi}^2}{|Z_{ii}|} \sin \alpha_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{E_{Gi} E_{Gj}}{|Z_{ij}|} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij})$$

◆ 稳定性判据：发电机之间功角差变化趋势，（**工程计算判据： $>180^\circ$** ）；



◆ 计算初始潮流，确定各发电机电势、功角、电磁功率等变量的初值；

◆ 确定系统扰动发生时刻（故障时刻、故障切除时刻、重合闸时刻，等），计算各种状态下的发电机电磁功率；

◆ 采用分段算法/改进欧拉法计算各发电机功角随时间变化的曲线；

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

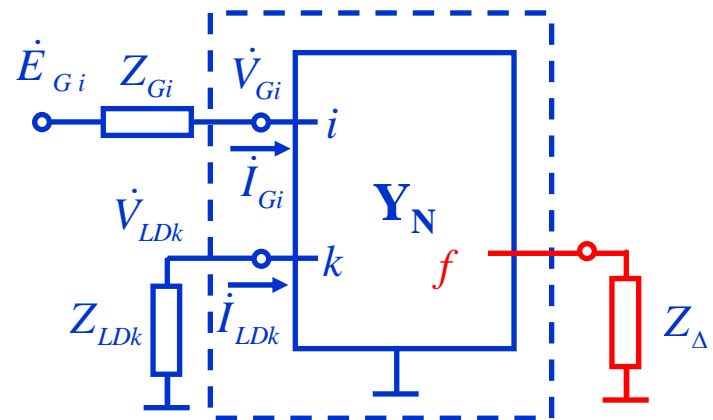
□ **问题1:** 如何计算各种网络状态下的系统  
所有发电机的电磁功率

◆ 建立网络方程—— $\mathbf{I}=\mathbf{Y}_N\mathbf{V}$ ;  $\mathbf{Y}_N$ 只包括网络元件, 不包括发电机电抗和负荷;

◇ 选取空间同步旋转的参考坐标系 $\mathbf{XY}$ , 将网络方程写为实数方程;

◇  $2n$ 个方程,  $4n$ 个变量: 各节点电压电流

◇ 分别按照发电机节点、负荷节点、中间节点列写节点电压与节点注入电流之间关系的边界条件 ( $2n$ 个)



◇ 综合边界条件, 求解网络方程, 计算各发电机机端电压电流

$$P_{ei} = V_{Gix} I_{Gix} + V_{Giy} I_{Giy} + (I_{Gix}^2 + I_{Giy}^2) R_{Gi}$$

$$I_{ix} + jI_{iy} = \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij})(V_{jx} + jV_{jy})$$

$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

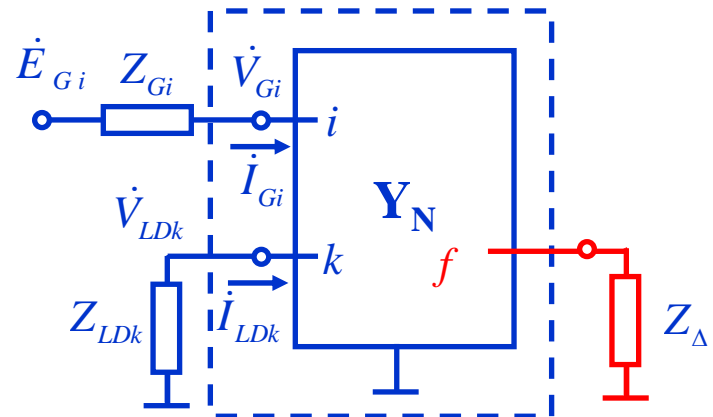
$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_N = \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_N}{T_{Ji}} (P_{Ti} - P_{ei}), \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

□ 问题2: 如何综合各节点边界条件, 建立网络方程, 计算各发电机机端电压电流

◆ 建立网络方程—— $I=Y_N V$ ;  $Y_N$ 只包括网络元件, 不包括发电机电抗和负荷;

$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

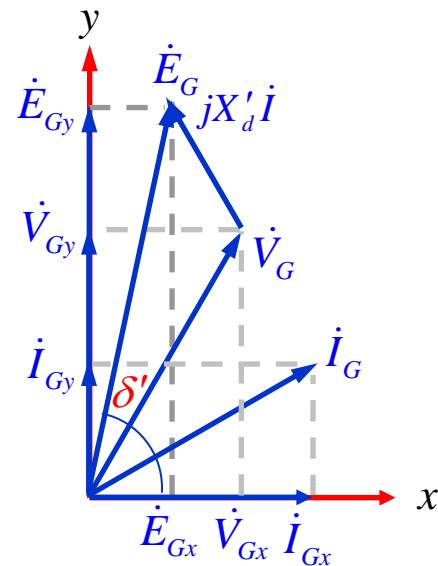


◆ 发电机定子电压方程: 采用经典模型

$$\begin{bmatrix} I_{Gix} \\ I_{Giy} \end{bmatrix} = \frac{1}{X'_d} \begin{bmatrix} E_{Gi} \sin \delta - V_{Giy} \\ -E_{Gi} \cos \delta + V_{Gix} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} E_{Gix} + jE_{Giy} &= (V_{Gix} + jV_{Giy}) \\ &+ j(I_{Gix} + jI_{Giy})X'_d \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Gix} \\ I_{Giy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta / X'_d \\ -\cos \delta / X'_d \end{bmatrix} E_{Gi} - \begin{bmatrix} 0 & 1/X'_d \\ -1/X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gix} \\ V_{Giy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin \delta / X'_d \\ -\cos \delta / X'_d \end{bmatrix} E_{Gi} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1/X'_d \\ -1/X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix}$$

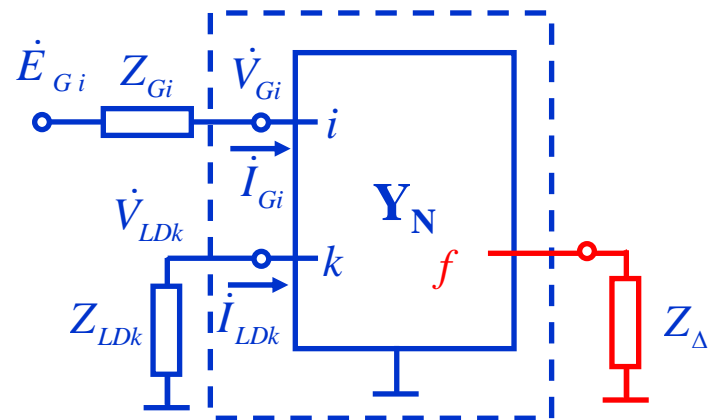


# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

□ 问题2: 如何综合各节点边界条件, 建立网络方程, 计算各发电机机端电压电流

◆ 建立网络方程—— $I=Y_N V$ ;  $Y_N$ 只包括网络元件, 不包括发电机电抗和负荷;

$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,\dots,n)$$



◆ 发电机定子电压方程: 采用经典模型

$$\begin{bmatrix} \sin \delta / X'_d \\ -\cos \delta / X'_d \end{bmatrix} E_{Gi} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1/X'_d \\ -1/X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin \delta / X'_d \\ -\cos \delta / X'_d \end{bmatrix} E_{Gi} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii} + 1/X'_d \\ B_{ii} - 1/X'_d & G_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

◆ 中间浮游节点: 无发电机和负荷接入, 注入电流为零

$$\begin{bmatrix} I_{mx} \\ I_{my} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

□ 问题2: 如何综合各节点边界条件, 建立网络方程, 计算各发电机机端电压电流

◆ 建立网络方程—— $I=Y_N V$ ;  $Y_N$ 只包括网络元件, 不包括发电机电抗和负荷;

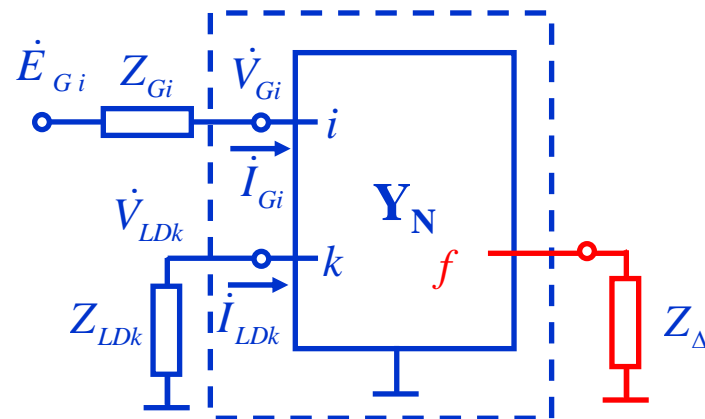
$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

◆ 负荷电压方程: 负荷采用恒定阻抗模型

$$\begin{bmatrix} I_{kx} \\ I_{ky} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_{LDk} & -B_{LDk} \\ B_{LDk} & G_{LDk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{LDk} & -B_{LDk} \\ B_{LDk} & G_{LDk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1, j \neq k}^n \begin{bmatrix} G_{kj} & -B_{kj} \\ B_{kj} & G_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{kk} + G_{LDk} & -B_{kk} - B_{LDk} \\ B_{kk} + B_{LDk} & G_{kk} + G_{LDk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \end{bmatrix} \quad (2)$$



$$Y_{LDk}^* = S_{LDk0} / V_{LDk0}^2 = G_{LDk} + jB_{LDk}$$

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

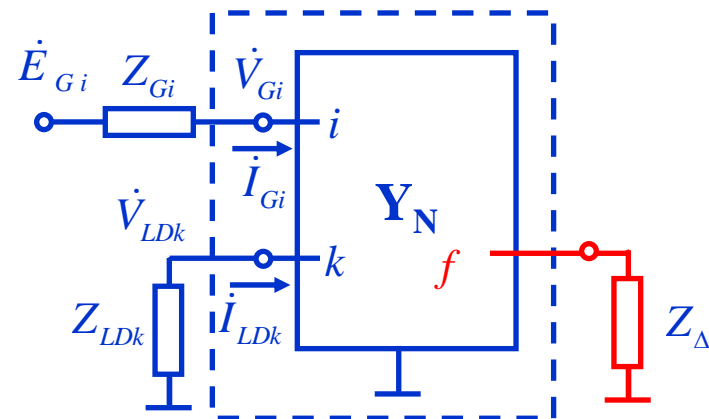
- 问题2: 如何综合各节点边界条件, 建立网络方程, 计算各发电机机端电压电流

$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \sin \delta / X'_d \\ -\cos \delta / X'_d \end{bmatrix} E_{Gi} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii} + 1/X'_d \\ B_{ii} - 1/X'_d & G_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1, j \neq k}^n \begin{bmatrix} G_{kj} & -B_{kj} \\ B_{kj} & G_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{kk} + G_{LDk} & -B_{kk} - B_{LDk} \\ B_{kk} + B_{LDk} & G_{kk} + G_{LDk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \end{bmatrix} \quad (2)$$



- ◆ 1. 根据当前时刻的功角, 计算各发电机的计算注入电流, 即式 (1) 等式左边项;
- ◆ 2. 求解网络方程, 计算机端电压, 然后由发电机电压方程计算机端电流;



# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

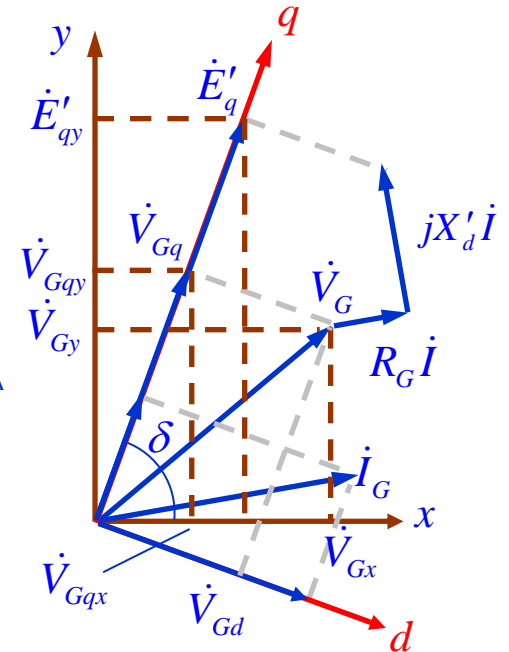
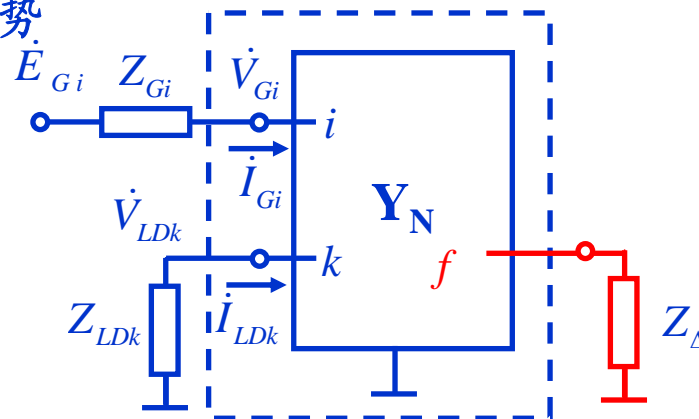
问题3: 如何考虑更精确地发电机方程式

发电机定子电压方程: 采用暂态电势

$$\begin{bmatrix} E'_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X'_d \\ -X_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Gx} \\ V_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gx} \\ V_{Gy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} E'_q$$



$$\begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \end{bmatrix}$$

$$G_x = \frac{R_G + (X_q - X'_d) \sin \delta \cos \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

$$G_y = \frac{R_G - (X_q - X'_d) \sin \delta \cos \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

$$B_x = \frac{X'_d + (X_q - X'_d) \sin^2 \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

$$B_y = - \frac{X'_d + (X_q - X'_d) \cos^2 \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

$$C_x = \frac{R_G \cos \delta + X_q \sin \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

$$C_y = - \frac{R_G \sin \delta - X_q \cos \delta}{R_G^2 + X_q X'_d}$$

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

□ 问题3: 如何考虑更精确地发电机方程式

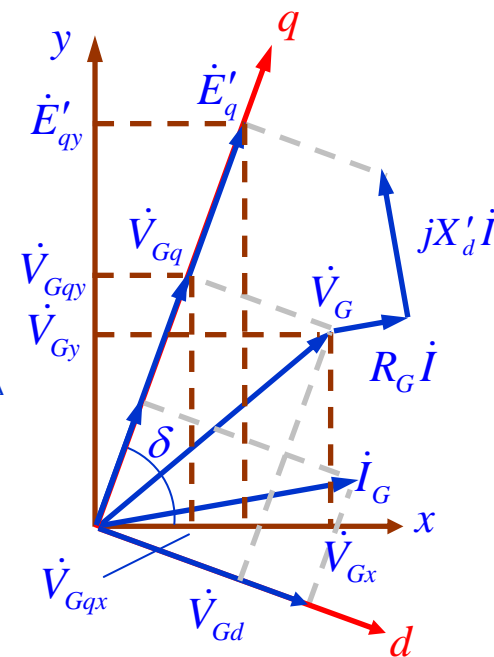
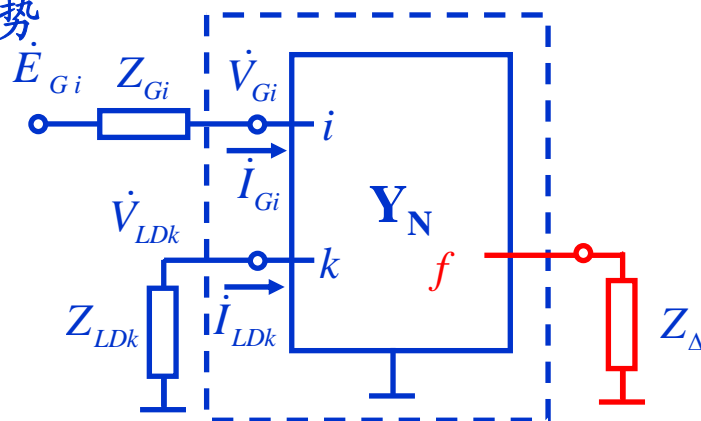
◆ 发电机定子电压方程: 采用暂态电势

$$\begin{bmatrix} E'_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X'_d \\ -X_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Gx} \\ V_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gx} \\ V_{Gy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} E'_q \quad \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} E'_q = \sum_{j=1, j \neq i}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{ii} + G_{ix} & -B_{ii} + B_{ix} \\ B_{ii} + B_{iy} & G_{ii} + G_{iy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix} \quad (1)$$



◆ 可以认为暂态电势恒定; 也可以认为暂态电势变化, 即计及发电机励磁绕组回路的动态特性;

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

问题3: 如何考虑更精确地发电机方程式

用于暂态稳定计算的发电机三阶模型

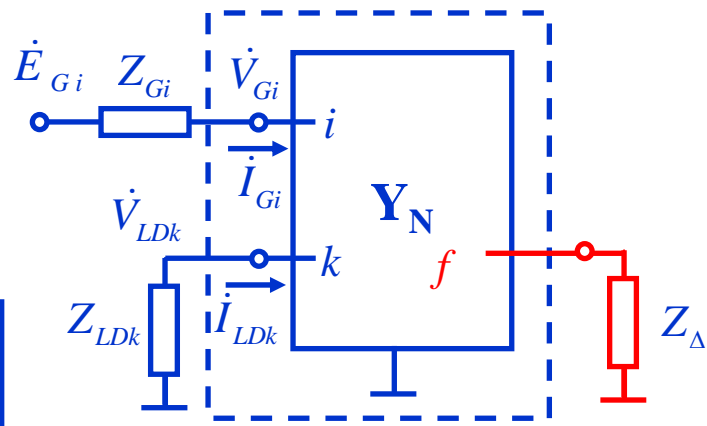
$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_N = \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_N}{T_{ji}} (P_{Ti} - P_{ei}) \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{qe} - E_q) \end{cases}$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \times \frac{X_{ad}}{R_f}$$

$$\frac{u_f}{R_f} X_{ad} = i_f X_{ad} + \frac{X_f}{R_f} \frac{d}{dt} \left( \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f \right)$$

$$E_{qe} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$i_{fe} X_{ad} = i_f X_{ad} + \frac{X_f}{R_f} \frac{dE'_q}{dt}$$



$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} E'_q = \sum_{j=1, j \neq i}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{ii} + G_{ix} & -B_{ii} + B_{ix} \\ B_{ii} + B_{iy} & G_{ii} + G_{iy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1, j \neq k}^n \begin{bmatrix} G_{kj} & -B_{kj} \\ B_{kj} & G_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{jx} \\ V_{jy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{kk} + G_{LDk} & -B_{kk} - B_{LDk} \\ B_{kk} + B_{LDk} & G_{kk} + G_{LDk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \end{bmatrix} \quad (2)$$

交替求解方法

求解微分方程，计算发电机功角和暂态电势

解代数方程，计算发电机电磁功率

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

问题3: 如何考虑更精确地发电机方程式

用于暂态稳定计算的发电机五阶模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_N = \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_N}{T_{Ji}} (P_{Ti} - P_{ei}) \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{qe} - E_q) \end{cases}$$

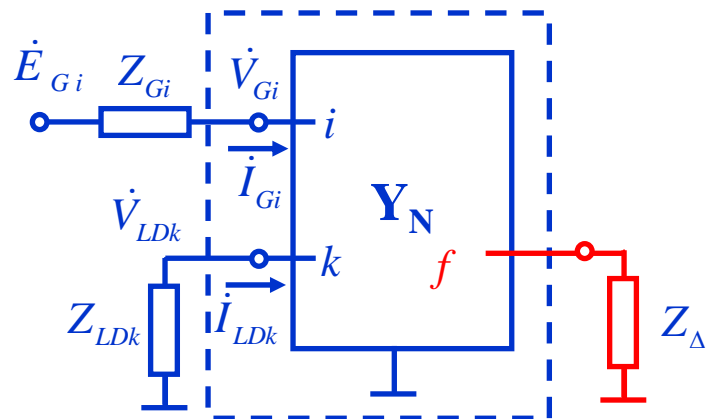
$$\begin{bmatrix} E''_q \\ E''_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X''_d \\ -X''_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E'_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X'_d \\ -X_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X_d \\ -X_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} u_d = \dot{\psi}_d + \psi_q - r i_d \\ u_q = -\dot{\psi}_q + \psi_d - r i_q \\ u_f = \dot{\psi}_f + r_f i_f \\ 0 = \dot{\psi}_D + r_D i_D \\ 0 = \dot{\psi}_Q + r_Q i_Q \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E'_q &= \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f & E''_d &= \frac{x_{aq}}{x_Q} \psi_Q \\ E''_q &= \frac{X_{ad} (X_{\sigma D} \psi_f + X_{\sigma f} \psi_D)}{X_f X_D - X_{ad}^2} \end{aligned}$$



- ◆ 发电机五阶模型
- ◇ 忽略定子绕组暂态;
- ◇ 用暂态和次暂态电势表示转子绕组方程;
- ◇ 转子运动方程2阶, 发电机转子绕组方程3阶

# 电力系统暂态稳定性—电力系统暂态稳定的实际计算

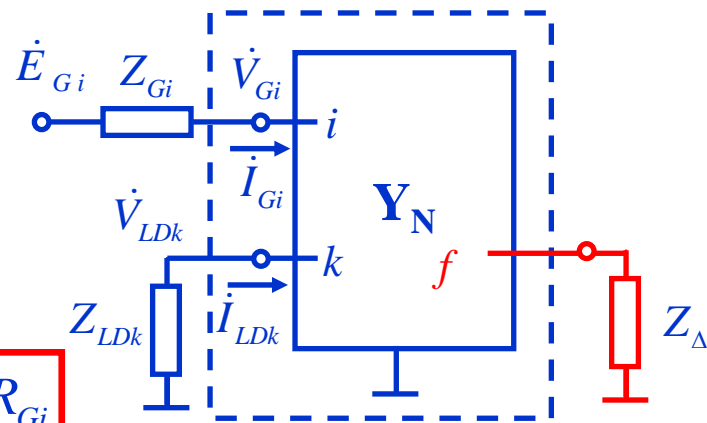
问题3: 如何考虑更精确地发电机方程式

用于暂态稳定计算的发电机五阶模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_N = \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_N}{T_{ji}} (P_{Ti} - P_{ei}) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} E''_q \\ E''_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_G & X''_d \\ -X''_q & R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$P_{ei} = V_{Gix} I_{Gix} + V_{Giy} I_{Giy} + (I_{Gix}^2 + I_{Giy}^2) R_{Gi}$$



$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \left[ E_{qe} - \frac{X_d - X_{\sigma a}}{X'_d - X_{\sigma a}} E'_q + \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_{\sigma a}} E''_q - \frac{(X_d - X'_d)(X''_d - X_{\sigma a})}{X'_d - X_{\sigma a}} I_{Gd} \right]$$

$$\frac{dE''_q}{dt} = \frac{1}{T''_{d0}} \left[ \frac{X''_d - X_{\sigma a}}{X'_d - X_{\sigma a}} T''_{d0} \frac{dE'_q}{dt} - E''_q + E'_q - (X'_d - X''_d) I_{Gd} \right]$$

$$\frac{dE''_d}{dt} = -\frac{1}{T''_{q0}} \left[ E''_d + (X''_q - X_q) I_{Gq} \right]$$

$$\begin{bmatrix} V_{Gx} \\ V_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gq} \\ V_{Gd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Gq} \\ I_{Gd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \end{bmatrix}$$

常用发电机参数:  $R_a$   $X_{\sigma a}$   $X_d$   $X'_d$   $X''_d$   $X_q$   $X''_q$   $T'_{d0}$   $T''_{d0}$   $T''_{q0}$   $E'_q$   $E''_q$   $E''_d$

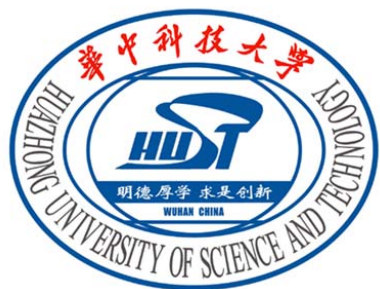


# 华中科技大学

Huazhong University of  
Science and Technology

## 本章小结

- ◇ 暂态稳定的判别依据是并列运行发电机转子之间的相对位置角（相对功角）在扰动发生后随时间变化的趋势，为此需求解转子运动方程式；
- ◇ 由于发电机转子运动具有机械惯性，暂态稳定计算时常采用简化假设，忽略对转子运动影响不大的快速变化过程，要理解各种简化假设条件成立的原因；
- ◇ 等面积定则可用于简单电力系统暂态稳定性的分析，该方法具有物理概念明确的优点，但是对于3机及以上的多机系统，该方法难以应用；
- ◇ 基于等面积定则的简单电力系统暂态稳定性极值判别法，包括转子运动方程的数值解法，是本科课程要求掌握的基本内容，学生应能做到熟练应用；



# 华中科技大学

Huazhong University of  
Science and Technology

## 本章小结

- ✧ 复杂电力系统暂态稳定的实用计算中，将发电机微分方程与网络方程分开交替求解，这样网络结构变化时可以方便地修改系统参数，同时可以考虑任意详细的发电机和负荷模型，易于编程实现；
- ✧ 网络方程是只考虑系统工频正序电压电流数学关系的代数方程，相应地，发电机Park中，定子绕组电压方程忽略变压器电势，也为代数方程
- ✧ 暂态稳定计算中常用的发电机数学模型包括经典模型、三阶模型、五阶模型，应理解其微分方程阶数的物理涵义；
- ✧ 要注意发电机方程按照自身dq0坐标系列写和求解，网络方程以全网统一的同步旋转坐标系列写，发电机定子电压方程需作坐标变换后方可与网络方程联立求解（教材称为发电机数学模型与网络方程的接口）；



华中科技大学

Huazhong University of  
Science and Technology

习题

**Ex 17-1, 17-2, 17-6**

补充题：考虑暂态电势 $E'_q$ 为常数，列写复杂电力系统暂态稳定计算的程序流程，给出相应的计算公式

行百里者半九十！





華中科技大學

Huazhong University of  
Science and Technology

---

**To be continued**