

第四章 电力系统稳定分析

(Power system Stability Analysis)

第十五讲 暂态稳定分析与继电保护简介

**(Transient Stability Analysis and
introduction of protection)**

IEEE关于电力系统稳定性的分类



问题

- 1、什么是暂态稳定？
- 2、如何分析电力系统的暂态稳定性？
- 3、暂态稳定分析分几个过程？
- 4、什么是等面积定则？
- 5、如何提高系统暂态稳定性？
- 6、电力系统保护与保护的类型？
- 7、对电力系统保护有什么要求？

§1 电力系统暂态稳定的概念

暂态稳定的一般概念

暂态稳定 - 系统在**平衡点**受到**大干扰**，**偏离平衡点**；
大干扰消失后：

状态能回到平衡点——**稳定**；
状态不能回到平衡点——**不稳定**

理想情况：

大干扰消失后，系统没变，平衡点也没变

§1 电力系统暂态稳定的概念

暂态稳定 - 电力系统1在**平衡点**受到**大干扰**，变成系统2，偏离平衡点；**大干扰消失后**：

- 1、**变回系统1**，状态能否回到**原**平衡点（瞬时）；
- 2、**变成系统3**，状态能否达到**可接受**的平衡点。

常见大干扰：短路，断线，发电机跳闸等。

如何分析电力系统暂态稳定？

按定义；

能否用平衡点线性化的方法分析？

常用方法 - 时域仿真分析或李雅普诺夫方法。⁵

电力系统暂态稳定的物理过程及模型

大干扰发生前

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = f_1(\bar{x}(t)) \\ \bar{x}(0) = \bar{x}_e \end{cases}$$

t_1 时刻发生大干扰，期间

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = f_2(\bar{x}(t)) \\ \bar{x}(t_1) = \bar{x}_e \end{cases} \Longrightarrow \bar{x}(t_c)$$

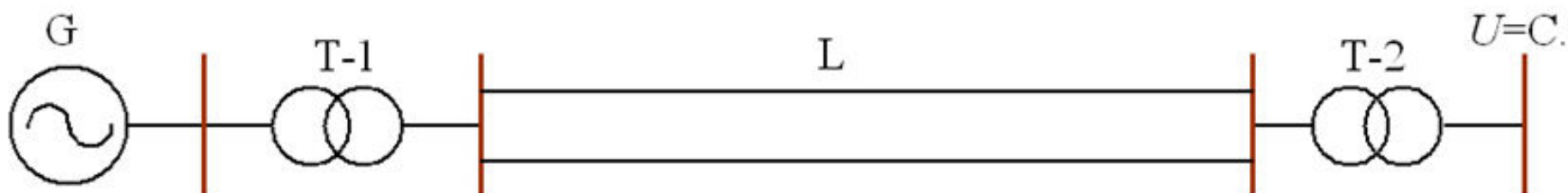
t_c 时刻切除大干扰，其后

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = f_3(\bar{x}(t)) \\ \bar{x}(t_c) = \bar{x}(t_c) \end{cases} \quad \begin{matrix} \bar{x}_{e3} = ? \\ \bar{x}(t) \rightarrow ? (t > t_c) \end{matrix}$$

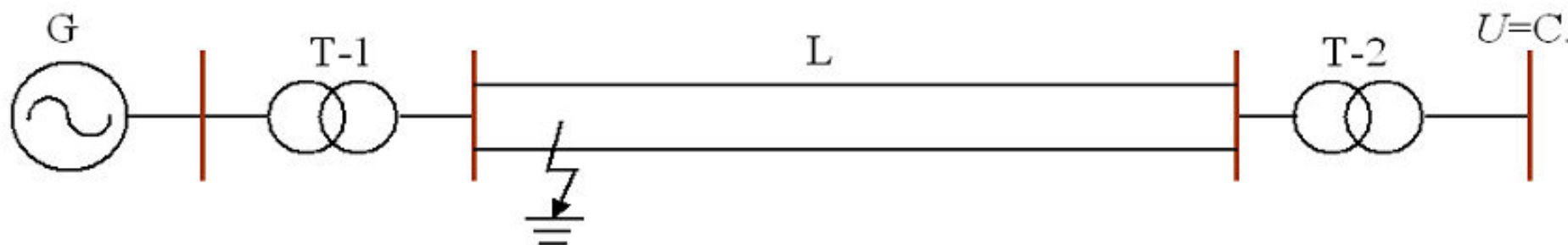
暂稳分析的目的？小干扰与大干扰有什么区别？

单机无穷大系统大干扰后过程

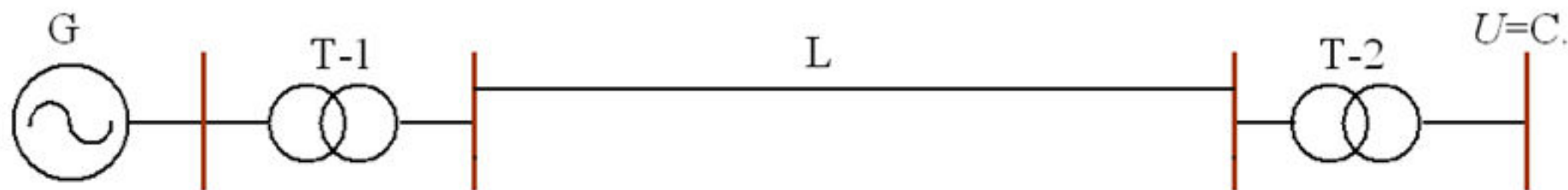
短路前-系统1



短路期间-系统2



短路切除后-系统3



§2 单机无穷大系统暂稳分析的模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \\ \dot{E}_q = \dot{U}_t + jX_q \dot{I} = \dot{U} + jX_{q\Sigma} \dot{I} \end{cases}$$



$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \\ \dot{E}' = \dot{U}_t + jX'_d \dot{I} = \dot{U} + jX'_{d\Sigma} \dot{I} \\ P_e = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta \\ X'_{d\Sigma} = X_T + X_L + X'_d \end{cases}$$

大干扰过程中 $E_q = X_{ad} i_f$ 变

化，而 $E'_q = \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f$ 近似

不变，进一步假定 E' 不变。

不对称短路期间发电机电磁功率计算

$$\begin{aligned}P_e &= \text{Re}(\dot{U}_a \hat{I}_a + \dot{U}_b \hat{I}_b + \dot{U}_c \hat{I}_c) \\&= \text{Re}[(\dot{U}_{a0} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2}) \cdot (\hat{I}_{a0} + \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2}) \\&\quad + (\dot{U}_{a0} + \alpha^2 \dot{U}_{a1} + \alpha \dot{U}_{a2}) \cdot (\hat{I}_{a0} + \hat{\alpha}^2 \hat{I}_{a1} + \hat{\alpha} \hat{I}_{a2}) \\&\quad + (\dot{U}_{a0} + \alpha \dot{U}_{a1} + \alpha^2 \dot{U}_{a2}) \cdot (\hat{I}_{a0} + \hat{\alpha} \hat{I}_{a1} + \hat{\alpha}^2 \hat{I}_{a2})] \\&\because 1 + \alpha + \alpha^2 = 0, \quad \hat{\alpha} = \alpha^2, \quad \hat{\alpha}^2 = \alpha \\&\therefore P_e = \text{Re}(3 \dot{U}_{a0} \hat{I}_{a0} + 3 \dot{U}_{a1} \hat{I}_{a1} + 3 \dot{U}_{a2} \hat{I}_{a2})\end{aligned}$$

发电机**不产生负序电压、零序电压**，故

$$P_e = \text{Re}(3 \dot{U}_{a1} \hat{I}_{a1})$$

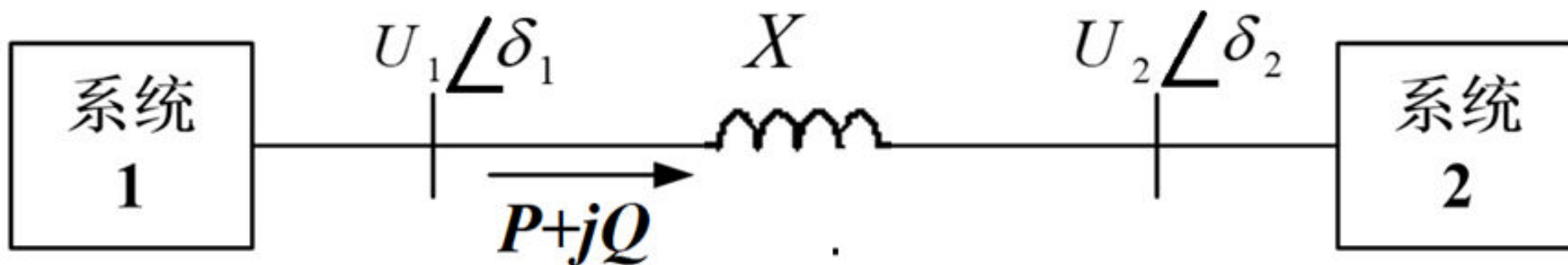
不对称短路期间只需考虑**正序**电压、电流

系统（功角-机电）暂态稳定分析的基本假设

同步稳定性：对转子运动影响小的量均可忽略！

- 1、故障后暂态过程中，网络中的频率近似为50Hz，即 $\omega \approx \omega_0$ ，网络参数近似为常数。
- 2、**忽略**发生故障后网络中的**直流分量**。
原因：衰减快，且产生的磁场在空间静止不动，产生转矩的平均值接近于0。
- 3、**忽略**故障后的**负序电流**和**零序电流**。
- 4、故障期间，发电机用**暂态电势+暂态电抗**等效以计算**正序电流**。

输电系统输送有/无功功率的基本公式



$$\begin{aligned} S &= \dot{U}_1 \hat{I} = \dot{U}_1 \cdot \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{-jX} = \frac{U_1^2 - U_1 U_2 \angle(\delta_1 - \delta_2)}{-jX} \\ &= \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) + j \left[\frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos(\delta_1 - \delta_2) \right] \\ P &= \operatorname{Re} S = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \\ Q &= \operatorname{Im} S = \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos(\delta_1 - \delta_2) \end{aligned}$$

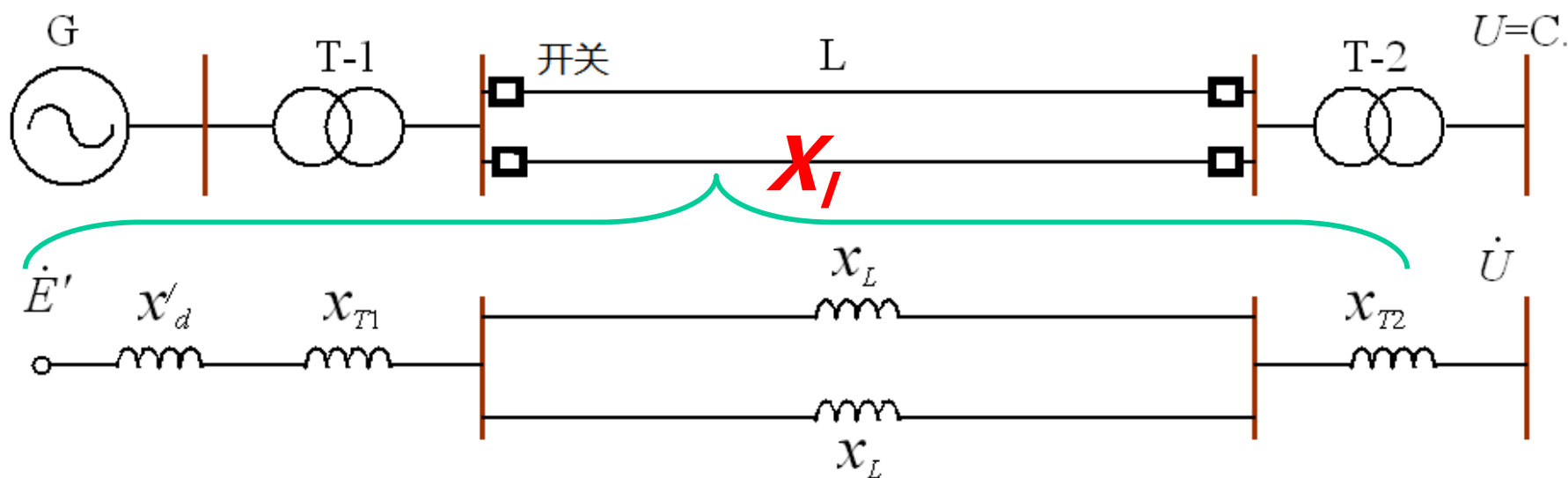
§3 单机无穷大系统暂态稳定分析

一、系统受扰动前后的功率方程

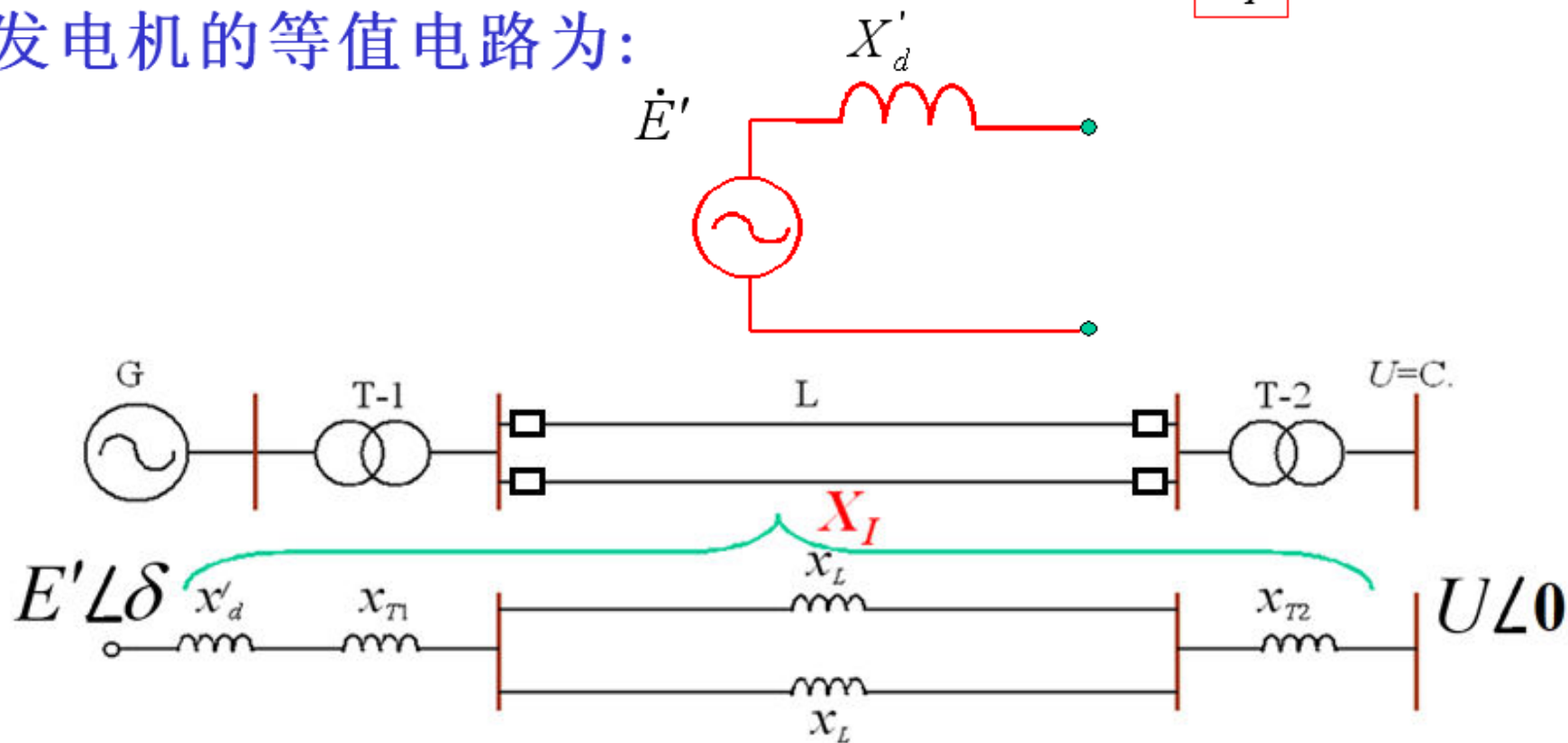
电力系统发生扰动（故障）时可分三个状态：

- a、扰动前系统的正常状态（处于平衡点，系统1）；
- b、系统发生故障后的故障状态（系统2）；
- c、故障切除后系统的状态（系统1或3）。

a、扰动前单机无穷大系统正常状态与等值电路



为简化，暂态过程中假定 $E'=\text{常数}$ (代替 E'_q 不变)，
发电机的等值电路为：



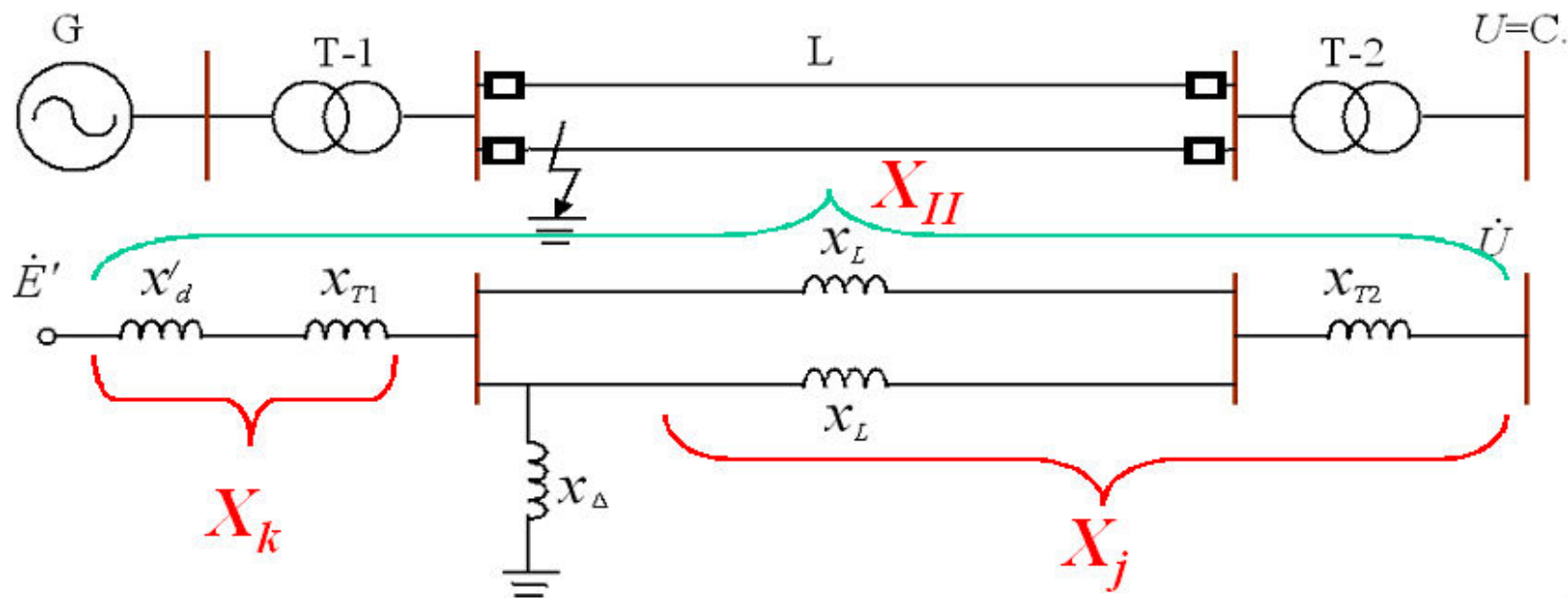
与无穷大之间的电抗为：

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

正常情况下的功角特性

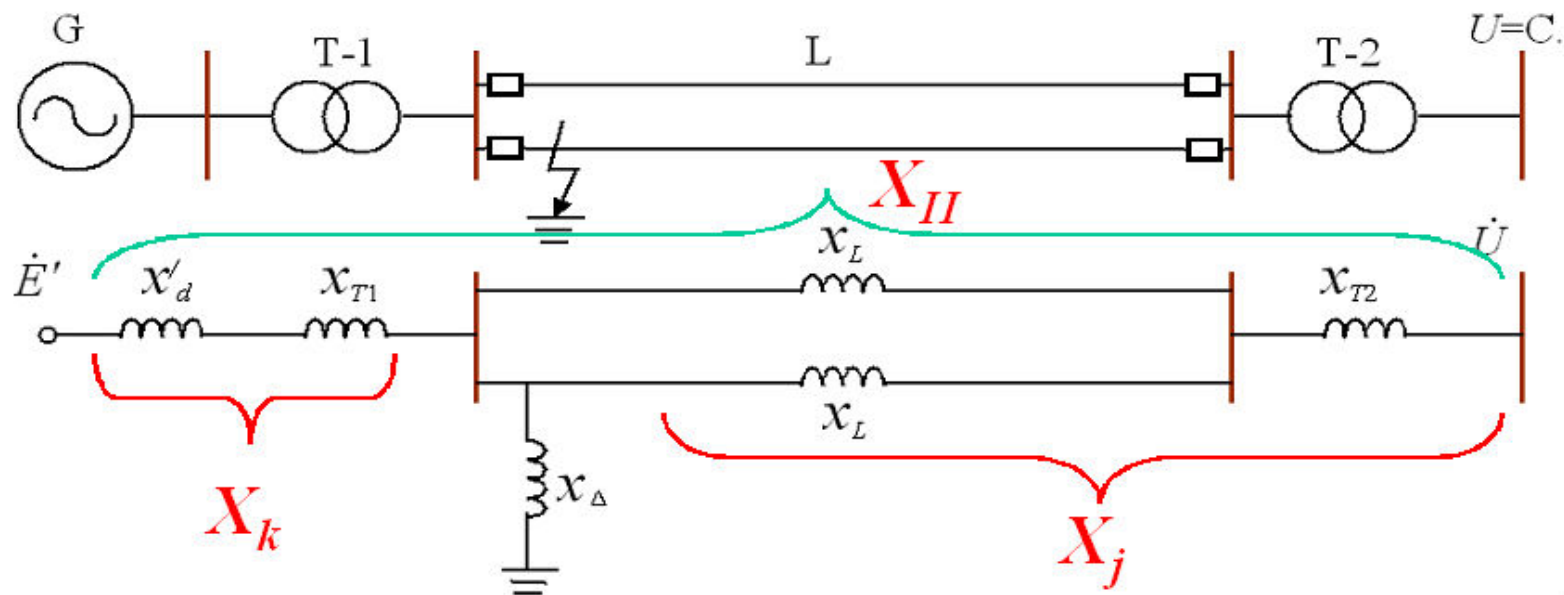
$$P_I = \frac{E'U}{X_I} \sin \delta = P_{IM} \sin \delta$$

b、系统发生故障后的状态与等值电路



暂稳分析中，只需要考虑正序电压/流。故障期间，如何计算正序电压/流？

故障期间，用正序等效定则，在正序网络的故障点接入一附加电抗 x_Δ 以考虑负、零序网对正序电流的影响并计算不对称短路的正序电流和功率特性。



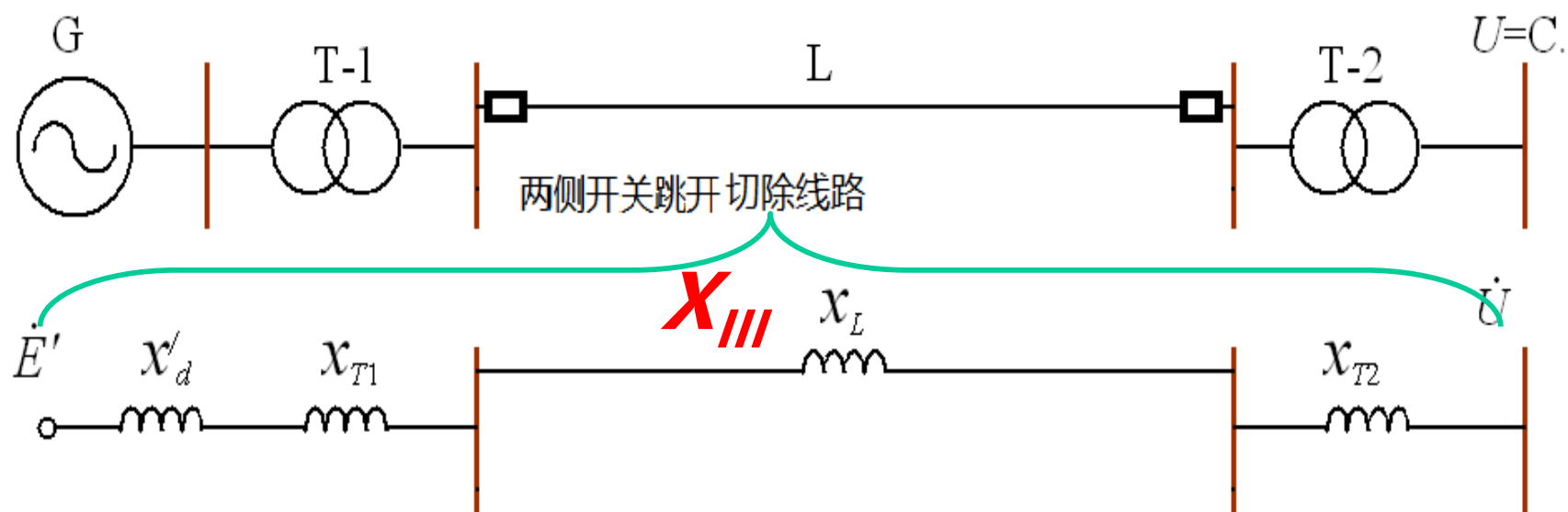
\dot{E}' 与无穷大间电抗经Y/ Δ 变换得: $X_{II} = X_k + X_j + \frac{X_k X_j}{X_\Delta}$

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

故障情况下发电机的功角特性

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

c、故障切除后系统的状态与等值电路



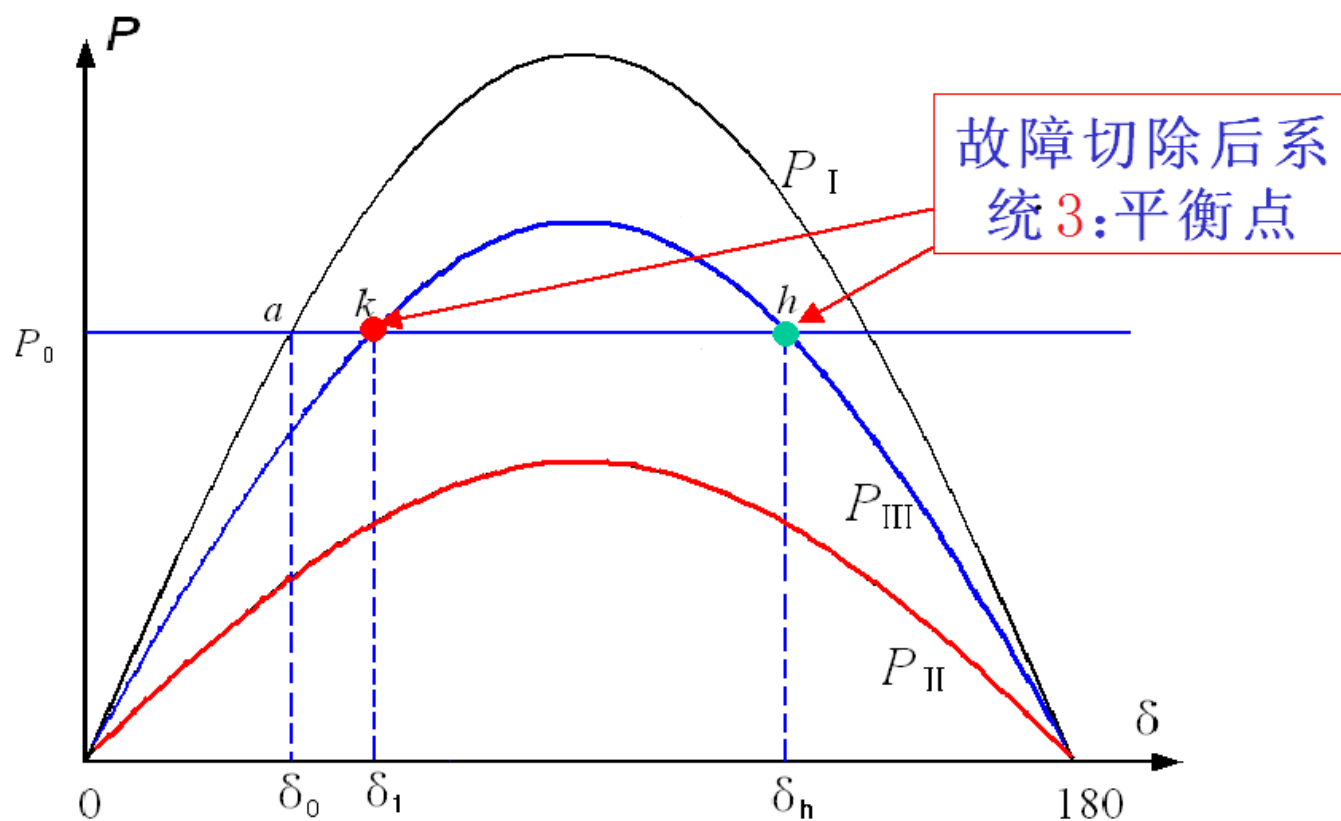
\dot{E}' 与无穷大之间的电抗为：

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

故障切除后发电机的功角特性

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

单机无穷大系统大干扰前后的功率特性



二、暂态稳定的物理过程分析

正常情况下，发电机转子角 $\delta_a = \delta_0$ ， $\omega = 1$ ， $P_m = P_0$ ，

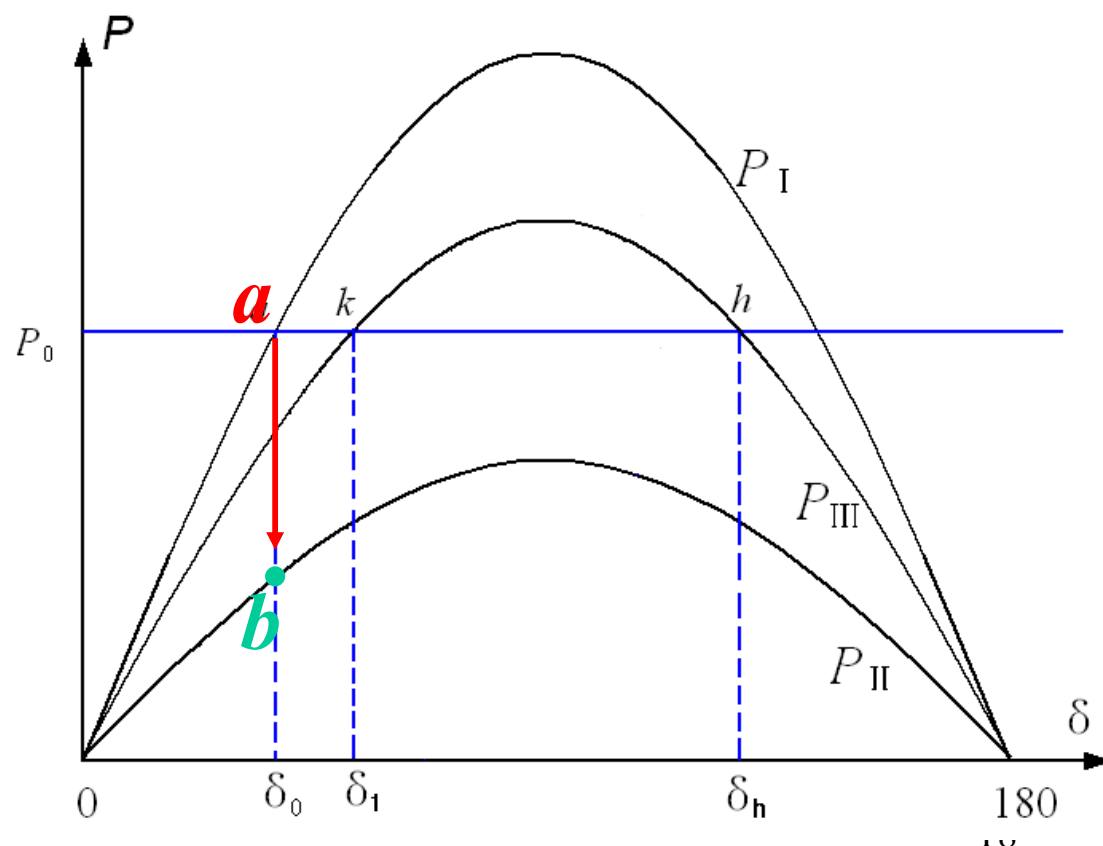
$\frac{d\delta}{dt} = 0$ ， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，调速器不起作用， $P_m = P_0$ 不变。 -平衡态

短路瞬间：

功率特性 $P_I \rightarrow P_{II}$

转子角 δ_0 不变

a 点 \rightarrow b 点
 $\omega = 1$

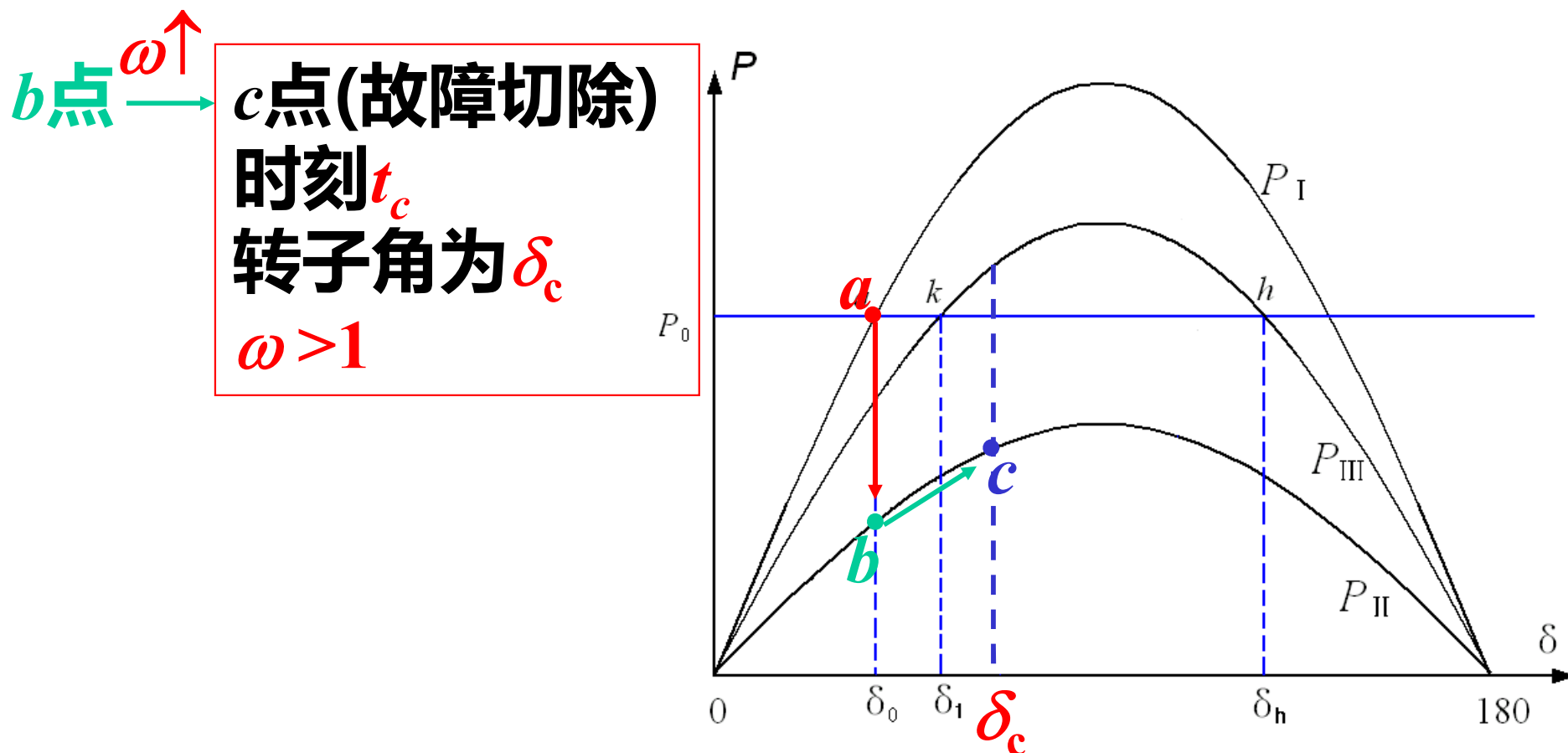


短路期间:

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e = \Delta P$$

$P_m = P_0$, 转子剩余功率 $\Delta P = P_0 - P_{II} > 0$

转子加速, 转子角 δ 沿 P_{II} 曲线增加, 直到故障切除。



故障切除瞬间:

功率特性 $P_{II} \longrightarrow P_{III}$

转子角为 δ_c 保持不变

c 点 \longrightarrow e 点

转子角为 δ_c

$\omega > 1$

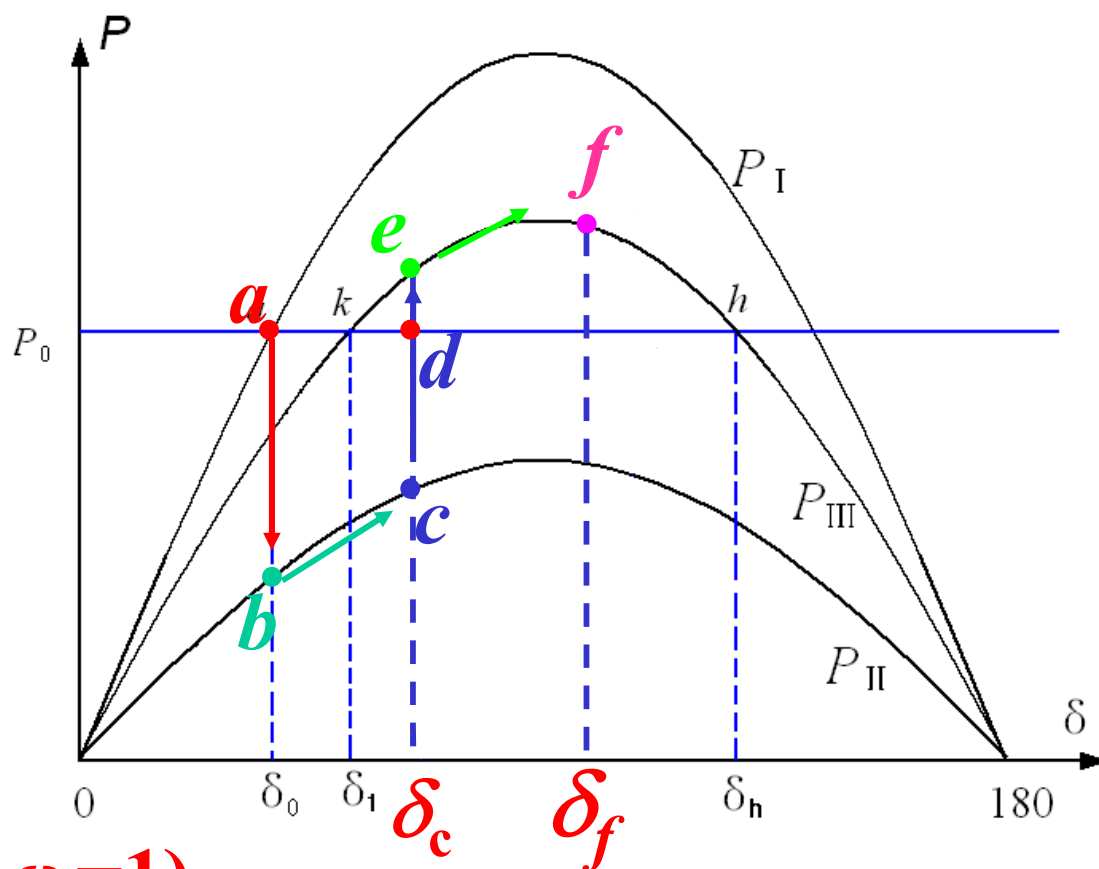
故障切除后:

转子剩余功率

$$\Delta P = P_0 - P_{III} < 0$$

$\omega \downarrow$ 但 $\omega > 1$, 转子角 δ 沿 P_{III} 曲线增加直到 f 点。

e 点 $\xrightarrow{\omega > 1}$ f 点 ($\delta = \delta_f, \omega = 1$)



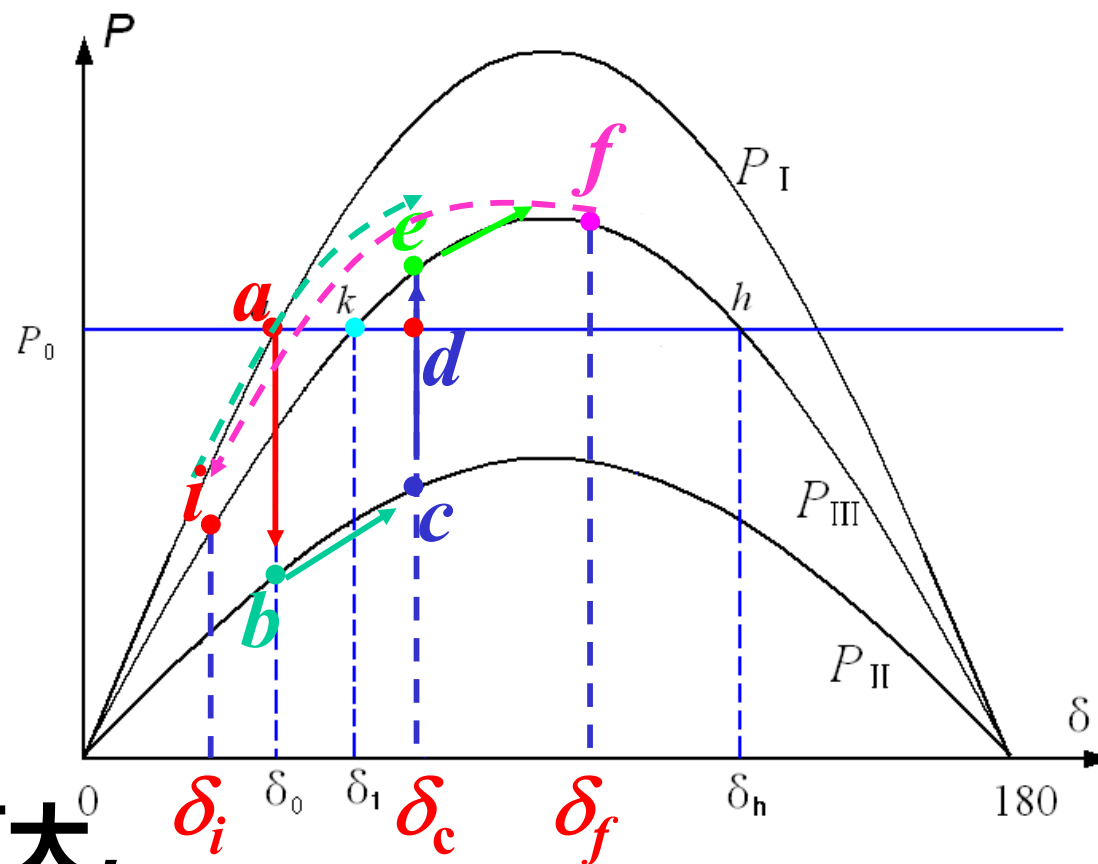
在 f 点 $\delta = \delta_f$, $\omega = 1$

由于 $\Delta P = P_0 - P_{III} < 0$, 仍有 $\omega \downarrow$, $\omega < 1$

δ 沿 P_{III} 回摆...。转子角
围绕 k 点来回摆动？最终
停在 k 点。

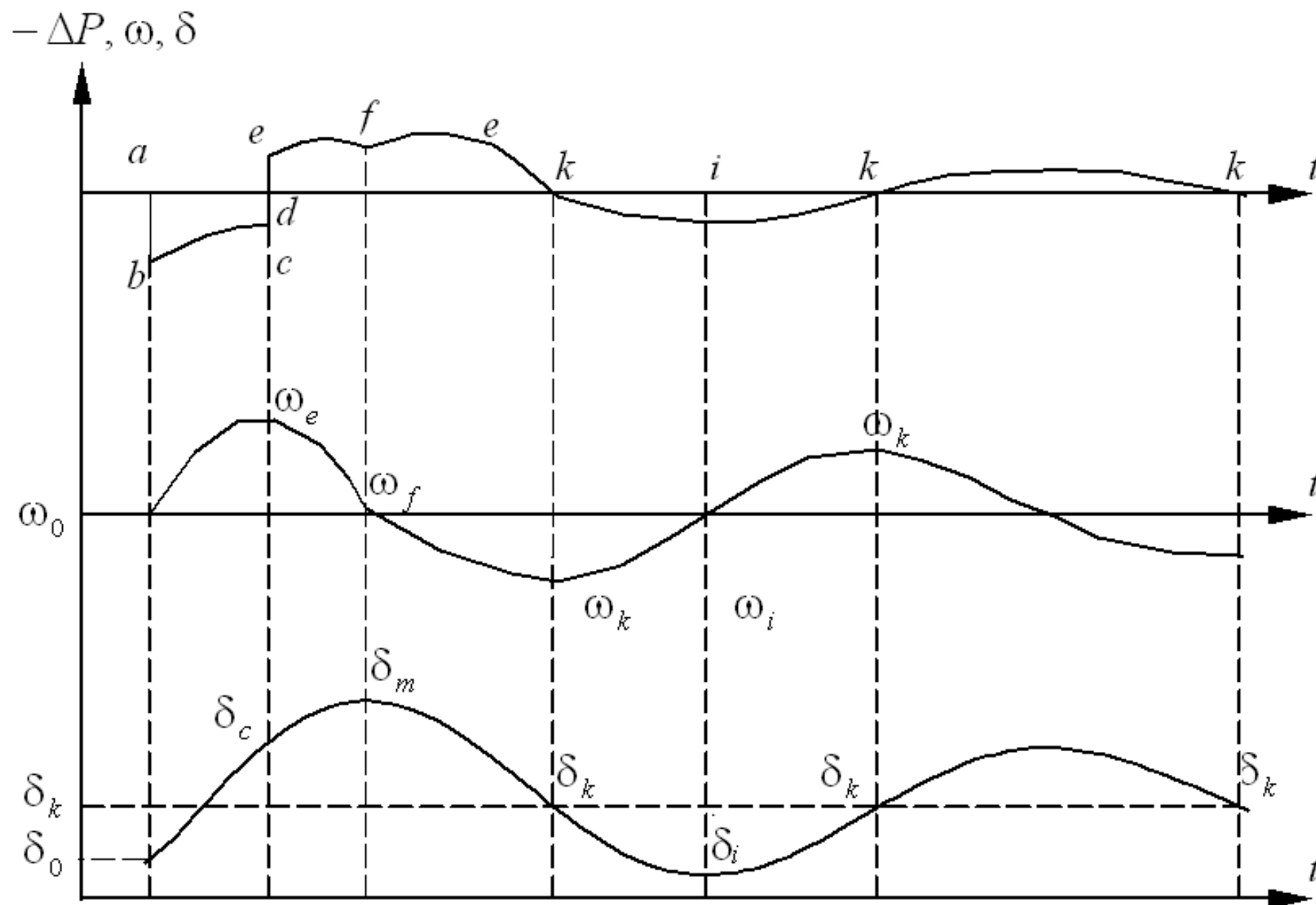
停在 k 点，系统对上述大
干扰是否稳定的？

若故障切除时间长即 δ_c 更大，
摇摆角 $\delta > \delta_h$ ，
系统在大干扰下是否稳定？



系统在大干扰下
的稳定性是否有
判据？

转子剩余功率、转速及转子角的变化曲线



三、等面积定则

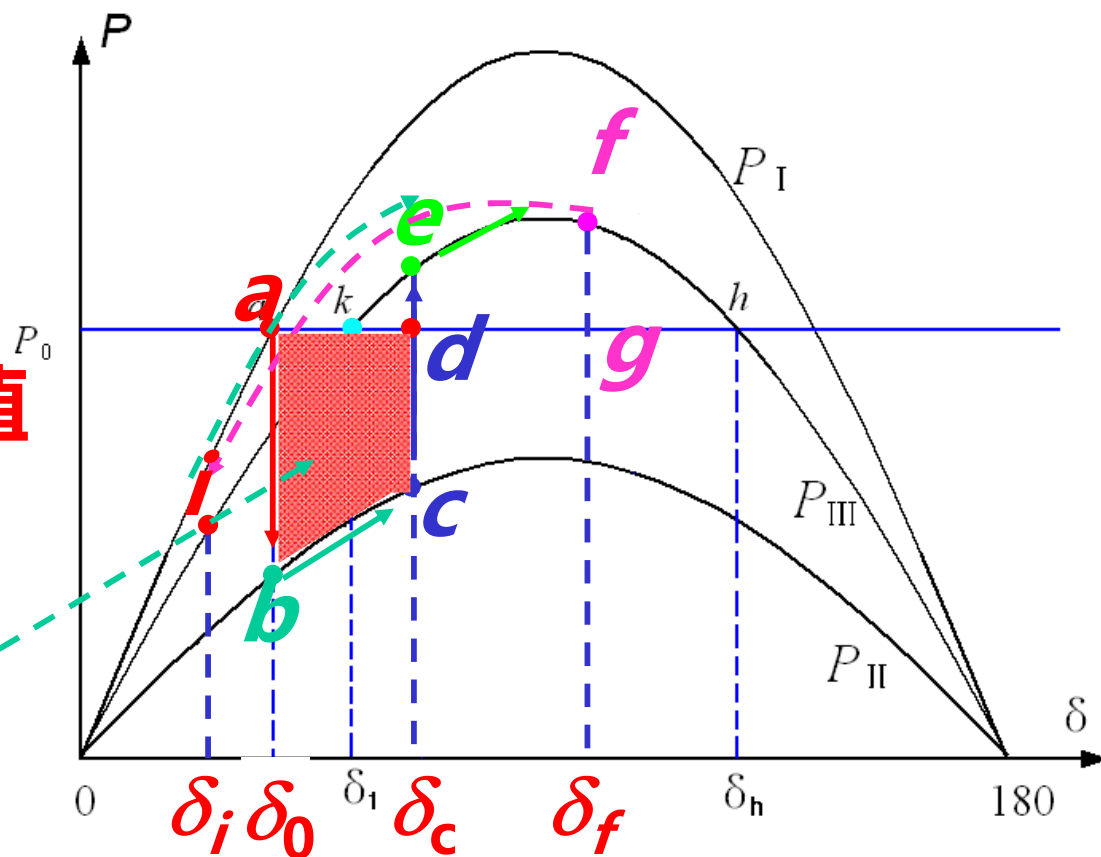
P - δ 曲线下面积 - ?

能量!

力矩 \times 角位移 = 能量

功率标么值 = 力矩标么值

功率 \times 角度 = 能量。



故障期间:

$\delta_0 \rightarrow \delta_c$ 过程, 转子受到过剩功率 $\Delta P = P_0 - P_{II}$ 的加速

$$S_{abcd} = S_{\text{加速}} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{II}) d\delta \quad \text{转子获得的动能。}$$

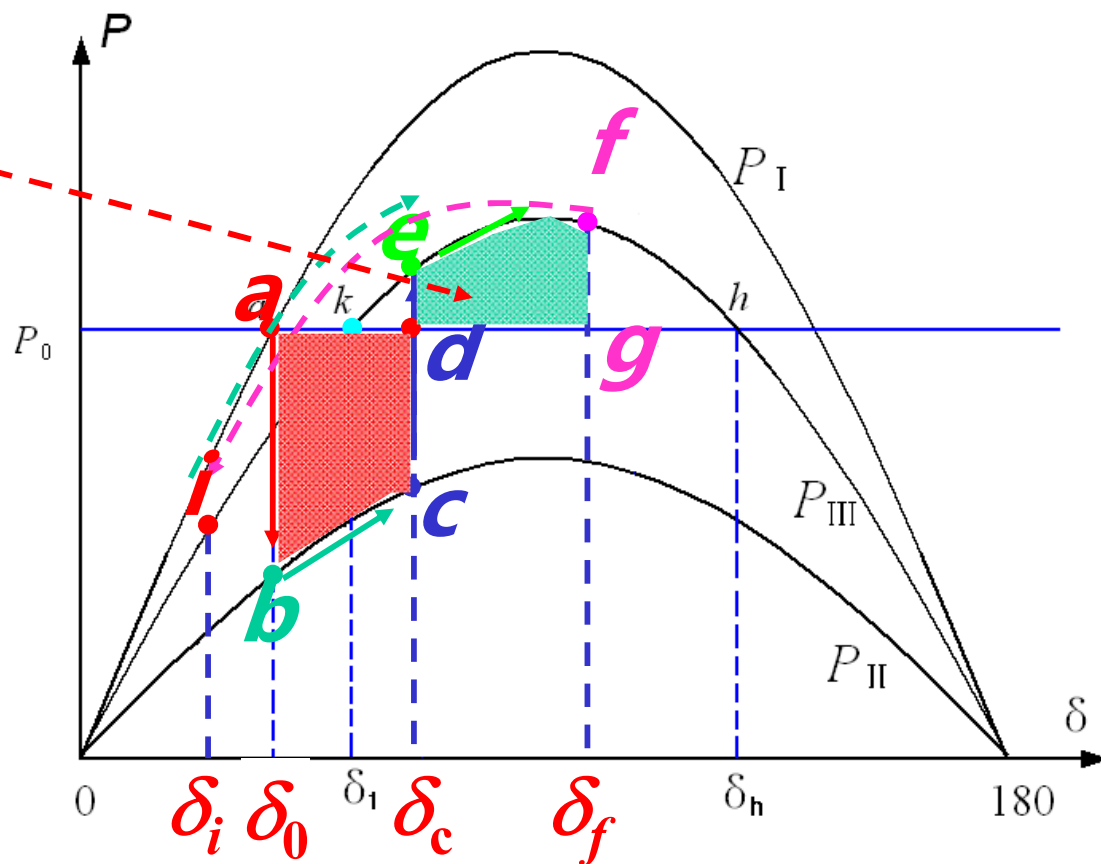
故障切除后:

$\delta_c \rightarrow \delta_f$ 过程, 转子剩余功率 $\Delta P = P_0 - P_{III} < 0$, 转子减速。

$S_{edgf} = S_{\text{减速}} = \int_{\delta_c}^{\delta_f} (P_{III} - P_0) d\delta$ 转子失去的动能。

转子在 b 点、 f 点转速均为1, 由能量守恒

$$S_{\text{加速}} = S_{\text{减速}}$$



加、减速面积与暂态稳定的关系：

1、大干扰后，如果发电机减速面积 = 加速面积，系统可保持暂态稳定，反之亦然 - **等面积定则**；

2、故障切除后，转子的最大减速面积为：

$$S_{\text{减速 max}} = \int_{\delta_c}^{\delta_h} (P_{III} - P_0) d\delta$$

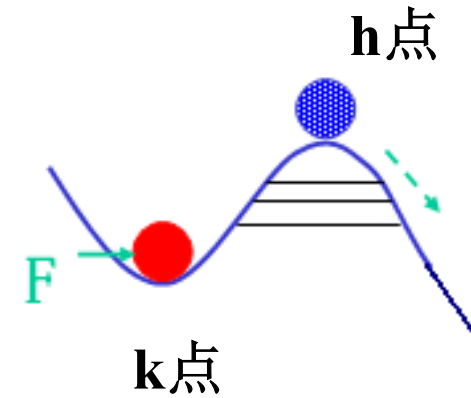
当最大减速面积 \geq 加速面积时，能保证发电机的暂态稳定，否则发电机将失去稳定，即

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{II}) d\delta \leq \int_{\delta_c}^{\delta_h} (P_{III} - P_0) d\delta$$

暂态稳定的**充分必要条件**！

等面积定则在多机系统中的应用

- 不稳定的**边界在不稳定平衡点**上；
- 模拟**动能、势能**的概念，等面积定则可推广应用于多机系统；
- 大干扰同步稳定判别的**扩展**等面积定则。

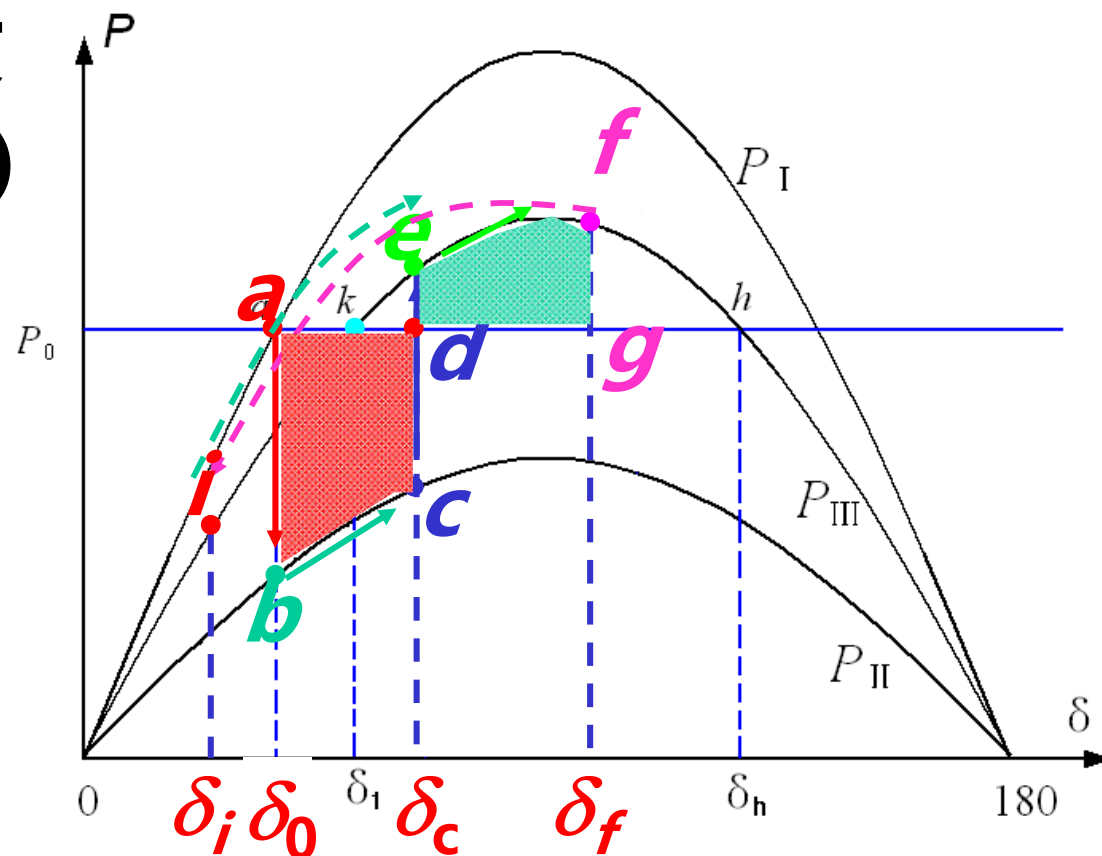


δ_c 越小，即故障切除时间越短，加速面积**越小**，最大可能的减速面积**越大**，发电机**越容易保持稳定**。

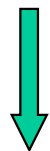
发电机保持稳定的**最大**故障切除角 δ_{cr} --**极限**（临界）切除角，对应时间 t_{cr} --**极限**（临界）切除时间。

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_h} (P_{III} - P_0) d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{IIM} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_h} (P_{IIM} \sin \delta - P_0) d\delta$$



$$\begin{aligned}
 & P_0 \cdot (\cancel{\delta_{cr}} - \delta_0) + P_{IIM} \cdot (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_0) \\
 &= P_{IIM} \cdot (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_h) + P_0 \cdot (\cancel{\delta_{cr}} - \delta_h)
 \end{aligned}$$



$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_0(\delta_h - \delta_0) + P_{IIM} \cos \delta_h - P_{IIM} \cos \delta_0}{P_{IIM} - P_{IIM}}$$

极限切除角 δ_{cr}

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \frac{P_0(\delta_h - \delta_0) + P_{IIM} \cos \delta_h - P_{IIM} \cos \delta_0}{P_{IIM} - P_{IIM}}$$

其中

$$P_0 - P_{IIM} \sin \delta_h = 0 \left(\delta_h > \frac{\pi}{2} \right) \Rightarrow \delta_h = \pi - \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{IIM}}$$

已知极限切除角 δ_{cr} ，求极限切除时间 t_{cr}

故障期间，发电机的方程为：

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j}(P_0 - P_{II}) \end{cases} \xrightarrow{\quad} \begin{cases} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_j}(P_0 - P_{II}) = \frac{\omega_0}{T_j}(P_0 - P_{IIM} \sin \delta) \\ t = 0, \delta = \delta_0, \frac{d\delta}{dt} = 0 \end{cases}$$

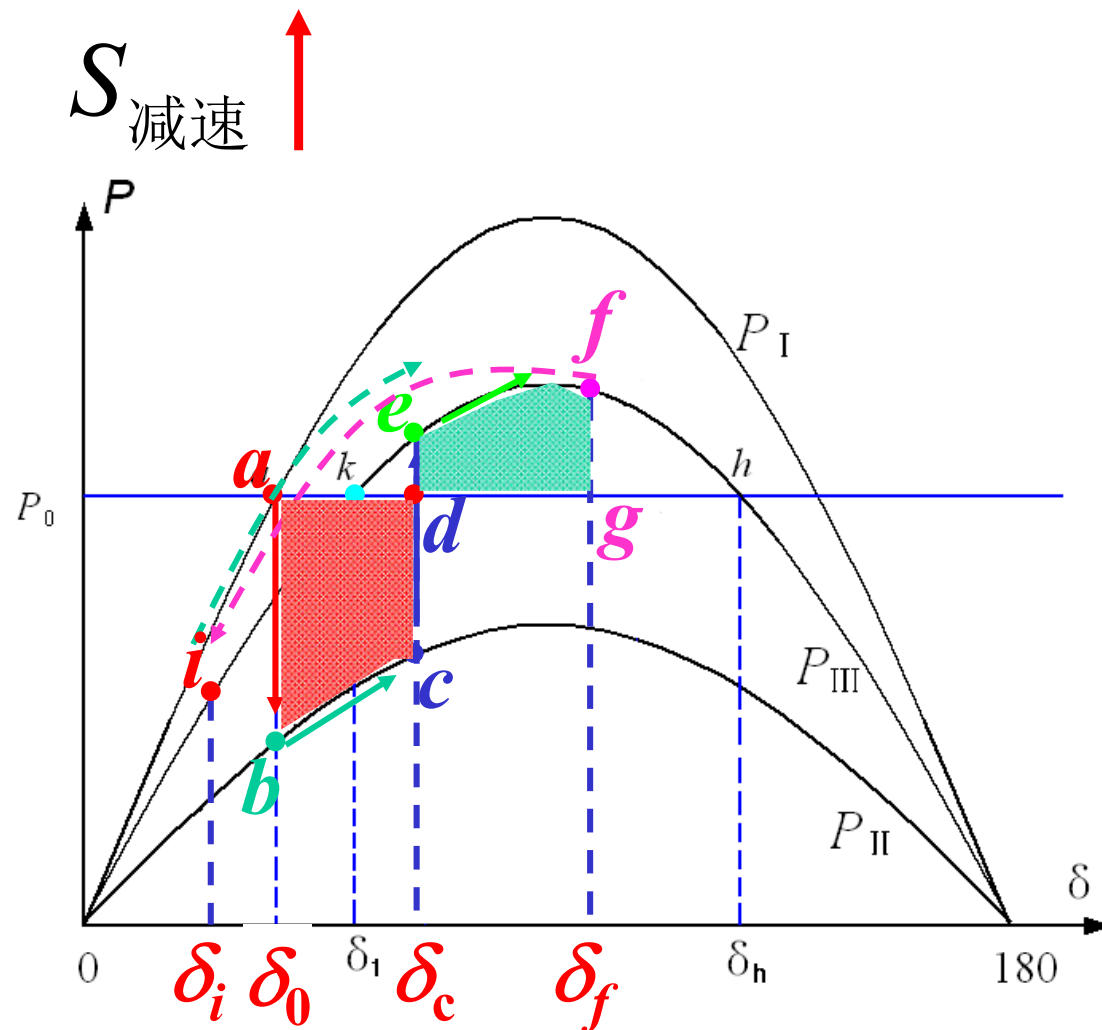
$t = 0, \delta = \delta_0, \omega = 1$

利用数值解法，求出 $\delta(t)$ ， $\omega(t)$ 曲线，
找出 δ_{cr} 对应的时间即为临界切除 t_{cr}

四、提高系统暂态稳定性的措施

根本措施： $S_{\text{加速}} \downarrow$ 或 $S_{\text{减速}} \uparrow$

- 1、快速切除故障 $\delta_c \downarrow$;
- 2、提高发电机输出的电磁功率 $P_e \uparrow?$;
- 3、减少原动机输出的机械功率 $P_0 \downarrow?$



§1 电力系统保护的基本概念

一、继电保护的三大功能

- 1、**有选择性地**将故障元件从系统中**快速、自动地切除**，使损坏程度最小，保证最大限度地迅速恢复无故障部分的运行；
- 2、反应电气元件的运行工况，发警报、减负荷或延时跳闸；
- 3、尽快自动恢复停电部分的供电。

电力系统保护小知识

- **保护装置** - 自动实现电力系统保护的装置，传统上称为**继电保护装置**（继电器是其主要元件）
- 继电保护泛指**继电保护技术**或由各种**继电保护装置**组成的**继电保护系统**

二、继电保护的基本原理与类型

基本原理：识别故障或异常状况的特征，采取适当的手段**自动**消除故障或异常。

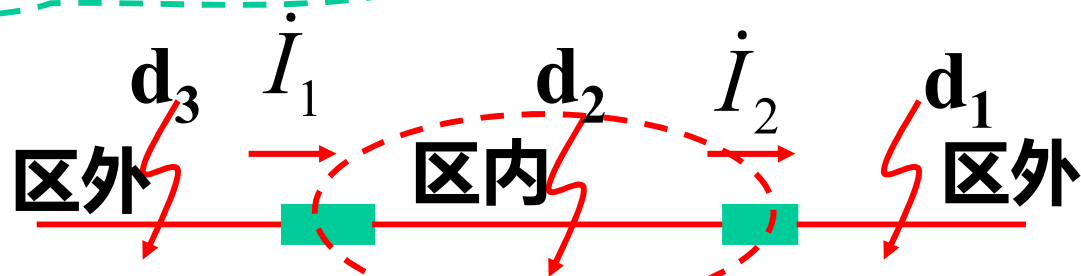
熔断器保护和过电流保护：根据故障后电流显著增大的特征构成的； $I \geq I_{dz}$

低电压保护：根据故障后电压显著降低的特征构成

阻抗（距离）保护：同时反应电压降低与电流增加的保护；

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

阻抗反应故障点距离远近



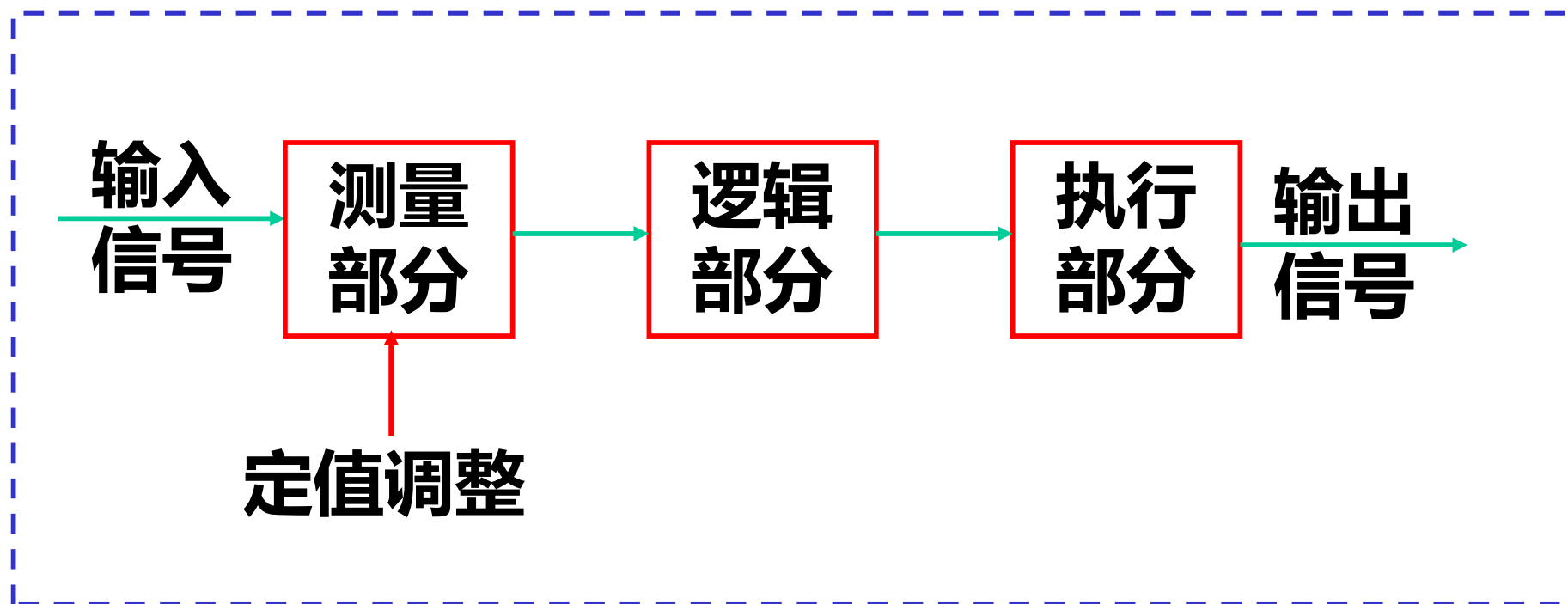
发生故障 d_2 $\Delta I = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$ **很大**, 故障 d_1 、 d_3 时, ΔI **很小**

电流差动保护: 根据区内故障后电流差很大, 而区外故障电流差基本为零的特征构成的;

零序电流保护: 根据故障后零序电流很大的特征构成的;

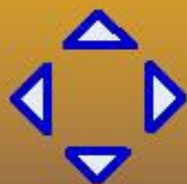
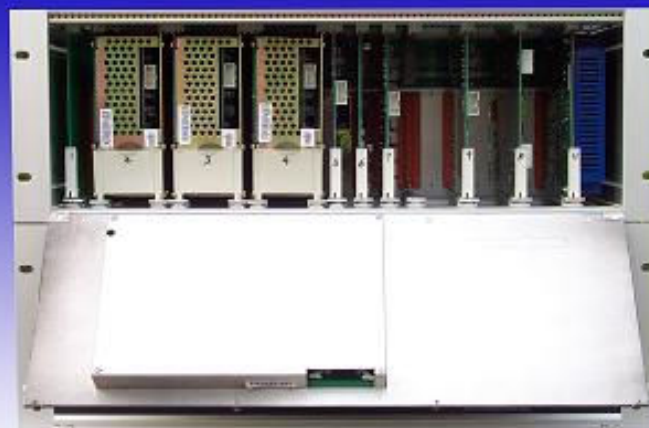
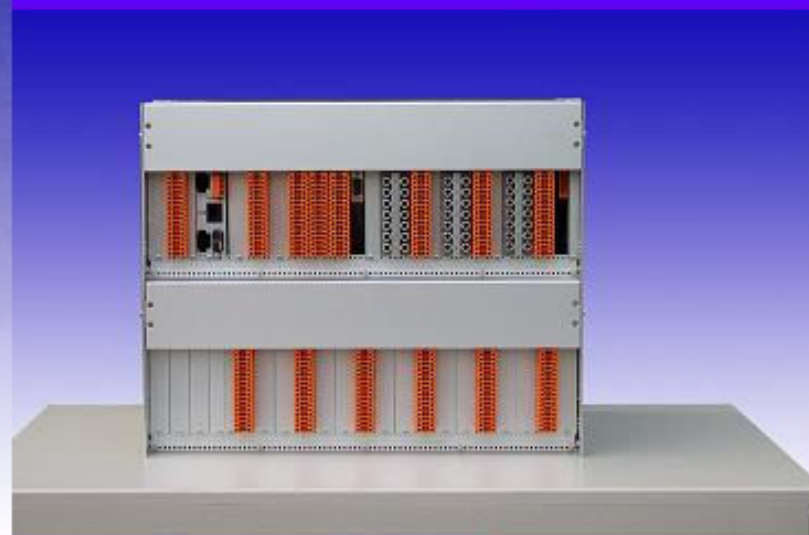
对故障分析的深入及分析手段 (微机) 的大大提高, 经常出现**新**的保护原理。

三、继电保护装置的构成原理



现大部分已经数字化、微机化！

装置图片

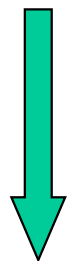


四、继电保护技术发展简史

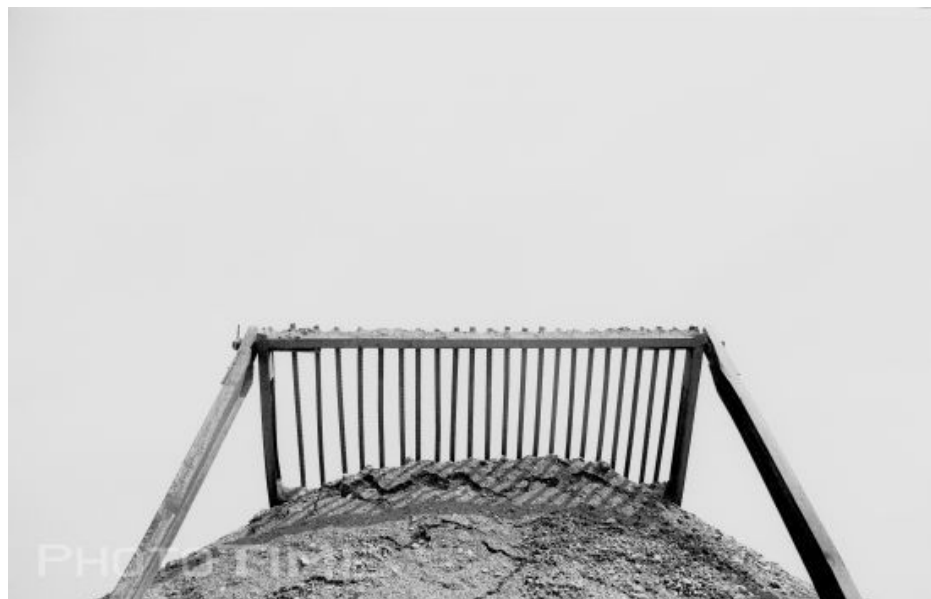
- 19世纪末出现熔断器
- 1901年，第一台机电型继电器
- 1908年，差动继电器
- 1910年，电流方向继电器
- 1920年，距离保护
- 1927年，高频保护-现逐步被**光差动**保护取代
- 20世纪80年代，微型计算机、处理器保护

现在，算法复杂、功能全面的集成式**综合型保护系统**，利用现代通讯技术的**区域型保护**与控制结合的控制保护系统正在发展。

传统的保护：**山脚下的救护车**



控制型保护：**山顶上加护栏，山脚下有救护车**



§2 对电力系统保护的基本要求

作用于跳闸的继电保护，技术上有四大要求：

- 可靠性
- 选择性
- 快速性
- 灵敏性

可靠性：既不拒动，也不误动——

该保护装置设计的保护范围内发生了它应该动作的故障时，它不应该拒绝动作；在任何其它该保护不应该动作的情况下，它不应该误动作。

保护装置拒动，造成故障后设备损坏、烧毁等等。

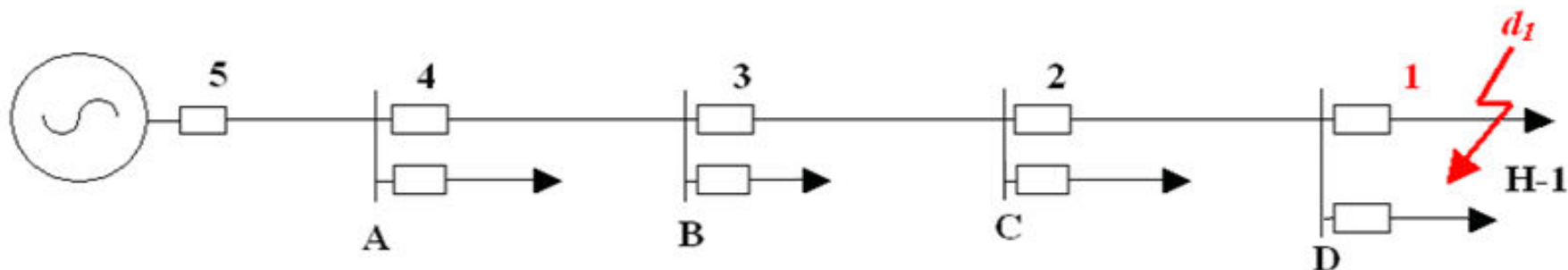
保护装置误动，影响正常供电和设备的正常工作。

最高要求：不拒动也不误动！

实际中：

有时宁愿拒动而不误动 - 保证供电，设备承受力大；
有时宁愿误动而不拒动 - 设备承受力小，负荷不重要。

选择性：在可能最小的范围内将故障部分自电网中断开，最大限度保证非故障部分继续供电。



(1, 2, 3, 4, 5为断路器，均装有保护)

**d_1 短路可断开1、2、3、4、5，切除故障；
为保证最大限度供电，应断开几？**

保护选择性出现错误，宿舍插座短路导致整栋楼停电！

快速性： 以可能最短的时间切除故障或消除异常工况。

减轻设备的损坏程度、加快非故障部分的恢复供电、提高系统的稳定性（临界切除时间）

数字微机保护 - 故障的判断速度 ($<<0.02$ 秒)

最快的断路器 - 40毫秒

故障切除最快时间 - 40毫秒-可防单相故障发展。

最新的进展：电力电子开关速度几十微秒

刚刚研制成功的500kV直流断路器：

判断3毫秒，机械电子混合式动作3毫秒，共6毫秒

正在研究几百微秒的快速保护

灵敏性（灵敏度）：保护装置反应故障的能力。

灵敏系数：

$$K_{lm} = \frac{\text{故障参数}}{\text{整定值}} \quad \left| \text{不利运行方式和不利故障类型} \right.$$

如设定100A电流保护动作，而实际短路达300A，灵敏性高，能可靠动作；如实际短路105A，可靠动作？

•可靠性、选择性、快速性、灵敏性在保护设计时可能相互矛盾，根据实际情况，排出优先等级，设计时适当取舍。

作业

1、单机无穷大系统中，假设暂态过程中发电机电势 E' 不变。正常运行时 $\delta_0=30^\circ$ ，发电机 E' 与无穷大系统 U 之间的等效电抗为 X_1 ；当线路发生某种故障时， E' 与 U 之间等效电抗变为 $10X_1$ ；当 $\delta=60^\circ$ 时，切除故障线路， E' 与 U 之间等效电抗变为 $1.5X_1$ ；当 $\delta=120^\circ$ 时，线路重合闸成功， E' 与 U 之间等效电抗恢复为 X_1 。试判断重合闸后该系统是否能保持暂态稳定。

关于考试

- **考题类型：**
- **判断题（概念）（约10%）**
- **选择题（概念）（约20%）**
- **填空题（概念、计算）（约10%）**
- **简述题（概念和知识、定性题）（约20%）**
- **计算分析题（综合、计算、大题）（约40%）**

- **半开卷：一张A4纸（公式）**
- **答疑时间：**
12月31日,9:00-11:30,14:30-17:00
- **答疑地点：西主楼3-102会议室**