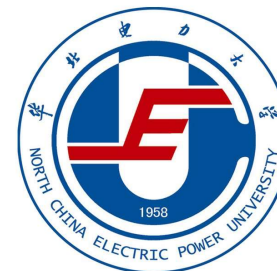


# 即将直播授课



腾讯课堂  
喊你来学习  
刘崇茹的课堂



扫码上课

雨课堂邀请码ZMCQON

- 下载腾讯课堂学生端APP：  
<https://ke.qq.com/s>
- 扫码进课
- 也可以看回放
- 进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：  
我的一最近看过—刘崇茹的课堂
- 请将昵称改为：学号姓名

# 提高电力系统的静态稳定性的措施

---

## ■ 电力系统静态稳定性的基本性质

- 发电机可能输送的功率极限愈高，则静态稳定性越高。
- 稳定储备系数：

$$K_p = \frac{P_M - P_0}{P_0} \times 100\%$$

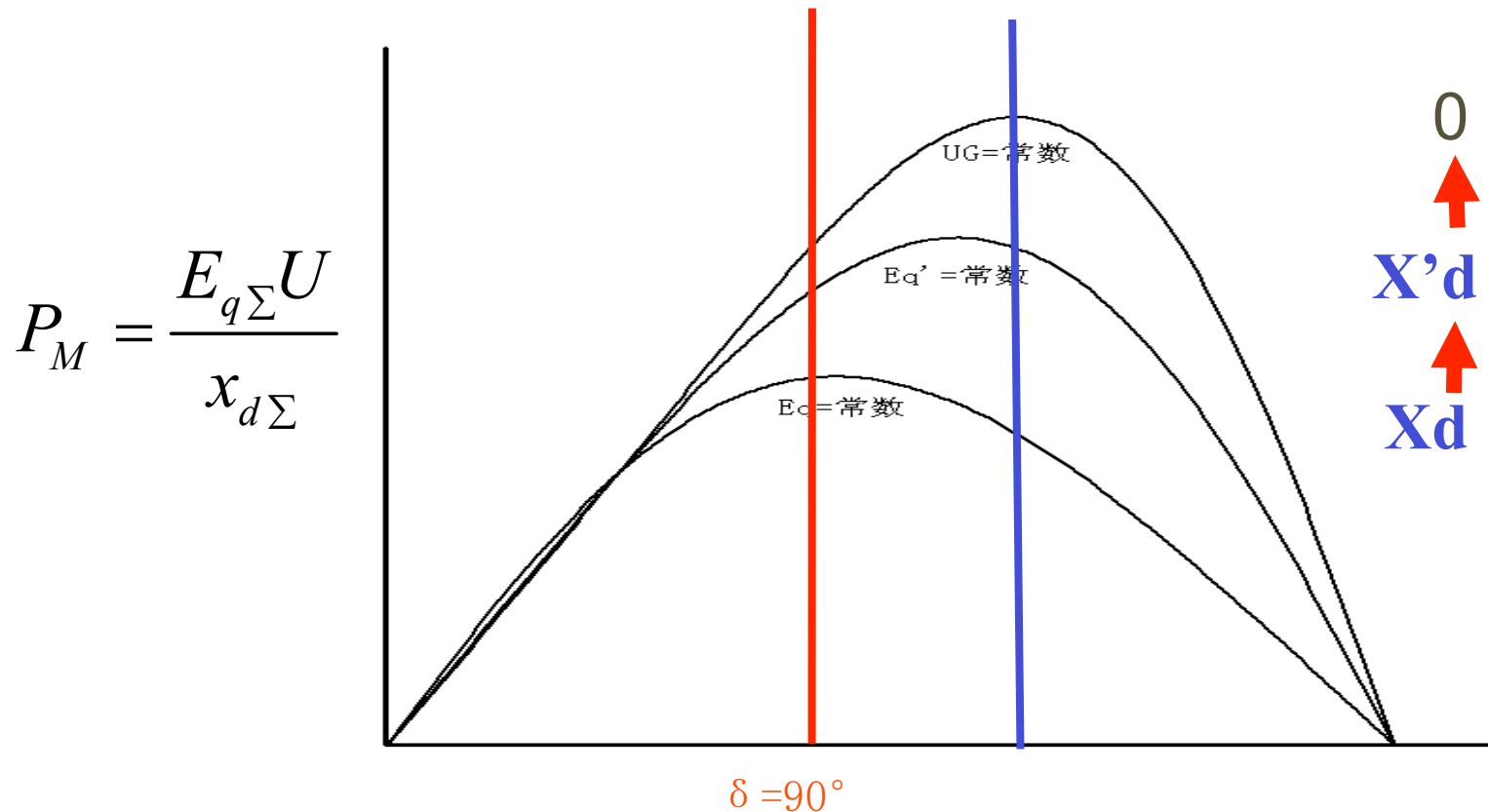
## ■ 以单机无限大系统的情形看

$$P_M = \frac{E_{q\Sigma} U}{x_{d\Sigma}}$$

- 有两种办法提高系统的稳定性：①增大电压；②缩短“电气距离”，也就是减小各元件的阻抗，主要是电抗。

# 采用自动励磁调节装置

- 有两种办法提高系统的稳定性：①增大电压；②缩短“电气距离”，也就是减小各元件的阻抗，主要是电抗。



# 减小元件电抗

- 有两种办法提高系统的稳定性：①增大电压；②缩短“电气距离”，也就是减小各元件的阻抗，主要是电抗。

$$P_M = \frac{E_{q\Sigma} U}{x_{d\Sigma}}$$

减小线路和变压器电抗，变压器电抗的减小是制造的问题，而减小线路电抗可以更多的方法：采用分裂导线；提高线路额定电压等级；采用串联电容补偿。

需要注意的是，线路串联电容补偿的不正确可能导致发电机发生次同步谐振的现象。

# 改善系统的结构和采用中间补偿设备

---

- 有两种办法提高系统的稳定性：①增大电压；②缩短“电气距离”，也就是减小各元件的阻抗，主要是电抗。

$$P_M = \frac{E_{q\Sigma} U}{x_{d\Sigma}}$$

- 有多种方法可以改善系统结构，加强系统的电气联系。例如增加输电线路的回路数；将中间电力系统与输电线路连接起来；等。
- 另外，在正常运行中提高发电机的电动势和电网的运行电压也可以提高功率极限，保证系统中有充足的无功功率电源对提高系统的输送功率极限也有非常有利的。

# 第六章

## 电力系统的暂态稳定性

刘崇茹，教授，博导，副院长  
华北电力大学电气与电子工程学院  
chongru.liu@ncepu.edu.cn

# 暂态稳定性的定义

---

- 电力系统受到大的干扰后，经过暂态过程，达到新的（或恢复到原来的）稳态运行状态。
- 不能保持暂态稳定
  - 受到大干扰后，各发电机组转子间一直有相对运动，相对角不断变化，因而系统的功率、电流和电压都不断振荡。
- 影响因素
  - a、系统初始运行点；
  - b、干扰的方式
- 大干扰
  - 一般指短路故障、突然断开线路或发电机
  - 持续性：瞬时性，永久性

# 暂态稳定分析的基本假设

---

- **忽略突然发生故障后网络中的非周期分量（即故障电流的直流分量）**
  - **合理性：**非周期分量衰减较快，而且非周期分量电流产生的磁场在空间静止不动，它与转子电流产生的磁场相互作用后形成以同步频率交变、平均值接近0的制动转矩，该转矩对发电机的机电暂态过程影响不大，可忽略不计。
  - **目的：**网络中的电流、电压只有频率为50Hz的，网络方程可以用代数方程。
- **忽略不对称故障产生的负序电流和零序电流**
  - **合理性：**负序电流产生的磁场和转子绕组的磁场形成的转矩，主要是以两倍同步频率交变、平均值接近于0的制动转矩，它对发电机没有明显的影响，可忽略不计。零序电流在转子空间合成磁场为零，不产生转矩，完全可以略去。
  - **目的：**只计及正序分量的电磁功率公式都可以继续应用。

# 暂态稳定分析的基本假设

---

- **在故障后的暂态过程中，认为网络中的频率为50Hz不变**
  - **合理性：**由于发电机组惯性较大，在暂态稳定所研究的短暂时间内，各机组的电角速度相对于同步角速度的偏离一般不大，可忽略不计。
  - **目的：**①便于在稳定分析过程中将 $x_L$ ， $x_T$ 等于频率有关的参数作为常数处理；②网络各处的电压和电流仍可采用相量形式描述。
- **不考虑原动机调速器的作用**
  - **合理性：**由于原动机调速器一般要在发电机转速变化之后才能起调节作用，加上其本身惯性较大，所以，在一般短过程的暂态稳定计算中，假定原动机输出功率恒定。
  - **目的：**发电机机械功率维持常数，不随转子角和角速度的变化而变化。

# 暂态稳定分析的基本假设

---

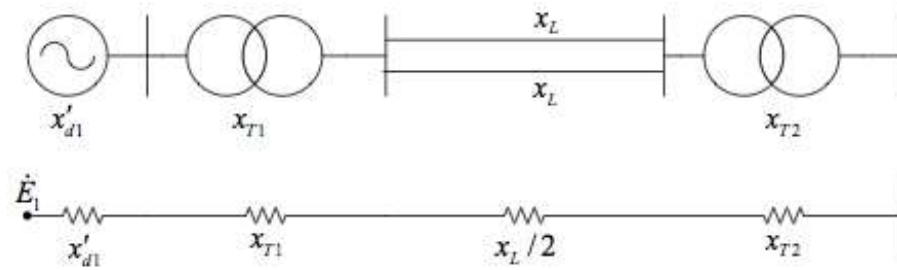
## ■ 对主要元件做近似简化

- **发电机**：将发电机简化为一个有恒定电动势 $E'$ ，内电抗为 $x_d'$ 的电源。即，假设发电机励磁调节系统能够补偿暂态电势的衰减，且同时采用工程近似的 $x_d'$ 后的电势进行计算。
- **原动机**：不计调速器作用，认为原动机机械出力不变。
- **负荷**：负荷以恒定阻抗来代表。

**暂态稳定是研究电力系统受到大扰动后的过程，因此不能像研究静态稳定那样将状态方程线性化。而且，在暂态过程中往往还同时伴随着系统结构的变化。**

# 简单电力系统暂态稳定性分析

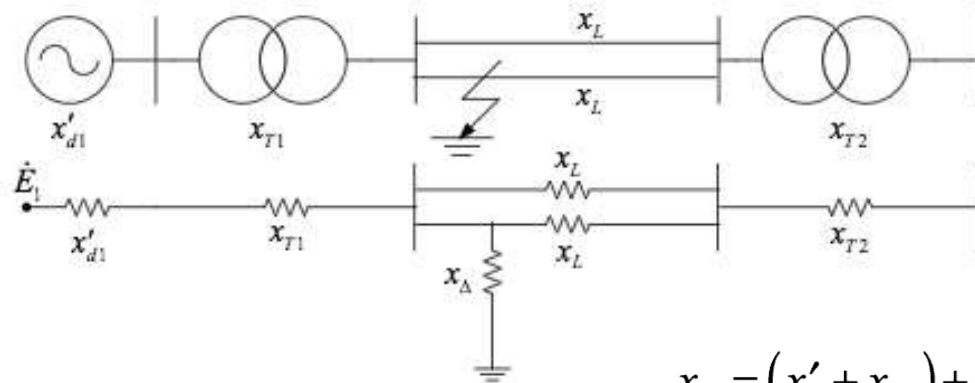
## ■ 正常情况



$$P_I = \frac{E'U}{x_I} \sin \delta'$$

$$x_I = x'_d + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}$$

## ■ 发生短路

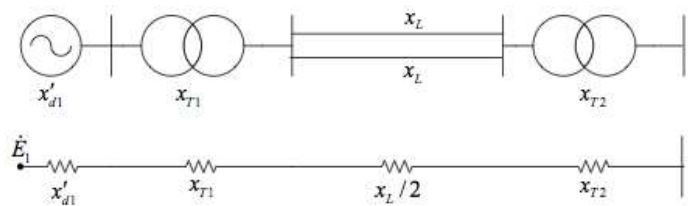


$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{II}} \sin \delta'$$

$$x_{II} = (x'_d + x_{T1}) + \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right) + \frac{(x'_d + x_{T1}) \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right)}{x_{\Delta}}$$

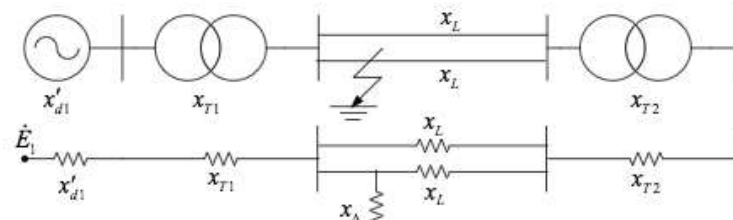
# 简单电力系统暂态稳定性分析

## ■ 正常情况



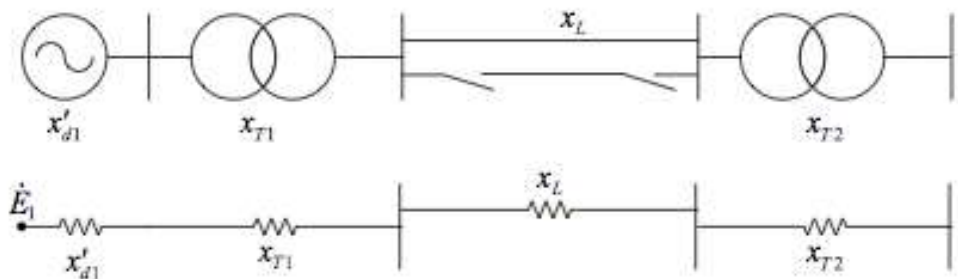
$$P_I = \frac{E'U}{x_I} \sin \delta' \quad x_I = x'_d + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}$$

## ■ 发生短路



$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{II}} \sin \delta' \quad x_{II} = (x'_d + x_{T1}) + \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right) + \frac{(x'_d + x_{T1}) \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right)}{x_{\Delta}}$$

## ■ 切除故障线路



$$P_{III} = \frac{E'U}{x_{III}} \sin \delta'$$

$$x_{III} = x'_d + x_{T1} + x_L + x_{T2}$$

三种情况下，发电机电磁功率的大小关系如何？

# 简单电力系统暂态稳定性分析

## 正常情况

$$P_I = \frac{E'U}{x_I} \sin \delta'$$

$$x_I = x'_d + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}$$

## 发生短路

$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{II}} \sin \delta'$$

$$x_{II} = (x'_d + x_{T1}) + \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right) + \frac{(x'_d + x_{T1}) \left( \frac{x_L}{2} + x_{T2} \right)}{x_{\Delta}}$$

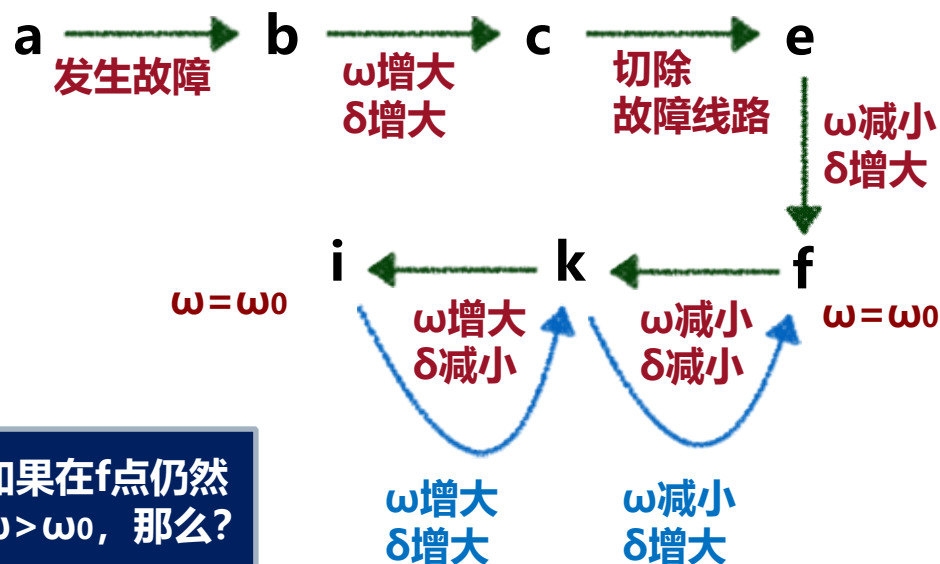
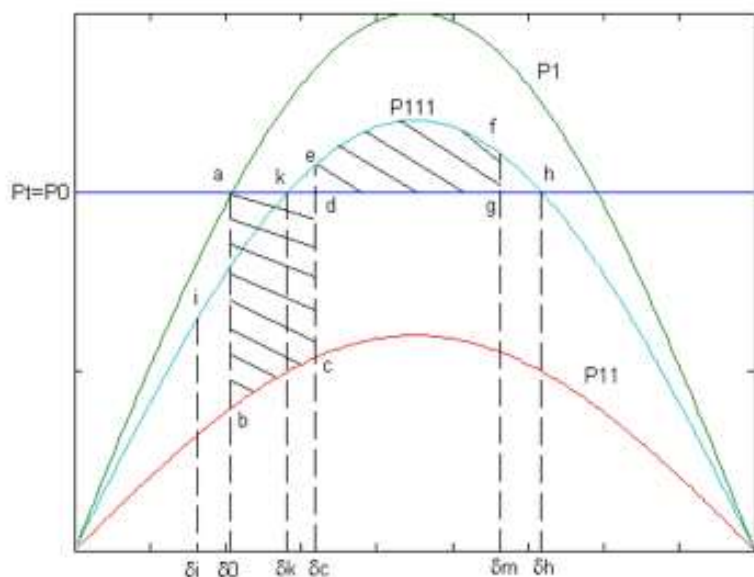
## 切除故障线路

$$P_{III} = \frac{E'U}{x_{III}} \sin \delta'$$

$$x_{III} = x'_d + x_{T1} + x_L + x_{T2}$$

$$x_{II} > x_I \implies P_{I \max} > P_{II \max}$$

$$x_{III} > x_I \implies P_{I \max} > P_{III \max}$$



如果在f点仍然  $\omega > \omega_0$ , 那么?



# 暂态稳定分析和计算

---

- 系统暂态稳定与否是和**正常运行情况**（ $P_T$ 和 $E'$ 的大小）以及**扰动情况**（发生什么故障，何时切除）**直接相关**。
- 为了确定判断系统在某个运行方式下，受到某种扰动后能否保持暂态稳定，必须通过**定量**的分析计算。
- 暂态稳定分析计算，目前主要采用的方法仍然是计算扰动发生后，**发电机转子之间相对角随时间变化的动态过程**。
- 如果任意两台发电机之间的**相对角超过了给定值**（如 $180^\circ$ ）且**仍然在随时间不断增大**，则可判断系统不能保持暂态稳定。
- 怎么计算呢？

# 暂态稳定分析和计算

---

- 列写数学方程  微分代数方程组
  - 微分方程：描述发电机和各种控制措施的微分方程
  - 代数方程：描述网络特性的代数方程
- 求解  数值计算
  - 计算量很大
  - 可以用专门的电力系统稳定计算软件
  - 基本思路是一致，但所实现的系统模型及算法不尽相同

# 暂态稳定分析和计算

---

- 各种不同软件在程序的具体实现方法上进行分类
  - 根据所使用的微分方程数值解法的不同
    - 显式积分法
    - 隐式积分法
  - 根据微分方程组与代数方程结合方式不同
    - 交替求解法
    - 联立求解法

# 数值积分方法

**欧拉法**  $x_1 = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \Delta t$

**改进欧拉法**  $x_1^p = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \Delta t$   $x_1^c = x_0 + \frac{1}{2} \left( \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1^p} \right) \Delta t$

## 龙格库塔法 (二阶)

$$x_1 = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2} \Delta t$$
$$k_1 = f(x_0, t_0) \Delta t$$
$$k_2 = f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t) \Delta t$$

## 梯形法

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2} [f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})]$$

## 龙格库塔法 (四阶)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta t$$
$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t$$
$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$
$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$
$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t$$

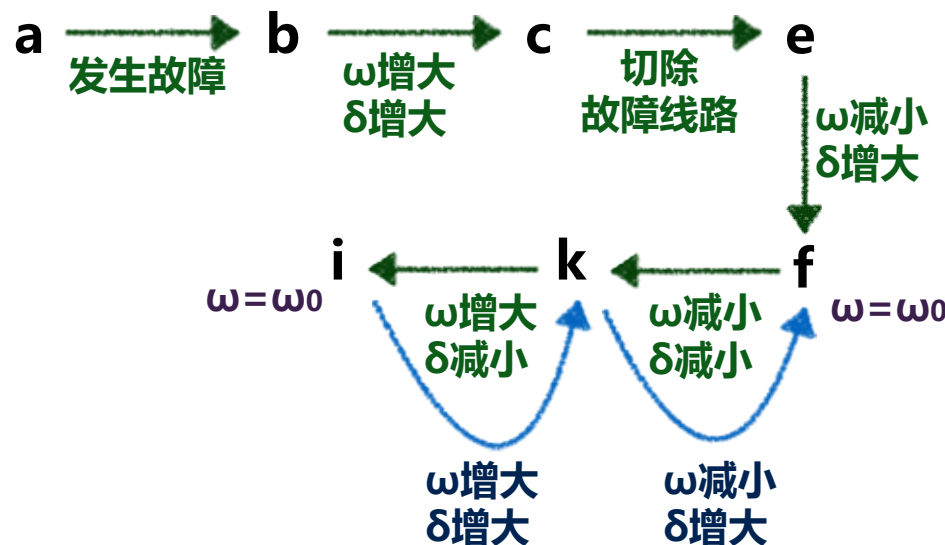
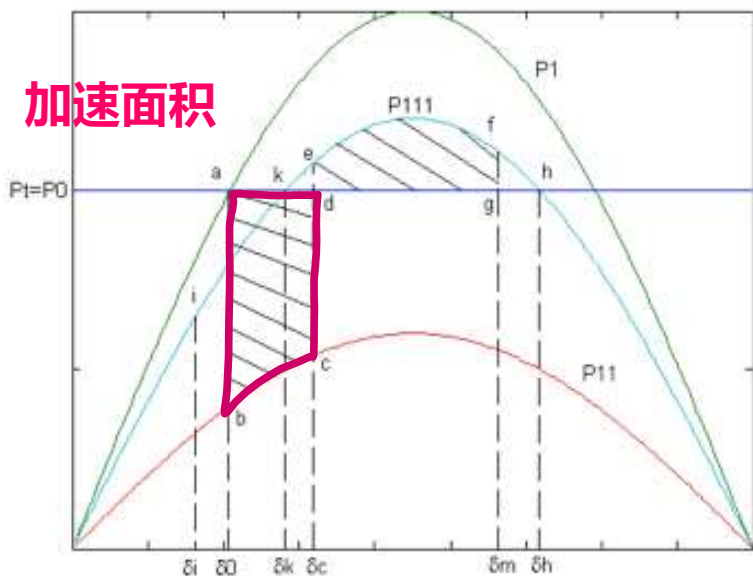
- 单机无穷大系统有没有简单判定方法?
  - 等面积定则

# 等面积定则

---

- **等面积定则是判断单机无穷大系统暂态稳定性的一种定量方法**，计算简便，并具有明确的物理意义，十分有助于理解和分析暂态稳定过程的运行机理。
- **基本思路**
  - 将发电机功角特性曲线与原动机输出功率曲线之间所包围的面积与发电机转子**所获得或释放的能量**联系起来，从而得到发电机**转子角摇摆的最大值**，并可据此判断发电机的暂态稳定性。
  - **提问：什么“相等”了系统才会是稳定的？**

# 等面积定则



a点:  $\omega = \omega_0$   $\delta = \delta_0$   $\rightarrow$  b点:  $\omega = \omega_0$   $\delta = \delta_0$   $\rightarrow$  c点:  $\omega = \omega_c$   $\delta = \delta_c$   $\rightarrow$  e点:  $\omega = \omega_c$   $\delta = \delta_c$

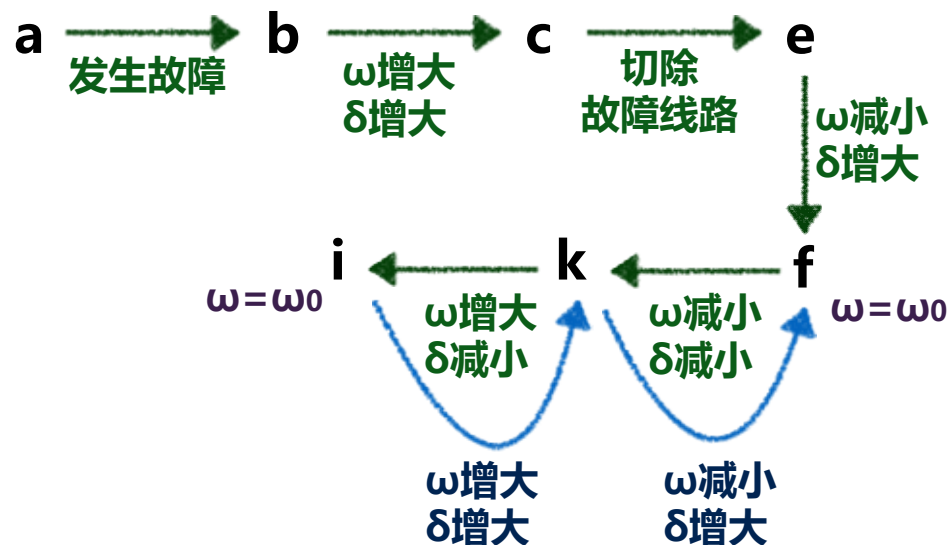
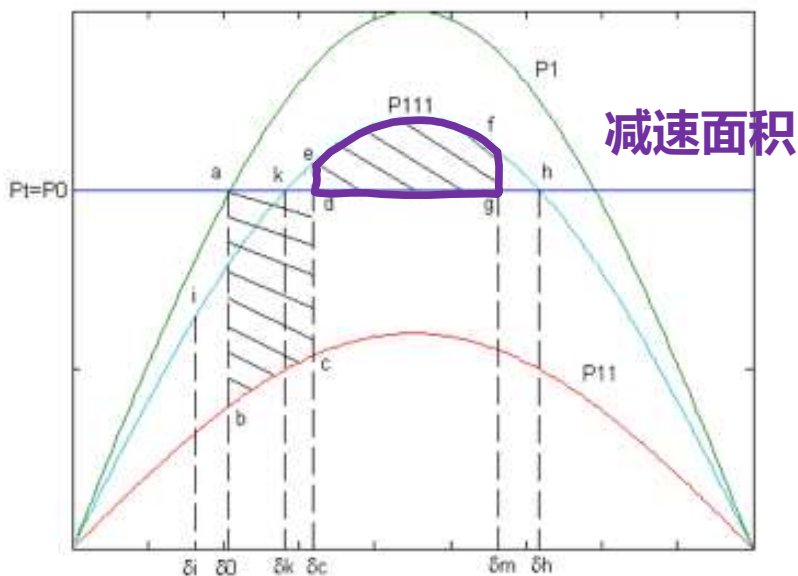
从b点到c点, 转子完成**首摆加速过程**

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_{11} \end{cases}$$

$$\frac{d\delta}{d\omega} = \frac{T_J}{\omega_0} \frac{\omega - \omega_0}{P_T - P_{11}} \Rightarrow (P_T - P_{11}) d\delta = T_J \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) d\omega \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{11}) d\delta = \frac{T_J}{\omega_0} \frac{(\omega_c - \omega_0)^2}{2}$$

发电机运行点从b点转移到c点的过程中, 发电机不平衡转矩所做的功, 等于发电机运行点从b点到c点所**积累的动能**。

# 等面积定则



e点:  $\omega = \omega_c$   
 $\delta = \delta_c$  → f点:  $\omega = \omega_0$   
 $\delta = \delta_m$

从e点到f点, 转子完成首摆减速过程

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_{III} \end{cases} \Rightarrow \frac{d\delta}{d\omega} = \frac{T_J}{\omega_0} \frac{\omega - \omega_0}{P_T - P_{III}} \Rightarrow (P_T - P_{111}) d\delta = T_J \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) d\omega \Rightarrow \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_T - P_{111}) d\delta = - \frac{T_J (\omega_c - \omega_0)^2}{\omega_0 \cdot 2}$$

发电机运行点从e点转移到f点的过程中, 发电机不平衡转矩所做的功, 等于发电机从e点到f点减少的动能。

# 等面积定则

- 综合考虑加速和减速过程，转子在减速过程中动能的减少正好等于加速过程中动能的增加。

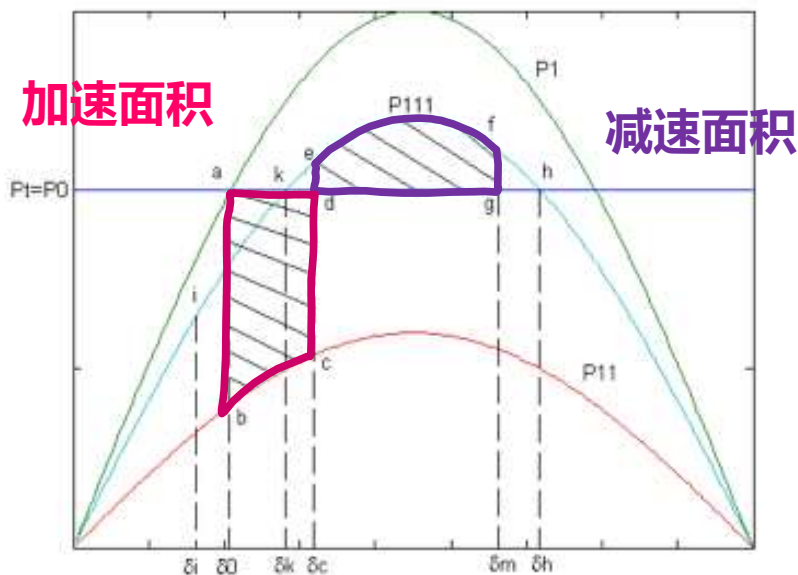
等面积定则：
$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{III} - P_T) d\delta$$

- 当发电机的**减速面积等于加速面积**时，转子角速度恢复到同步速度，**转子角达到其最大摆角 $\delta_m$** 并开始减小。
- 如果转化过程中无能量损耗，转子的振荡将是等幅的；当考虑实际存在的阻尼作用时，能量的转化过程中不可避免地有损耗，因而振荡过程将逐渐衰减并使得系统回到新的平衡工作点。

# 极限切除角

$$\text{等面积定则: } \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{III} - P_T) d\delta$$

**极限切除角 $\delta_{cr}$ 或 $\delta_{cm}$** : 使系统维持稳定的最大可能的故障切除角 $\delta_c$ .



- 极限切除角应满足什么条件?
  - 极限切除情况?

转子角正好达到h点时转速回到同步速，也就是f点与h点重合，极限切除情况即 $\delta_m = \delta_h$

# 极限切除角

$$\text{等面积定则: } \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{III} - P_T) d\delta$$

极限切除情况即  $\delta_m = \delta_h$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_T - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_h} (P_{III} - P_T) d\delta$$

$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{II}} \sin \delta = P_{IIM} \sin \delta$$

$$P_{III} = \frac{E'U}{x_{III}} \sin \delta = P_{IIIM} \sin \delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_T - P_{IIM} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_h} (P_{IIIM} \sin \delta - P_T) d\delta$$



极限切除角  $\delta_{cr}$  或  $\delta_{cm}$

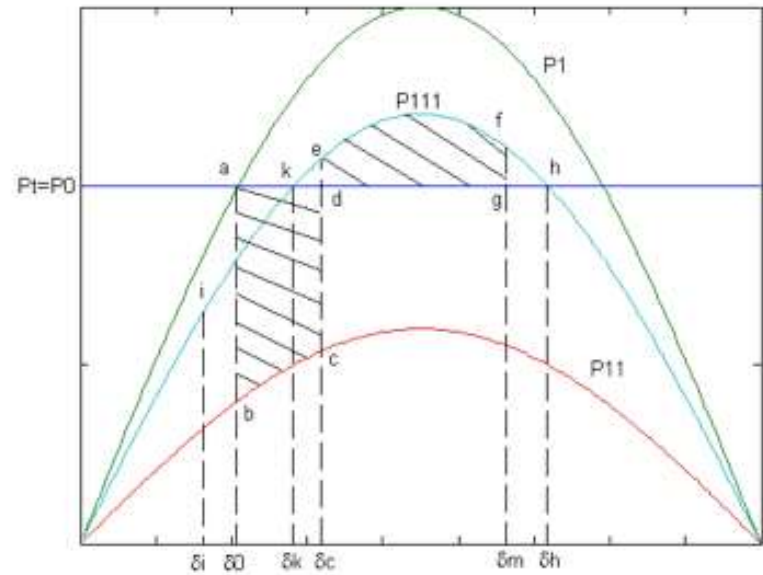
$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_T (\delta_h - \delta_0) + P_{IIIM} \cos \delta_h - P_{IIM} \cos \delta_0}{P_{IIIM} - P_{IIM}}$$

# 极限切除角

**极限切除角 $\delta_{cr}$ 或 $\delta_{cm}$**  
$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III M} \cos \delta_h - P_{II M} \cos \delta_0}{P_{III M} - P_{II M}}$$

式中 $\delta_0$ 和 $\delta_h$ 分别均为弧度值

- $\delta_0$ 和 $\delta_h$ 分别是什么？如何获得？
  - $\delta_0$ 表示a点对应的转子角
  - $\delta_h$ 表示h点对应的转子角



$$P_a = P_{IM} \sin \delta_0 \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_a}{P_{IM}} \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{IM}}$$

$$P_h = P_{III M} \sin \delta_h \Rightarrow \delta_h = \sin^{-1} \frac{P_h}{P_{III M}} \Rightarrow \delta_h = \pi - \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{III M}}$$