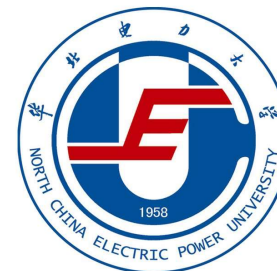


即将直播授课



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

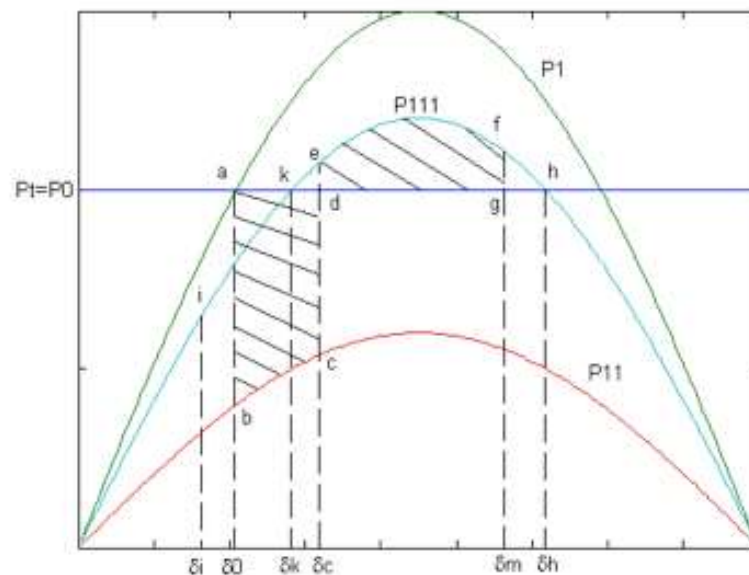
- 下载腾讯课堂学生端APP：
<https://ke.qq.com/s>
- 扫码进课
- 也可以看回放
- 进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：
我的一最近看过—刘崇茹的课堂
- 请将昵称改为：学号姓名

极限切除角

极限切除角 δ_{cr} 或 δ_{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 δ_0 和 δ_h 分别均为弧度值

- δ_0 和 δ_h 分别是什么？如何获得？
 - δ_0 表示a点对应的转子角
 - δ_h 表示h点对应的转子角



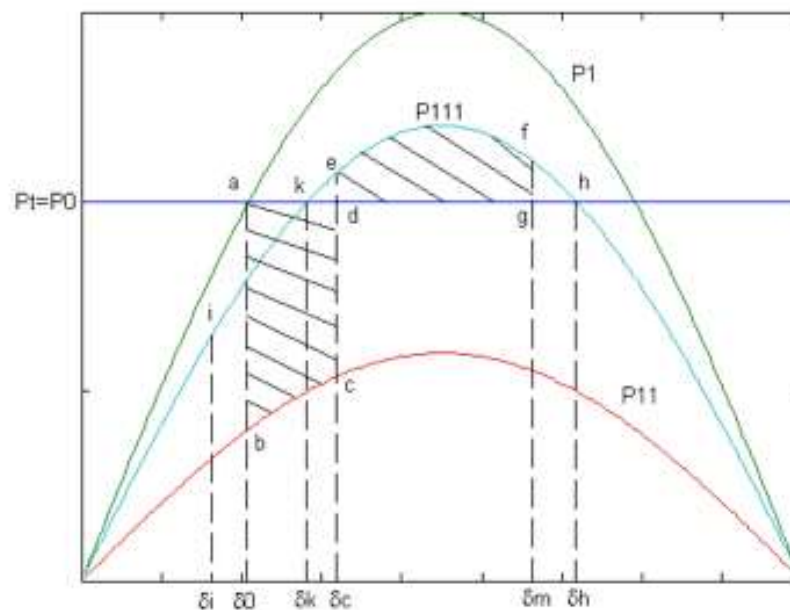
$$P_a = P_{IM} \sin \delta_0 \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_a}{P_{IM}} \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{IM}}$$

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

极限切除角

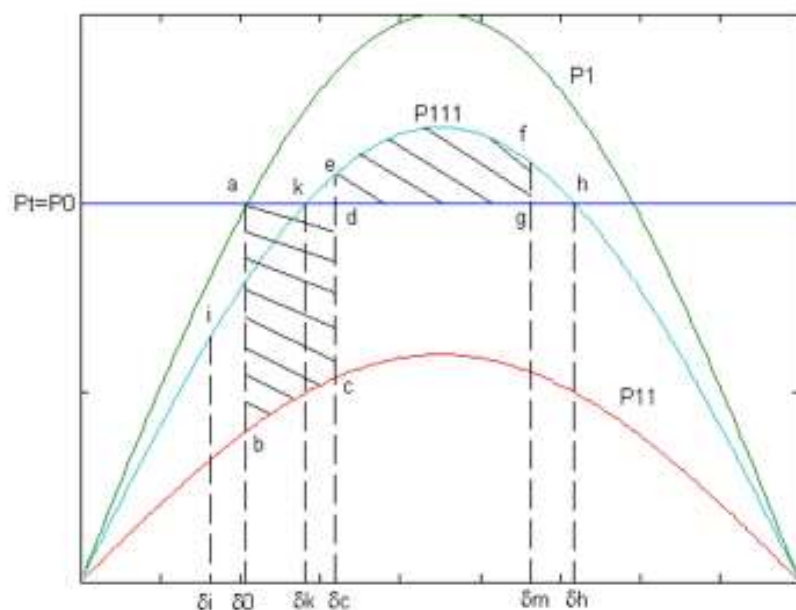
极限切除角 δ_{cr} 或 δ_{cm}
$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_T (\delta_h - \delta_0) + P_{III M} \cos \delta_h - P_{II M} \cos \delta_0}{P_{III M} - P_{II M}}$$

- 如果切除角大于极限切除角，会使得**加速面积大于最大减速面积**，暂态过程中运行点就会越过h点而使系统失去同步。
- 如果实际的切除角小于极限切除角，**加速面积将小于最大减速面积**，运行点到达h点之前发电机动能已减小到同步速时的动能，转子角开始减小，系统保持稳定。



切除时间的计算

- 但是，求得极限切除角并没有解决实际问题。
- 实际需要知道的是，为保证系统稳定必须在多长时间之内切除故障，也就是要知道 δ_{cr} 对应的切除时间。



故障期间

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

切除故障线路

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

求解非线性方程获得 $\delta \sim t$ 曲线和 $\omega \sim t$ 曲线，找到极限切除角对应的极限切除时间。

切除时间的计算

- 两类问题:

- **第一类问题:** 已知极限切除角 δ_{cr} , 来计算极限切除时间 t_{cr}

- 对故障期间的运动方程采用数值解法求出 $\delta \sim t$ 曲线, 查找对应时间

故障期间

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_{11} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{初始条件 } t = 0, \omega_{t_0} = 1, \delta_{t_0} = \delta_0 \\ \text{得到 } \delta \sim t \text{ 曲线和 } \omega \sim t \text{ 曲线曲线,} \\ \text{并查出 } \delta_{cr} \text{ 时刻对应的时刻} \end{array}$$

- **第二类问题:** 已知实际的故障切除时间, 判断系统的稳定性

故障期间

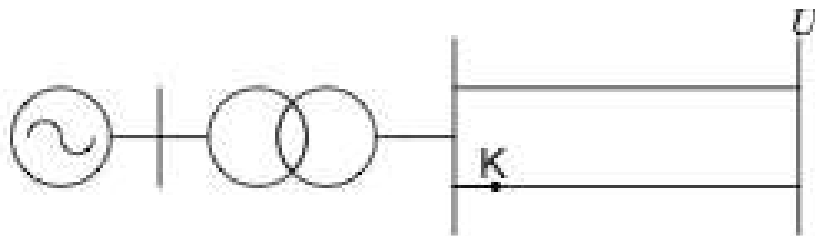
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_{11} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{初始条件 } t = 0, \omega_{t_0} = 1, \delta_{t_0} = \delta_0 \\ \text{得到 } 0 \sim t_c \text{ 时刻的 } \delta \sim t \text{ 曲线和 } \omega \sim t \text{ 曲线曲线,} \\ \text{并查出 } t_c \text{ 时刻对应的转速 } \omega_c \text{ 和转子角 } \delta_c \end{array}$$

切除故障线路

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_{III} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{初始条件 } t = t_c, \omega_{t_c} = \omega_c, \delta_{t_c} = \delta_c \\ \text{得到 } t_c \text{ 时刻以后的 } \delta \sim t \text{ 曲线和 } \omega \sim t \text{ 曲线} \end{array}$$

第八次作业（等面积定则）

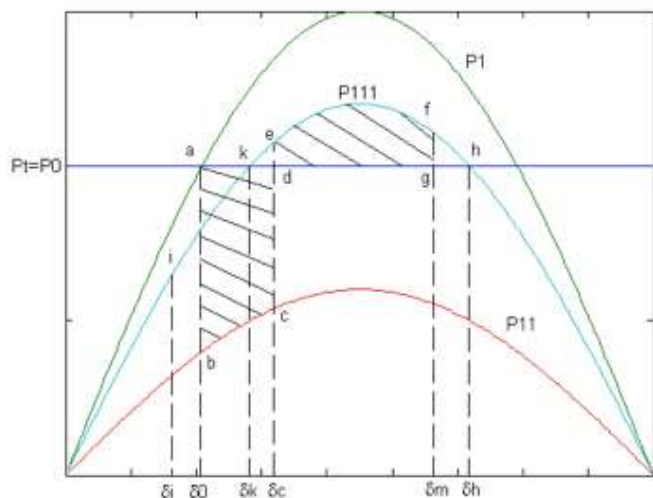
- 单机无穷大系统如图所示。假定发电机暂态电抗后电势 E' 恒定，且题中的转子角为 E' 与无穷大母线的夹角。系统参数为： $x_d'=0.1$ ， $x_T=0.2$ ， $x_L=0.6$ （单回）。 $\cos\varphi=0.98$ ， $U=1.0$ ， $P_0=1.0$ 。



- 设在 k 点发生三相短路，试计算：(1) 为保持暂态稳定所需要的极限切除角度；(2) 假定发电机转子角为 35° 时切除故障线路，发电机最大摆角约为 72° ，试画出发电机功角特性曲线，并指出加速面积和减速面积；(3) 假定发电机转子角为 50° 时切除故障线路，计算发电机的最大摆角（在 110° 左右）。

自动调节系统对暂态稳定性的影响

自动励磁调节系统的作用

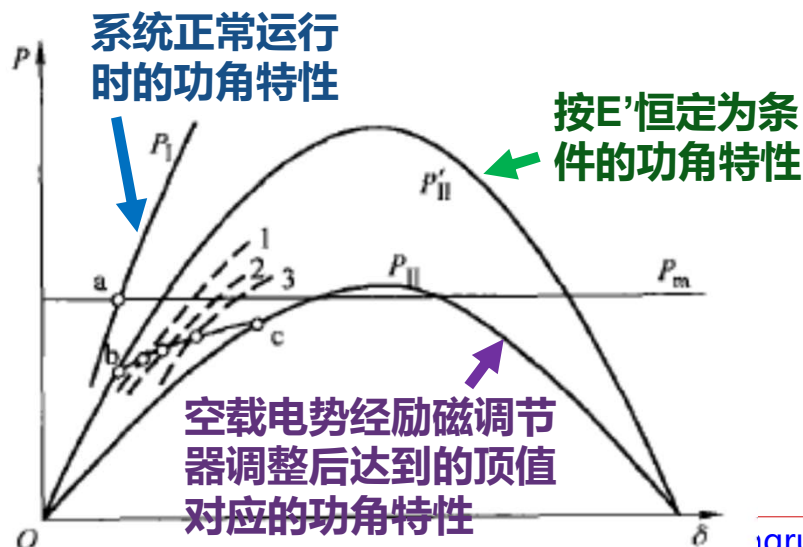


- **发电机**：将发电机简化为一个有恒定电动势 E' ，内电抗为 x_d' 的电源。即，假设发电机励磁调节系统能够补偿暂态电势的衰减，且同时采用工程近似的 x_d' 后的电势进行计算。
- **原动机**：不计调速器作用，认为原动机机械出力不变。

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

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

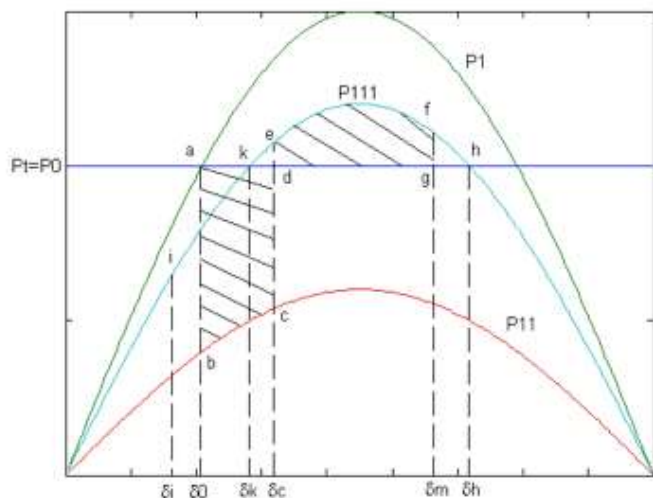
$$P_{III} = \frac{E'U}{x_{III}} \sin \delta'$$



实际上整个过程 E_q' 或 E' 不是常数，运行点不可能一直沿着 P_{II}' 变化。如果励磁不可调，运行点将逐渐向 P_{II} 靠拢，并最终过渡到 P_{II} 。因此，励磁不可调时的加速面积较大，最大减速面积较小。不同的励磁系统的作用有差异，不考虑励磁系统可能会造成错误结论。

自动调节系统对暂态稳定性的影响

自动调速系统的作用



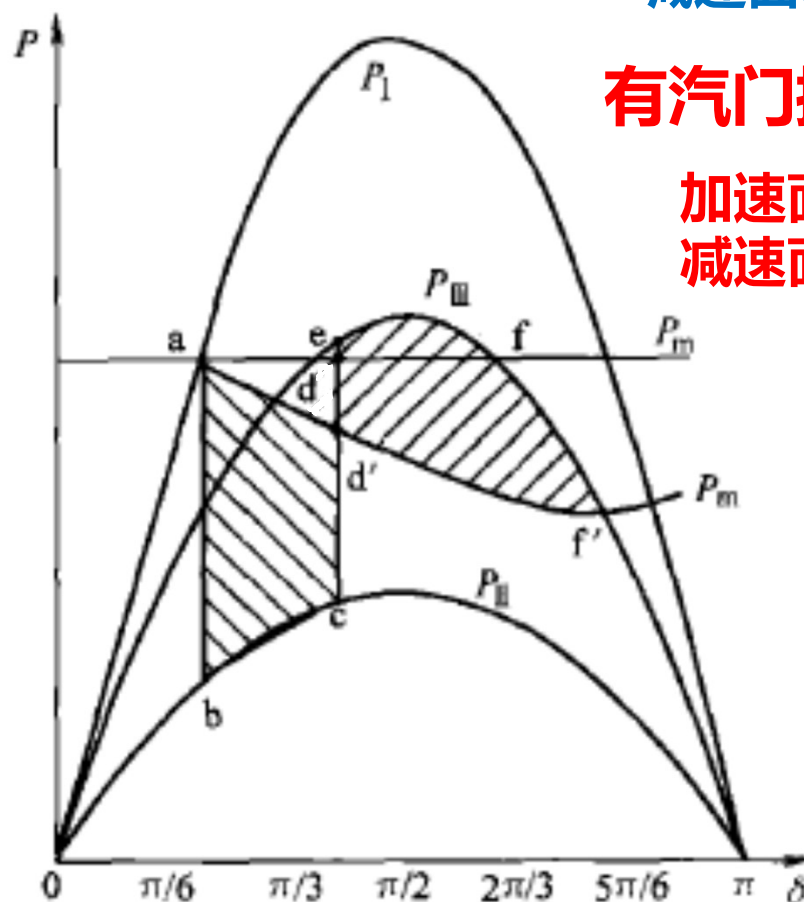
如果原动机采用快速关闭汽门的措施后，原动机的机械功率将会在暂态过程中发生变化，不能再认为它是恒定不变的。

无汽门控制

加速面积: $abcd$
 减速面积: def

有汽门控制

加速面积: $abcd'$
 减速面积: $d'ef'$



考虑自动调节时的暂态稳定计算

- 考虑最简单的励磁调节器模型，那么发电机的动态过程由四个微分方程决定：

$$\left\{ \begin{array}{l} T_e \frac{dE_{qe}}{dt} = E_{qe\max} - E_{qe} \quad \leftarrow \text{励磁机的微分方程} \\ T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E'_q \quad \leftarrow \text{励磁绕组的微分方程} \\ \left. \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E \end{array} \right\} \quad \leftarrow \text{发电机转子运动方程}$$

补充代数方程，求解微分代数方程，获得 $x \sim t$ 曲线，判断系统稳定性。

- 考虑原动机及调节器作用



用数值积分求解

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mu} = - [\Delta\omega K_\delta + (\mu - \mu_{|0|})] / T_s \\ \dot{M}_T = [\mu / (\Delta\omega + 1) - M_T] / T_{ch} \\ \dot{\delta} = \Delta\omega \\ \dot{\Delta\omega} = \omega_N (M_T - M_e) / T_J \\ M_e = P_e / (\Delta\omega + 1) = \phi(\delta, \Delta\omega) \end{array} \right.$$

提高系统暂态稳定性的措施

静态稳定的特征： $P = \frac{EU}{x} \sin \delta$

提高静态稳定性的重要途径是提高系统最大输送功率。

暂态稳定的特征：
$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(P_0 - P_E) \end{cases}$$

- 到底是什么引起了系统的暂态问题呢？
- 暂态稳定研究的是转子是否能够维持同步，它的运动轨迹是怎样的。
- 那么是什么引起了转子的运动？

提高系统暂态稳定性的措施

暂态稳定的特征：

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(P_0 - P_E) \end{cases}$$

发电机的机械功率和电磁功率的差额是导致暂态稳定被破坏的主要原因。

提高暂态稳定性的出发点：**减小扰动后发电机的功率差额**

- **主要措施**
 - **改变制动功率（发电机输出的电磁功率）**
 - **改变原动功率（原动机输出的机械功率）**

提高系统暂态稳定性的措施

- **改变制动功率（发电机输出的电磁功率）**
 - 快速的故障切除和自动重合闸
 - 对发电机实行强行励磁
 - 电气制动
 - 变压器中性点经小电阻接地
 - 输电线路设置开关站
 - 输电线路采用强行串联电容补偿
- **改变原动功率（原动机输出的机械功率）**
 - 快速的自动调速系统或者快速关闭进汽门
 - 联锁切除部分发电机
 - 合理选择远距离输电系统的运行接线

快速的故障切除和自动重合闸

- 切除故障后，发电机输出电磁功率的能力提高

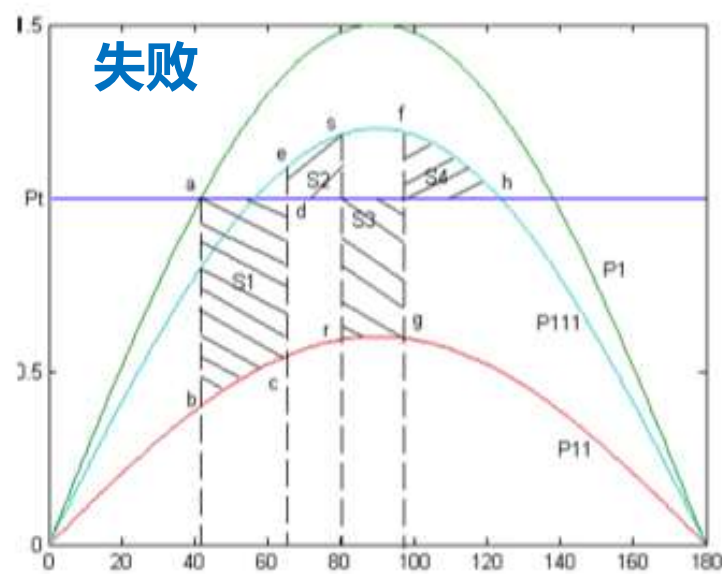
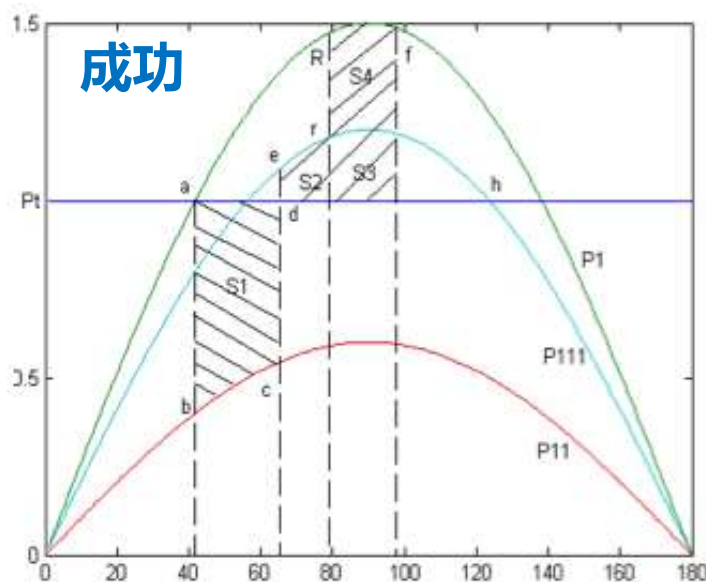
切除故障时间 = 继电保护装置动作时间 + 断路器的动作时间

0.06s

0.02s

0.04s

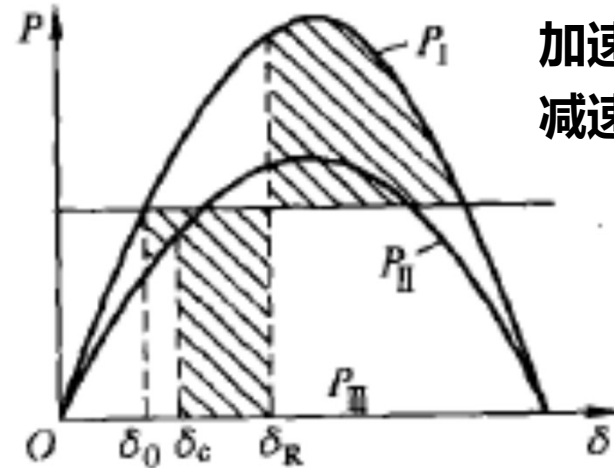
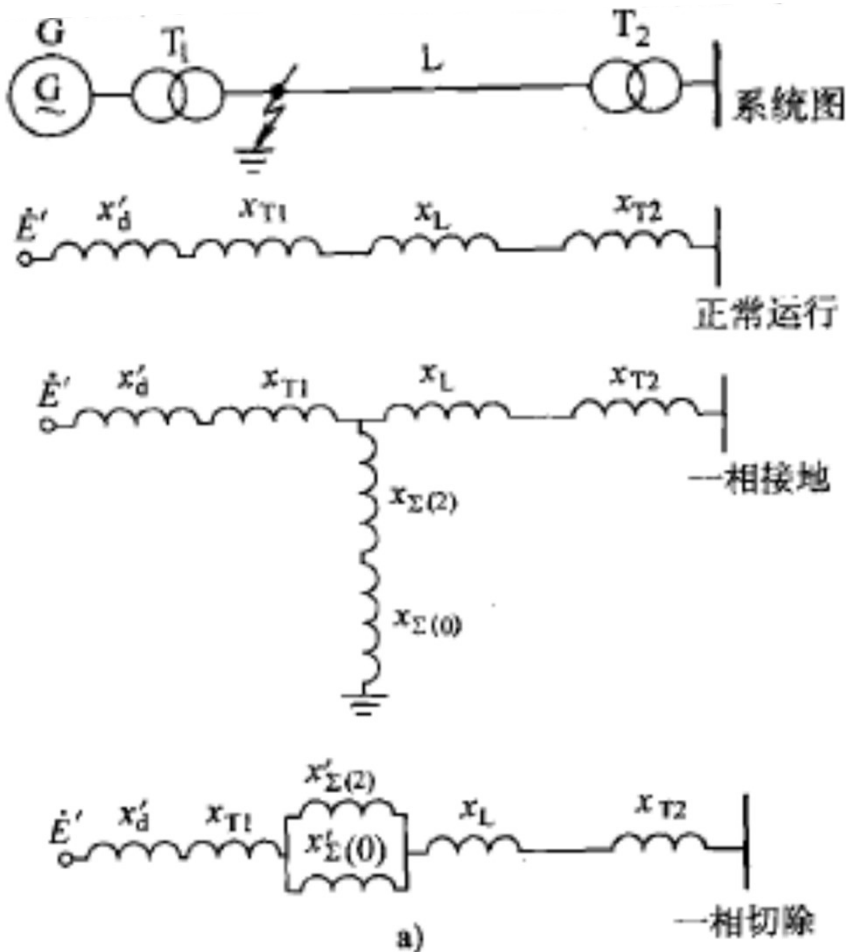
- 自动重合闸



由于自动重合闸的成功率在90%以上，因此加装自动重合闸装置有利于系统恢复稳定。

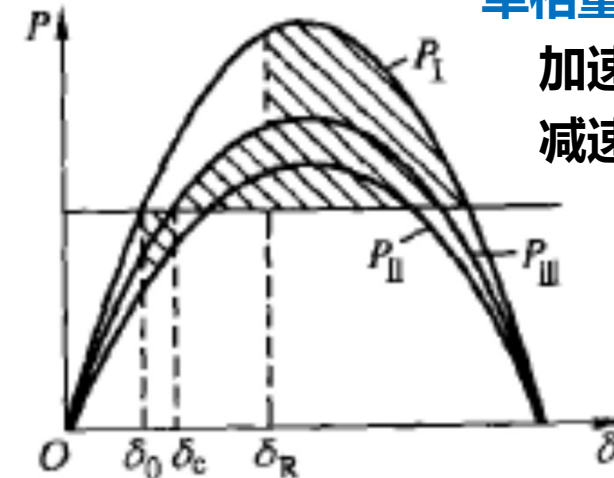
快速的故障切除和自动重合闸

■ 单相重合闸和三相重合闸



三相重合闸

加速面积大
减速面积小



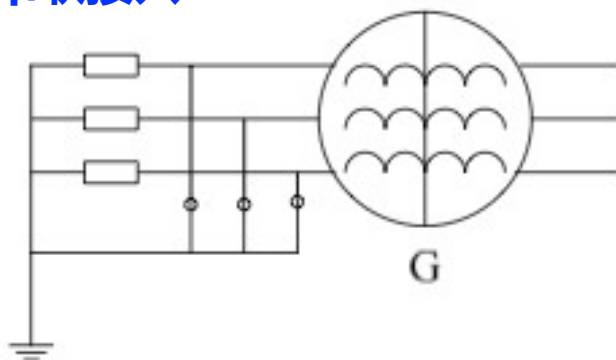
单相重合闸

加速面积小
减速面积大

电气制动

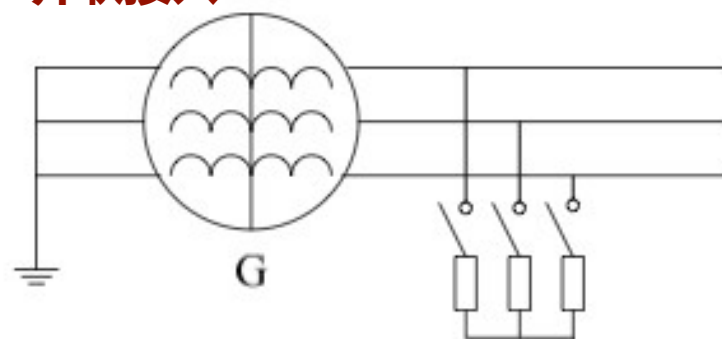
- 当系统中发生故障后，迅速地投入电阻以消耗发电机的有功功率（增大电磁功率），从而减少功率差额。通称有串联接入和并联接入两种方式投入制动电阻。

串联接入



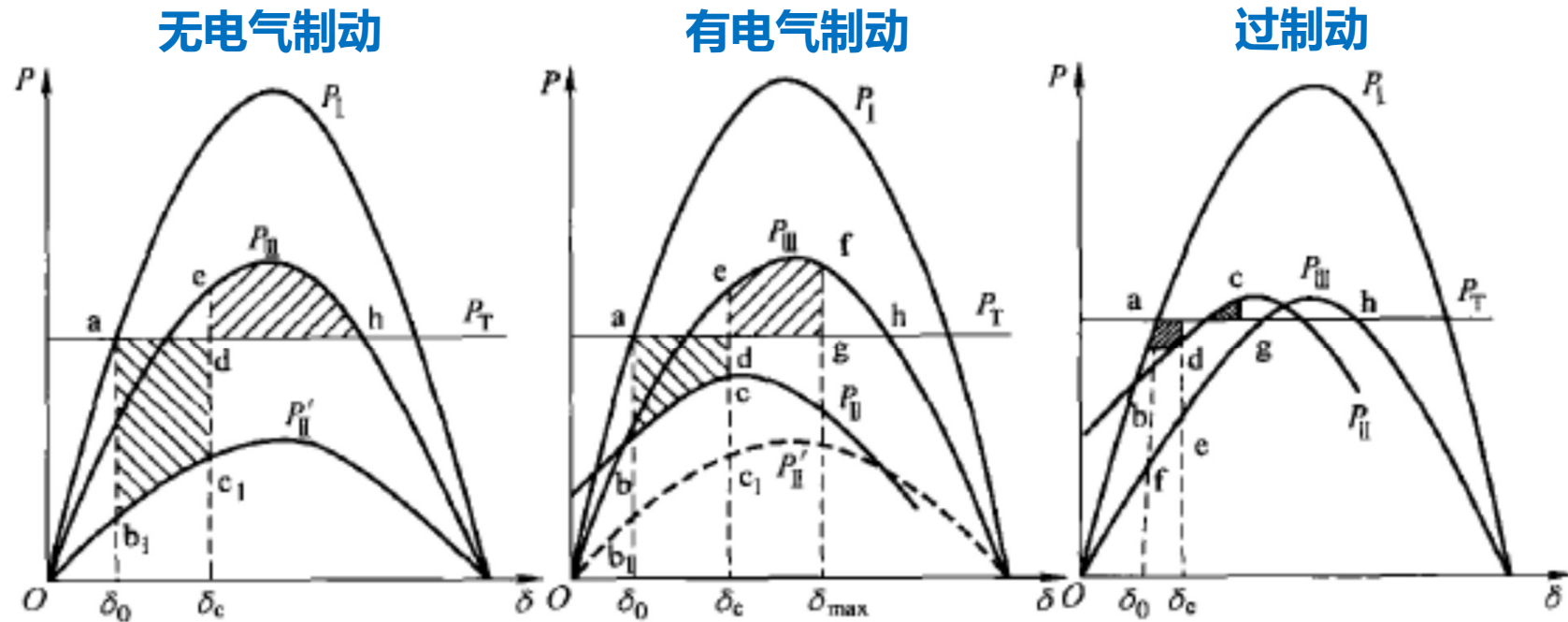
正常时，旁路开关闭合，电阻被短路，不消耗电磁功率。

并联接入



正常时，开关打开，电阻被断开，不消耗电磁功率。

电气制动



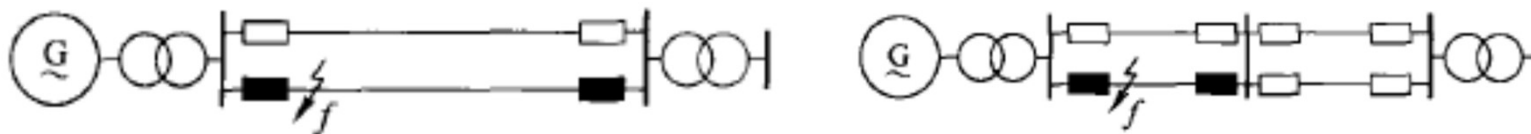
减小故障后电抗以增大电磁功率

■ 变压器中性点经小电阻接地

- 变压器经小电阻接地，当系统发生短路故障时，增加了零序电阻，也就增大了 x_{Δ} ，故障后的电抗为：

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

■ 输电线路设置开关站



■ 输电线路采用强行串联电容补偿

- 由于考虑继电保护正确动作和引起次同步谐振等因素，串联电容的补偿度 k_c 一般小于0.35。 ($k_c = X_c/X_L$)

提高系统暂态稳定性的措施

■ 改变制动功率（发电机输出的电磁功率）

- 快速的故障切除和自动重合闸

- 对发电机实行强行励磁

发电机都具有强行励磁装置，以保证当系统发生故障而使发电机端电压低于额定电压85%~90%时迅速而大幅度地增加励磁，从而提高发电机电动势，增加发电机输出的电磁功率。

- 电气制动

- 变压器中性点经小电阻接地

- 输电线路设置开关站

- 输电线路采用强行串联电容补偿

■ 改变原动功率（原动机输出的机械功率）

- 快速的自动调速系统或者快速关闭进汽门

- 联锁切除部分发电机

- 合理选择远距离输电系统的运行接线

快速的自动调速系统或者快速关闭进汽门

- 在系统故障期间，如能迅速关闭气门降低原动机的功率，就会显著减少过剩功率，提高系统的暂态稳定性。
- 可惜由于汽轮机调速器不够灵敏，这个想法一直未得到实际应用。
- 近年来汽轮机调速器越来越完善，尤其电液调速器的出现，使快速关汽门成为可能，它的使用将使暂态稳定得到显著改善。
- 水轮机的调速器很不灵敏，且有水锤效应，不能快速关闭导水翼。
- 代替的办法是采用电气制动，就是在系统发生故障后迅速投入一个附加电阻，以消耗发电机的有功功率。

第九次作业 (暂态稳定)

- P194
 - 6-2, 6-3, 6-5, 6-6, 6-8

复习本章内容

发布随堂测验8试卷
5分钟



人有多大胆，复习拖多晚



The End