



ELECTRIC POWER ENGINEERING 电力工程

鞠平 主编

第十二章 电力系统的稳定

第十二章 电力系统的稳定

◆ 12.1 电力系统稳定概述

◆ 12.2 简单电力系统的静态稳定

◆ 12.3 简单电力系统的暂态稳定

◆ 12.6 多机电力系统稳定分析方法

◆ 12.7 提高电力系统稳定性的措施

12.1 电力系统稳定概述

12.1.1 电力系统稳定的定义与类

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

12.1.1 电力系统稳定的定义与类型

1) 我国对于电力系统稳定性的定义

电力系统稳定性：电力系统受到事故扰动后保持稳定运行的能力。

- ❖ **静态稳定**：电力系统受到小干扰后，不发生非周期性失步，自动恢复到初始运行状态的能力。
- ❖ **暂态稳定**：电力系统受到大干扰后，各同步电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力。
- ❖ **动态稳定**：电力系统受到小的或大的扰动后，在自动调节和控制装置的作用下，保持长过程的运行稳定性的能力。
- ❖ **电压稳定**：电力系统受到小的或大的扰动后，系统电压能够保持或恢复到允许范围内，不发生电压崩溃的能力。

12.1.1 电力系统稳定的定义与类型

2) IEEE关于稳定性分类:

❖ **静态稳定**: 在任何小干扰后, 电力系统能恢复到与干扰前相同或相近的运行状态, 则称电力系统在这一特定运行状态下是静态稳定的, 也成为电力系统的小干扰稳定性。

❖ **暂态稳定**: 在某一特定干扰后, 电力系统能达到一种可以接受的稳定运行状态, 则称电力系统在这一特定运行状态(原始状态)下, 对于某种特定干扰是暂态稳定的, 也称为电力系统的大干扰稳定性。

12.1.1 电力系统稳定的定义与类型

3) 稳定分类方式

按失稳方式:

- 单调不稳定: 或称滑行不稳定, 非周期不稳定, 主要由同步力矩不足引起。
- 震荡不稳定: 主要由系统阻尼力矩不足引起。

按是否需要控制作用:

- 自然或固有稳定性: 不需要采取自动控制措施即可保持稳定。
- 条件稳定性: 需要采取某种特定控制作用来保持稳定。

12.1.1 电力系统稳定的定义与类型

按时间跨度：

- 短期稳定性：在几秒钟内系统的稳定性。
- 中期稳定性：一般指几秒至几十秒范围内系统的稳定性。
- 长期稳定性：一般指几十秒至几十分钟范围内系统的稳定性。

按决定稳定的物理因素：

- 同步（功角）稳定性
- 频率稳定性
- 电压稳定性
- 机械与电气联合系统的稳定性

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

1、网络方程

两个简化：

- ①忽略电磁暂态过程
- ②线路和变压器等元件的参数采用额定频率下的数值。

网络方式

$$\mathbf{YU} = \mathbf{I}$$

\mathbf{Y} ——系统节点的对称复数导纳矩阵

\mathbf{U} ——节点电压列向量

\mathbf{I} ——为节点注入电流列向量

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

稳定分析计算中，常将网络方程写成如下实数型式：

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} \\ B_{11} & G_{11} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{1i} & -B_{1i} \\ B_{1i} & G_{1i} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{1n} & -B_{1n} \\ B_{1n} & G_{1n} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{i1} & -B_{i1} \\ B_{i1} & G_{i1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii} \\ B_{ii} & G_{ii} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{in} & -B_{in} \\ B_{in} & G_{in} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{n1} & -B_{n1} \\ B_{n1} & G_{n1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{ni} & -B_{ni} \\ B_{ni} & G_{ni} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{nn} & -B_{nn} \\ B_{nn} & G_{nn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1x} \\ U_{1y} \\ \vdots \\ U_{ix} \\ U_{iy} \\ \vdots \\ U_{nx} \\ U_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1x} \\ I_{1y} \\ \vdots \\ I_{ix} \\ I_{iy} \\ \vdots \\ I_{nx} \\ I_{ny} \end{bmatrix}$$

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

2、发电机组模型

发电机组的模型包括同步发电机本身的数学模型、励磁系统模型以及原动机及其调速系统模型。

(1) 同步发电机的数学模型

- 忽略定子绕组的电磁暂态过程
- 忽略阻尼绕组的电磁暂态过程

描述励磁绕组的电磁暂态过程方程

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fq} - E'_q - (x_d - x'_d)i_d$$

T'_{d0} —— 励磁绕组时间常数

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

描述转子运动的方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega_0(\omega - 1) \\ T_J \frac{d\omega}{dt} &= P_T - D(\omega - 1) - P_E \end{aligned} \right\}$$

T_J ——惯性时间常数； D ——阻尼系数

P_T ——机械功率； P_E ——电磁功率

发电机电磁功率表达式

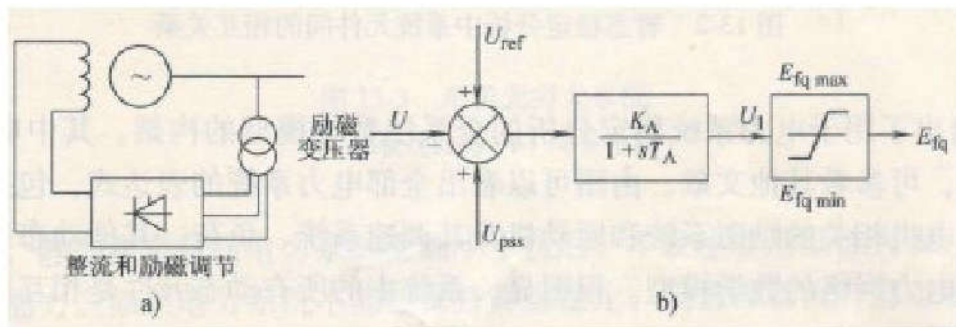
$$P_E = P + |\dot{i}|^2 r_a = U_x I_x + U_y I_y + (I_x^2 + I_y^2) r_a$$

若忽略定子铜耗

$$P_E \approx P$$

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

(2) 励磁系统模型



自并励静止励磁系统

a)结构示意图 b)简化传递函数框图

$$E_{fq} = E_{fq \max}$$

$$\frac{dE_{fq}}{dt} = \frac{1}{T_A} \left[-E_{fq} + K_A (U_{\text{ref}} - U) \right]$$

$$E_{fq} = E_{fq \min}$$

$$U_1 \geq E_{fq \max}$$

$$E_{fq \min} \leq U_1 \leq E_{fq \max}$$

$$U_1 < E_{fq \min}$$

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

3、电力负荷模型

我国稳定计算时，多采用综合负荷模型。

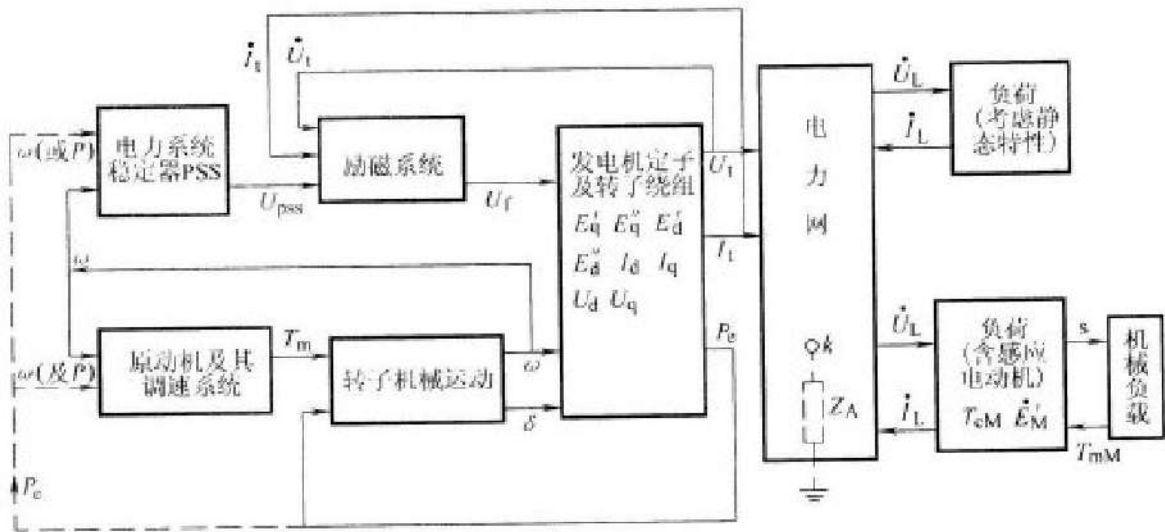
4、全系统的负荷模型

整个系统的模型在数学上可用微分—代数方程组描述：

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y)$$

$$0 = g(x, y)$$

12.1.2 电力系统稳定分析的模型



暂态稳定分析中系统元件间的相互关系

12.1.2 电力系统稳定分析的模型

微分方程式主要包括：

- 描述同步发电机暂态和次暂态电动势变化规律的微分方程
- 描述同步发电机转子运动的摇摆方程
- 描述同步发电机组中励磁调节系统动态特性的微分方程
- 描述同步发电机组中原动机及其调速系统动态特性的微分方程
- 描述各感应电动机和同步电动机负荷动态特性的微分方程
- 描述直流系统整流器和逆变器控制行为的微分方程
- 描述其他动态装置动态特性的微分方程

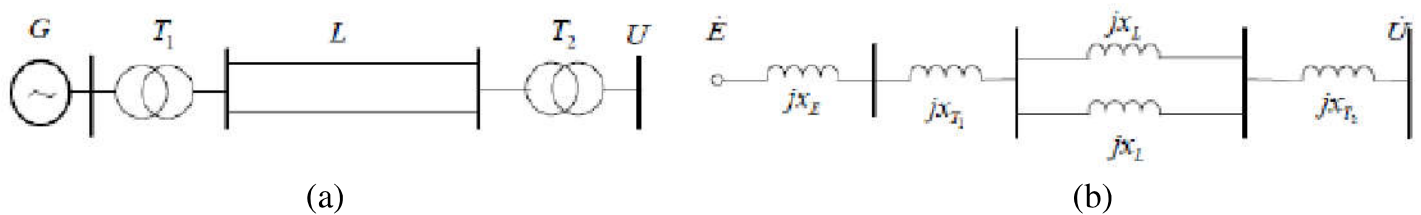
12.1.2 电力系统稳定分析的模型

代数方程主要包括：

- ❖ 电力网络方式
- ❖ 各同步发电机定子电压方程
- ❖ 各直流线路的电压方程
- ❖ 负荷的电压静态特性方程

12.2 简单电力系统的静态稳定

简单电力系统：电力系统中只有单个发电机或电源



单机无穷大系统
a)系统接线 b)等效电路

❖ 电力系统静态稳定分析的目的：

应用相应的判据，确定电力系统的稳定性和输电线的输送功率极限，检验在给定方式下的稳定储备。

❖ 需要进行静态稳定分析的范围：

大电源送出线、跨大区或省网间联络线、网络中薄弱断面等。

12.2 简单电力系统的静态稳定

❖ 功—角特性：

描述发电机有功功率与功角之间关系的方程和曲线。

简单电力系统，假设发电机内电动势 E 恒定，功—角特性方程：

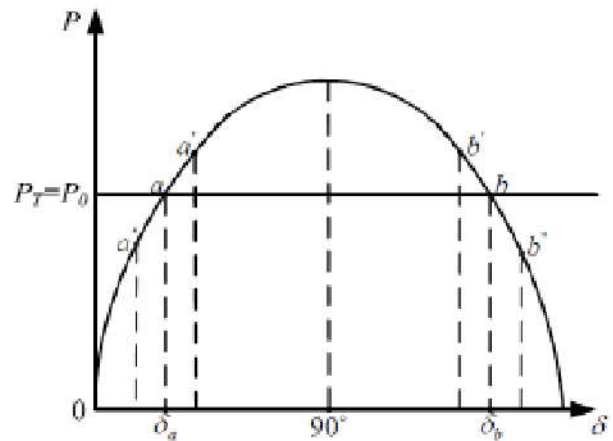
$$P = P_E(\delta)$$

设原动机的机械功率 P_T 不变

忽略损耗，有 $P_0 = P_E$

稳定判据 $S_E = \frac{dP}{d\delta} > 0$

S_E 整步功率因数



简单电力系统的功—角特性

12.2 简单电力系统的静态稳定

❖ 静态稳定储备系数

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

P_M 为极限功率； P_0 为某一运行情况下的输送功率。

我国电力系统的静态稳定储备标准：

- ✓ 正常运行方式下，对不同的电力系统，按功角判据计算的静态稳定储备系数应为15%~20%；
- ✓ 事故后运行方式或特殊运行方式下，不得低于10%。

12.2 简单电力系统的静态稳定

❖ 发电机功—角特性

1) 假设 E_q 恒定

隐极发电机，功—角特性关系

$$P = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta$$

式中： $x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + \frac{x_l}{2} + x_{T2}$

$$S_E = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta$$

极限功角 $\delta_M = \pi/2$ ，极限功率 $P_M = E_q U / x_{d\Sigma}$

12.2 简单电力系统的静态稳定

凸极发电机，功一角特性关系

$$P = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

式中 $x_{q\Sigma} = x_q + x_{T1} + \frac{x_l}{2} + x_{T2}$

$$S_E = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta + U^2 \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \cos 2\delta$$

一般 $x_d > x_q$ ，极限功角 $\delta_M < \pi/2$

12.2 简单电力系统的静态稳定

2) 假设 E'_q 恒定

功—角特性关系

$$P = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x'_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

式中 $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{T1} + \frac{x_l}{2} + x_{T2}$

$$S_E = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta + U^2 \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x'_{d\Sigma}} \right) \cos 2\delta$$

一般 $x'_d < x_q$ ，极限功角 $\delta_M > \pi/2$

12.2 简单电力系统的静态稳定

3) 假设 E' 恒定

功一角特性关系

$$P = \frac{E'U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta'$$

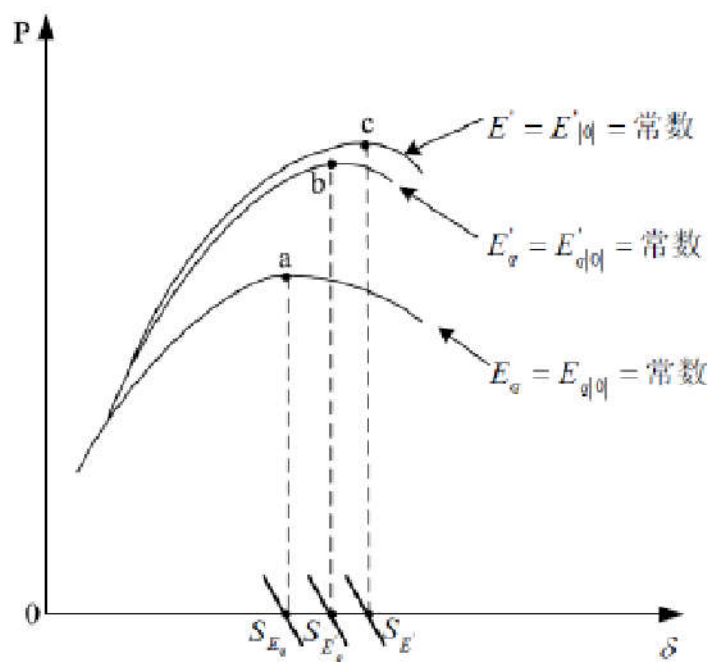
式中, δ' 为 E' 和 U 之间的夹角

$$\delta' = \delta - \arcsin \left[\frac{U}{E'} \left(1 - \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{q\Sigma}} \right) \sin \delta \right]$$

$$S_E = \frac{E'U}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta'$$

极限功角 $\delta_M > \pi/2$

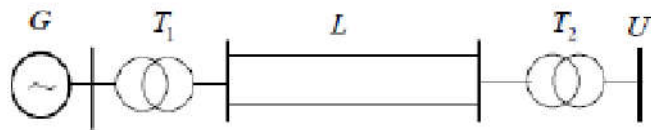
12.2 简单电力系统的静态稳定



发电机的几种功一角特性

12.2 简单电力系统的静态稳定

例：图中所示简单系统中各元件参数如下：



发电机G: $S_N = 300\text{MW}$, $U_N = 18\text{kV}$, $\cos \varphi_N = 0.85$,

$$x_d = x_q = 2.36, x'_d = 0.32$$

变压器T₁: $S_N = 360\text{MV}\cdot\text{A}$, $18\text{kV}/242\text{kV}$, $U_s\% = 14$

变压器T₂: $S_N = 360\text{MV}\cdot\text{A}$, $220\text{kV}/121\text{kV}$, $U_s\% = 14$

输电线路l: $U_N = 220\text{kV}$, $l = 200\text{km}$, $x_1 = 0.41\Omega / \text{km}$

运行情况: 无限大系统母线吸收的功率为 $P_0 = 250\text{MW}$,
 $\cos \varphi_0 = 0.98$; 无限大系统母线电压 $U = 115\text{kV}$

12.2 简单电力系统的静态稳定

试计算当发电机分别保持 E_q 、 E'_q 、 E' 为常数时的极限功角和极限功率（用标么值计算）。

解：（1）求各元件电抗。取 $S_B = 250\text{MV}\cdot\text{A}$ ， $U_{B(110)} = 115\text{kV}$
 $U_{B(110)} = 115 \times 220 / 121\text{kV} = 209\text{kV}$ ，则

$$x_d = 2.36 \times \frac{250 \times 0.85}{300} \times \left(\frac{242}{209}\right)^2 = 2.241$$

$$x'_d = 0.32 \times \frac{250 \times 0.85}{300} \times \left(\frac{242}{209}\right)^2 = 0.304$$

$$x_{T1} = 0.14 \times \frac{250}{360} \times \left(\frac{242}{209}\right)^2 = 0.130$$

$$x_{T1} = 0.14 \times \frac{250}{360} \times \left(\frac{220}{209}\right)^2 = 0.108$$

12.2 简单电力系统的静态稳定

$$x_l = \frac{1}{2} \times 0.41 \times 200 \times \frac{250}{209^2} = 0.235$$

系统综合阻抗为

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + x_l + x_{T2} = 2.241 + 0.130 + 0.235 + 0.108 = 2.714$$

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{T1} + x_l + x_{T2} = 0.304 + 0.130 + 0.235 + 0.108 = 0.777$$

(2) 求正常运行时的 $E_{q|0}$ 、 $E'_{q|0}$ 、 $E'_{|0}$

$$P_0 = \frac{250}{250} = 1, \quad Q_0 = 1 \times \tan(\arccos 0.98) = 0.2$$

$$U = \frac{115}{115} = 1$$

12.2 简单电力系统的静态稳定

$$E'_{|0|} = \sqrt{(1 + 0.2 \times 0.777)^2 + 0.777^2} = 1.392$$

$$E_{q|0|} = \sqrt{(1 + 0.2 \times 2.714)^2 + 2.714^2} = 3.122$$

$$\delta_{|0|} = \arctan \frac{2.714}{1 + 0.2 \times 2.714} = 60.39^\circ$$

$$\begin{aligned} E'_{q|0|} &= U_{q|0|} + I_{d|0|} x'_{d\Sigma} = U_{q|0|} + \frac{E_{q|0|} - U_{q|0|}}{x_{d\Sigma}} x'_{d\Sigma} \\ &= 1 \times \cos 60.39^\circ + \frac{3.122 - \cos 60.39^\circ}{2.714} \times 0.777 = 1.25 \end{aligned}$$

12.2 简单电力系统的静态稳定

(3) 求各电动势分别保持常数时发电机功—角特性

$$P_{E_q} = \frac{E_{q|0}U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = \frac{3.122}{2.714} \sin \delta = 1.15 \sin \delta$$

$$\begin{aligned} P_{E'q} &= \frac{E'_{q|0}U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x'_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta \\ &= 1.609 \sin \delta - 0.459 \sin 2\delta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{E'} &= \frac{E'_{|0}U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta' = 1.79 \sin \delta' \\ &= 1.79 \sin \left\{ \delta - \arcsin \left[\frac{U}{E'_{|0}} \left(1 - \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{q\Sigma}} \right) \sin \delta \right] \right\} \\ &= 1.79 \sin [\delta - \arcsin(0.512 \sin \delta)] \end{aligned}$$

12.2 简单电力系统的静态稳定

(4) 求极限功角和极限功率

E_q 恒定, $\delta=90^\circ$ 时功率最大

$$\delta_{E_q M} = \pi/2, P_{E_q M} = 1.15$$

E'_q 恒定, 最大功率时的功角为

$$\frac{dP_{E'_q}}{d\delta} = 1.609 \cos \delta - 2 \times 0.459 \cos 2\delta = 0$$

$$\delta_{E'_q M} = 113.2^\circ$$

$$P_{E'_q M} = 1.609 \sin 113.2^\circ - 0.459 \sin 2 \times 113.2^\circ = 1.813$$

E' 恒定, 最大功率时 $\delta' = 90^\circ$

$$90^\circ = \delta - \sin^{-1}(0.512 \sin \delta), \delta_{E'M} = 117.15^\circ$$

$$P_{E'M} = 1.79$$

12.3 简单电力系统的暂态特性

12.3.1 概述

12.3.2 定性分析

13.3.3 稳定判据——等面积定则

12.3.1 概述

暂态稳定分析的目的：在规定的运行方式和故障形态下，对系统稳定性进行校验，并对继电保护和自动装置以及各种措施提出相应的要求。

暂态稳定的判据：电网遭受每一次大扰动后，引起电力系统各机组之间功角相对增大，在经过第一和第二个震荡周期不失步，作同步的衰减震荡，系统中枢点电压逐渐回复。

影响暂态稳定的因素：

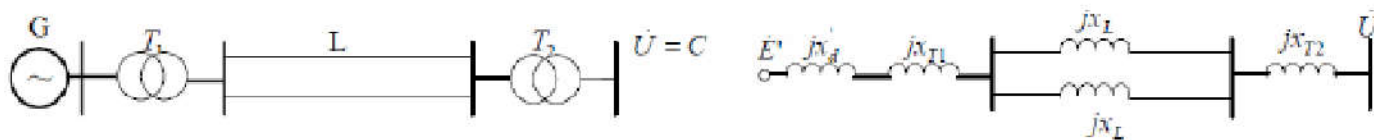
- ❖ 扰动的性质
- ❖ 扰动发生的地点
- ❖ 扰动前系统的运行情况

12.3.1 概述

暂态稳定计算的条件：

- ❖ 应考虑在最不利地点发生金属性短路故障。
- ❖ 发电机模型在可能的条件下，应考虑采用暂态电动势变化，甚至次暂态电动势变化的详细模型（在规划阶段允许采用暂态电动势恒定的模型）。
- ❖ 继电保护、重合闸和有关自动装置的动作状态和时间，应结合实际情况考虑。
- ❖ 考虑负荷特性。

12.3.2 定性分析



简单电力系统及其等效电路（正常运行方式）

忽略所有的电阻，发电机采用暂态电抗 x'_d 后电动势 E' 恒定的经典模型，不考虑阻尼的作用，忽略调速器的影响。

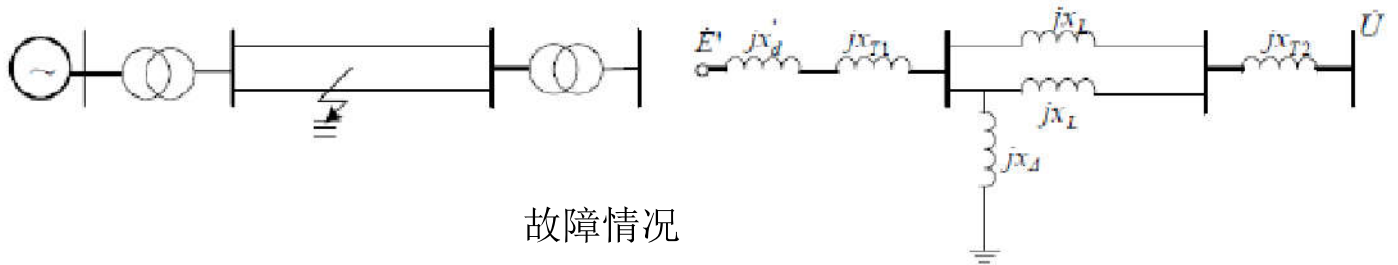
1、正常运行时功—角特性

电动势与无限大系统间的联系电抗 $x_1 = x'_d + x_{T1} + \frac{x_l}{2} + x_{T2}$

发电机发出的电磁功率 $P_1 = \frac{E'U}{x_1} \sin \delta = P_{1M} \sin \delta$

12.3.2 定性分析

2、故障期间功—角特性



故障情况

故障期间发电机电动势与无限大系统间的联系电抗

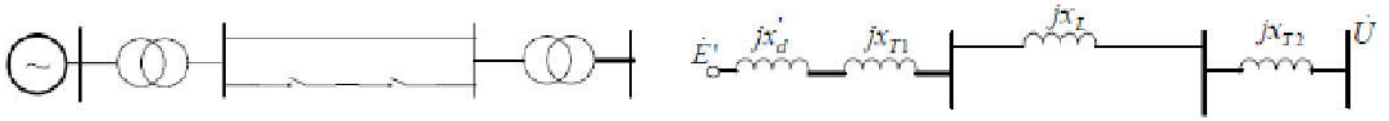
$$x_{II} = (x'_d + x_{T1}) + \left(\frac{x_l}{2} + x_{T2}\right) + \frac{(x'_d + x_{T1}) \left(\frac{x_l}{2} + x_{T2}\right)}{x_\Delta}$$

发电机输出功率

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

12.3.2 定性分析

3、故障后功—角特性



故障切除后

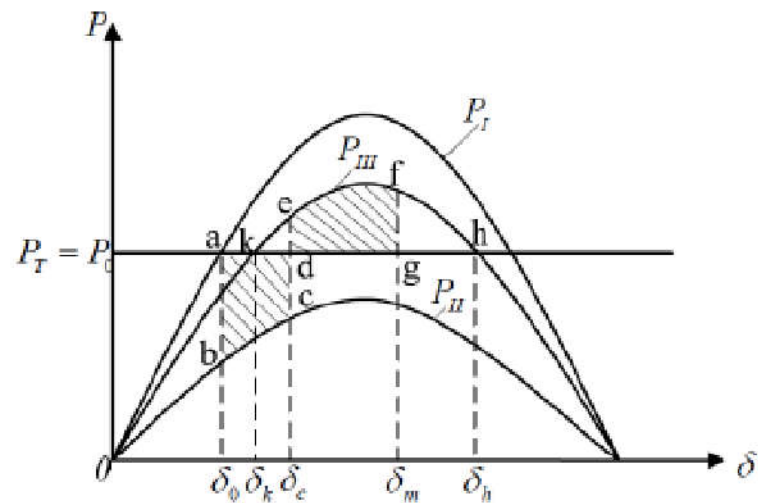
发电机电动势与无限大系统间的联系电抗

$$x_{\text{III}} = x'_d + x_{T1} + x_l + x_{T2}$$

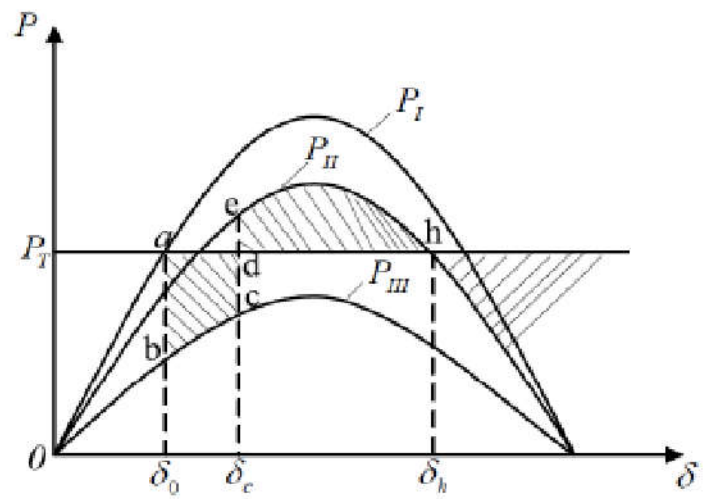
发电机输出功率

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

12.3.2 定性分析



简单系统正常运行、故障和故障
切除后的功—角特性曲线



切除故障时间过晚的情形

- ❖ 快速切除故障是保证暂态稳定的有效措施。
- ❖ 在第一个振荡周期即可判定系统稳定与否。

12.3.3 稳定判据—等面积定则

故障后转子运动方程

$$\frac{T_J d^2 \delta}{\omega_0 dt^2} = P_T - P_{II}$$

由于

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \frac{d\dot{\delta}}{dt} = \frac{d\delta d\dot{\delta}}{dt d\delta} = \dot{\delta} \frac{d\dot{\delta}}{d\delta}$$

代入转子运动方程

$$\frac{T_J}{\omega_0} \dot{\delta} d\dot{\delta} = (P_T - P_{II}) d\delta$$

将上式两边积分

$$\int_{\dot{\delta}_0}^{\dot{\delta}_c} \frac{T_J}{\omega_0} \dot{\delta} d\dot{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta$$

12.3.3 稳定判据—等面积定则

得

$$\frac{1}{2} \frac{T_J}{\omega_0} [\dot{\delta}_c^2 - \dot{\delta}_0^2] = \frac{1}{2} \frac{T_J}{\omega_0} \dot{\delta}_c^2 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta$$

故障切除后，

$$\frac{1}{2} \frac{T_J}{\omega_0} [\dot{\delta}^2 - \dot{\delta}_c^2] = \int_{\delta_c}^{\delta} (P_T - P_{III}) d\delta$$

当 δ 等于 δ_m 时角速度恢复到同步角速度， $\dot{\delta}_m = 0$

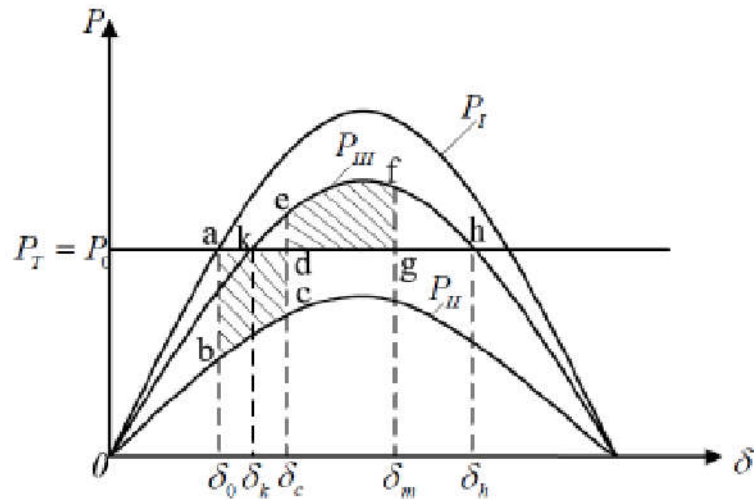
$$\frac{1}{2} \frac{T_J}{\omega_0} [-\dot{\delta}_c^2] = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_T - P_{III}) d\delta$$

$$\frac{1}{2} \frac{T_J}{\omega_0} \dot{\delta}_c^2 = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{III} - P_T) d\delta$$

12.3.3 稳定判据—等面积定则

等面积定则：

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{III} - P_T) d\delta$$



当减速面积等于加速面积时，转子角速度恢复到同步转速， δ 达到 δ_m 并开始减小。

12.3.3 稳定判据—等面积定则

利用等面积定则，可决定极限切除角度

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

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

$$\cos \delta_{cm} = \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III M} \cos \delta_h - P_{II M} \cos \delta_0}{P_{III M} - P_{II M}}$$

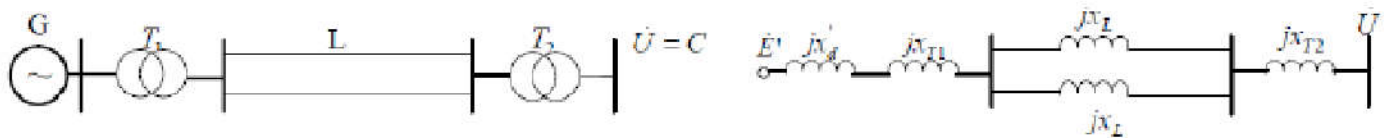
$$\delta_h = \pi - \arcsin(P_0/P_{III M})$$

12.3.3 稳定判据—等面积定则

例：有一简单电力系统如图所示，当在一回路上发生三相突然短路时，试计算其保持系统暂态稳定的短路极限切除角 δ_{cm} 。基本数据为

$$P_0 = 1.0, E' = 1.41, \delta_0 = 34.53^\circ, \dot{U} = 1.0 \angle 0^\circ$$

$$X_I = 0.79, X_{III} = 1.043$$



12.3.3 稳定判据—等面积定则

解：正常时

$$P_{\text{I}} = \frac{E'U}{x_{\text{I}}} \sin \delta = \frac{1.41 \times 1}{0.79} \sin \delta = 1.785 \sin \delta$$

故障时 $P_{\text{II}} = 0$

切除故障后

$$P_{\text{III}} = \frac{E'U}{x_{\text{III}}} \sin \delta = \frac{1.41 \times 1}{1.043} \sin \delta = 1.352 \sin \delta$$

$$\begin{aligned} \delta'_k &= \pi - \delta_k = \pi - \arcsin(P_0/P_{\text{III}M}) \\ &= 180^\circ - \arcsin \frac{1.0}{1.352} = 180^\circ - 47.7^\circ = 132.3^\circ \end{aligned}$$

12.3.3 稳定判据—等面积定则

$$\begin{aligned}\cos \delta_{cm} &= \frac{P_T(\delta'_k - \delta_0) + P_{III M} \cos \delta'_k - P_{II M} \cos \delta_0}{P_{III M} - P_{II M}} \\ &= \frac{1.0(132.3^\circ - 34.53^\circ) \frac{\pi}{180^\circ} + 1.352 \cos 132.3^\circ}{1.352} \\ &= \frac{0.796}{1.352} = 0.58875\end{aligned}$$

$$\delta_{cm} = 53.93^\circ$$

12.6 多机电力系统的稳定分析方法

12.6.1 直接法

12.6.2 小干扰法

12.6.3 数值分析法

12.6.1 直接法

直接法：按照某种解析判据，直接判断电力系统的稳定性。

- ❖ 优点：判据直接、明确
- ❖ 缺点：适用性差

12.6.2 小干扰法

小干扰法:

- ❖ 建立描述电力系统动态过程的数学模型
- ❖ 计算给定稳态运行情况下各变量的取值，求出稳态平衡点。
- ❖ 将微分方程和代数方程在稳态平衡点附近线性化，得出一组线性微分方程和代数方程，然后消去其中的代数变量，从而得出一组纯微分方程，

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X$$

- ❖ 计算系数矩阵A的特征值。
- ❖ 判别系统的稳定性，如果所有特征值的实部都为负则系统稳，只要有一个或多个特征值实部为正，则系统不稳定。

12.6.2 小干扰法

例：以简单电力系统的含有阻尼系数 D 的二阶摇摆方程为背景，采用小干扰法分析其稳定性：（1） $D=0$ 时；（2） D 为正时；（3） D 为负时；（4） T_J 对振荡频率的影响。

解：首先列出系统状态变量偏移量的线性状态方程：

发电机采用含有阻尼系数 D 的二阶摇摆方程；假设某种发电机内电动势恒定，机械功率 P_T 恒定。

在简单系统中只有一个发电机元件需要列出其状态方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega_0(\omega - 1) \\ T_J \frac{d\omega}{dt} &= P_T - D(\omega - 1) - P_E \end{aligned} \right\} \quad \text{式中, } P_E = \frac{EU}{x_\Sigma} \sin \delta$$

12.6.2 小干扰法

$$\left. \begin{aligned} \text{状态变量可表示为 } \delta &= \delta_0 + \Delta\delta \\ \omega &= 1 + \Delta\omega \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt} &= \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ \frac{d(1 + \Delta\omega)}{dt} &= \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \left[P_T - \frac{EU}{x_\Sigma} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) - D\Delta\omega \right] \end{aligned} \right\}$$

假定偏移量 $\Delta\delta$ 很小，将 P_E 在 δ_0 附近按泰勒级数展开，略去偏移量的二次及以上的高次项

12.6.2 小干扰法

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \omega_0\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} &= \frac{1}{T_J} \left[-\frac{EU}{x_\Sigma} \cos \delta_0 \Delta\delta - D\Delta\omega \right] \end{aligned} \right\}$$

设 $K = \frac{EU}{x_\Sigma} \cos \delta_0$ 表示同步力矩系数，则有

$$T_J \Delta \ddot{\delta} + D \Delta \dot{\delta} + K' \Delta \delta = 0$$

式中， $K' = K\omega_0$ ，进而可得特征方程

$$T_J p^2 + Dp + K' = 0$$

12.6.2 小干扰法

特征根为

$$p_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4T_j K'}}{2T_j}$$

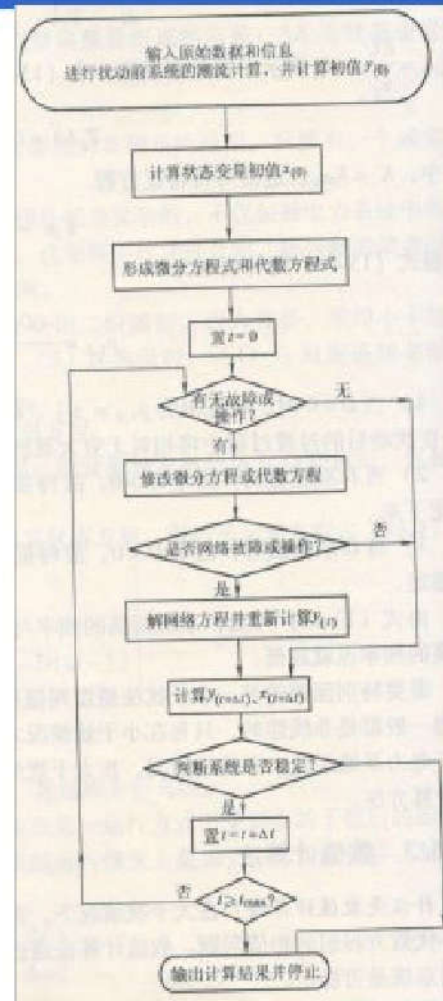
- ❖ 当 $D=0$ 时，特征根为 $p_{1,2} = \pm j\sqrt{K'/T_j} \triangleq j\omega_n$ 。该特征根反映了机组转子角增量 $\Delta\delta$ 在扰动后的过渡过程中将相对无穷大系统作角频率为 ω_n 的等幅振荡。
- ❖ 当 D 取正值时，由于 $D>0$ ，故特征根含有负实部，系统将作减幅振荡，直至稳定下来
- ❖ 当 D 取负值时，由于 $D<0$ ，故特征根含有正实部，系统将作增幅振荡，系统不稳定。

12.6.3 数值算法

数值算法：通过计算遭受大扰动后电力系统的动态轨迹，分析电力系统是否稳定。

常微分方程

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$



暂态稳定分析数值算法的基本流程

12.6.3 数值计算法

1、欧拉法

已知初值 $x(t_0) = x_0$ 计算导数

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t_0} = f[t_0, x(t_0)]$$

用差商 $[x(t_1) - x(t_0)]/h$ 近似地代替 $x(t)$ 在 t_0 时刻的导数

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t_0} \approx \frac{x(t_1) - x(t_0)}{h}$$

从而得

$$x(t_1) = x(t_0) + hf[t_0, x(t_0)]$$

取

$$x_1 = x_0 + hf(t_0, x_0)$$

为 $x(t_1)$ 的近似值，

12.6.3 数值计算法

应用 x_1 和 t_1 计算导数 $f(t_1, x_1)$, 取

$$x_2 = x_1 + hf(t_1, x_1)$$

作为 $x(t_2)$ 的近似值, 依次类推, 取

$$x_{n+1} = x_n + hf(t_n, x_n) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

作为 $x(t_{n+1})$ 的近似值。

2、改进欧拉法

首先用欧拉法求 x_1 的近似值

$$x_1^{(0)} = x_0 + hf(t_0, x_0)$$

用 $x_1^{(0)}$ 求出 t_1 时刻导数 $f(t_1, x_1^{(0)})$ 的近似值, 用 $f(t_0, x_0)$ 和 $f(t_1, x_1^{(0)})$ 的平均值求 x_1 的改进值

12.6.3 数值计算法

$$x_1 = x_0 + \frac{h}{2} [f(t_0, x_0) + f(t_1, x_1^{(0)})]$$

改进欧拉法计算公式

$$\left. \begin{aligned} x_{n+1}^{(0)} &= x_n + hf(t_n, x_n) \\ x_{n+1} &= x_n + \frac{h}{2} [f(t_n, x_n) + f(t_{n+1}, x_{n+1}^{(0)})] \end{aligned} \right\}$$

12.7 提高电力系统稳定性的措施

12.7.1 提高静态稳定性的措施

12.7.2 提高暂态稳定性的措施

12.7.3 提高电压稳定性的措施

12.7.4 抑制低频振荡的措施

12.7.1 提高静态稳定性的措施

1、采用自动调节励磁装置

相当于缩短了发电机与系统间的电气距离。投资比例小，优先考虑。

2、减小元件的电抗

- ❖ 采用分裂导线
- ❖ 提高线路额定电压等级
- ❖ 采用串联电容补偿

3、改善系统结构和采用中间补偿设备

- ❖ 改善系统结构
- ❖ 采用中间补偿设备

12.7.2 提高暂态稳定性的措施

1、快速切除故障和自动重合闸

快速切除故障可减小故障切除瞬间发电机转子角度和加速度的变化量；可使负荷端电压迅速回升，提高发电机输出功率。

瞬时性故障，可通过自动重合闸提高系统运行的可靠性。

2、发电机强行励磁

故障后，快速、大幅度增加励磁，以提高发电机电动势，增加发电机电磁功率。

3、电气制动

系统发生故障后，迅速投入已安装好的电气负荷，增大发电机的电磁功率，从而缓解发电机的加速。

12.7.2 提高暂态稳定性的措施

4、快速汽门控制

调节原动机的机械功率，减小发电机组的不平衡功率。

5、切机、切负荷

暂态过程中，可有选择的切除一些发电机，或切除一部分负荷以减少一些关键线路上传送的功率，从而提高系统的暂态稳定性。

6、系统解列

失去稳定后将联合运行的大规模电力系统人为地分成若干个独立的子系统，以保全一些子系统继续稳定运行，避免系统由于失去稳定而全面崩溃。

12.7.3 提高电压稳定性的措施

1、在网络结构规划方面

电网结构要合理。网络结构上要考虑采用多回路和环状系统，以改善受端电压和潮流特性。

2、无功规划方面

- ❖ 保证无功功率紧急备用，装设足够的调相设备，包括合理地配置并联电抗器和电容器。
- ❖ 在受端配置同步调相机或静止无功补偿器，提高维持受端电压的能力。
- ❖ 合理地采用带负载调节分接头的变压器。
- ❖ 按照国际大电网会议（CIGRE）的建议，在系统无功规划中采用（N-2）的安全准则。

12.7.3 提高电压稳定性的措施

3、在系统建设方面

加强电源建设。系统建设应及时跟上，不要由于发电、输电、变电设施不足或工期延长，造成电网结构不合理或不健全。

4、在设备制造方面

应考虑扩大发电机调相和进相运行的能力。

5、在系统运行方面

- ❖ 采用合理运行方式，即使投切电压和无功功率调整设备。
- ❖ 采用对负荷的紧急控制，当电压低到一定程度时，立即切除部分负荷。
- ❖ 为大型同步发电机进相运行创造条件。

12.7.3 提高电压稳定性的措施

- ❖ 保持负荷母线电压变化曲线远在临界值以上。
- ❖ 如果无功功率电源不足则采取限制传输功率、启用备用发电机组等措施。
- ❖ 使发电机运行在适中的或较低的励磁状态以提供足够的“旋转”无功备用。
- ❖ 在极端情况下闭锁掉自动调压变压器的自动调节功能。
- ❖ 采用性能优良的继电保护和自动装置，增加低压减载、低频减载、解列等安全自动装置，以加强稳定的三道防线。

12.7.4 抑制低频振荡的措施

1、一次系统的对策

- ❖ 减轻重载输电线的负荷，从而减少送、受端之间的转子角差。
- ❖ 增强网架，采用串联补偿电容，减少送、受端的电气距离。
- ❖ 采用直流输电方案，避免送、受端间发生功率震荡。
- ❖ 在长距离输电线中部装设静止无功补偿器作电压支撑，并通过其控制系统改善系统动态性能。

12.7.4 抑制低频振荡的措施

2、二次系统的对策

- ❖ 采用电力系统稳定器（PSS）作励磁附加控制，是当整定PSS参数可提供抑制低频振荡的附加阻尼力矩。
- ❖ 利用SVC装置的附加控制及直流输电附加控制或直流功率调制提供抑制低频振荡的附加阻尼。
- ❖ 用线性最优励磁装置或非线性励磁控制装置改善系统动态特性，抑制低频振荡。

12.7.4 抑制低频振荡的措施

电力系统的安全性：电力系统在运行中承受故障扰动的能力。

电力系统安全性的特性表征：

- ❖ 电力系统能承受住故障扰动引起的暂态过程并过渡到一个可接受的运行工况。
- ❖ 在新的运行工况下，各种约束条件得到满足。

安全分析：

- ❖ 静态安全分析，假设电力系统从事故前的静态直接转移到事故后的另一个静态，不考虑中间的暂态过程，用于检验事故后各种约束条件是否得到满足。
- ❖ 动态安全分析，研究电力系统在事故前的静态过渡到事故后的另一个静态的暂态过程中保持稳定的能力。

12.7.4 抑制低频振荡的措施

N-1 原则：正常方式下的电力系统中任一元件无故障或因故障断开，电力系统应能保持稳定运行和正常供电，其他元件不过负荷，电压和频率均在允许范围内。