



# 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

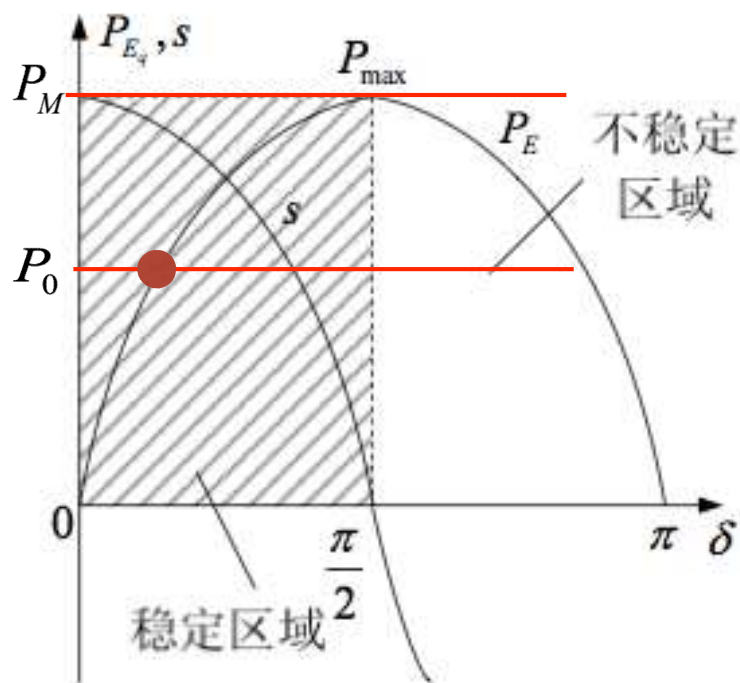
- 下载腾讯课堂学生端APP：  
<https://ke.qq.com/s>
- 扫码进课
- 也可以看回放
- 进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：  
**我的—最近看过—刘崇茹的课堂**
- 请将昵称改为：学号姓名

# 稳定储备系数

系统静态稳定判据：整步功率系数大于零

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta \delta} > 0$$

它的数值大小说明系统静态稳定的程度，或者说，表示了发电机维持同步运行的能力。



## • 稳定储备系数（功角判据）

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

## • 稳定储备系数取值

- 过小：经济性好，稳定性差
- 过大：稳定性好，经济性差

# 小干扰法分析简单系统的静态稳定

列出描述系统的

非线性微分方程组

线性化

近似的线性微分方程组

列写特征方程，

求特征根

根据其特征根用李雅普诺夫的

第一方法判断系统的稳定性

零输入系统  $\dot{X} = F(X)$

如果 $X_0$ 是系统的一个初始平衡状态的向量，即 $F[X_0]=0$

在 $X_0$ 点一阶泰勒展开，得到线性微分方程组

$$\Delta \dot{X} = dF(X) / dx \Big|_{X_0} \Delta X = A \Delta X$$

列写特征方程  $|A - \lambda I| = 0$

求A矩阵的特征根

根据特征根结果判断稳定性

特征值实部均为负值：稳定；  
出现正实部特征值：不稳定；  
零根：无法判断。

# 小干扰法分析简单系统的静态稳定

列出描述系统的  
非线性微分方程组

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{cases} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X})$$

线性化



近似的线性微分方程组

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \Delta \dot{\mathbf{X}} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}^T} \right|_{\mathbf{x}_0} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

列写特征方程,  
求特征根



$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = \begin{vmatrix} 0 - \lambda & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} & 0 - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + \frac{\omega_0}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} = 0$$

根据其特征根用李雅普诺夫的第一方法判断系统的稳定性

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{\omega_0}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0}}$$

# 小干扰法分析简单系统的静态稳定

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{array} \right. \xrightarrow{\Delta \dot{X} = \frac{\partial F}{\partial X^T} \Big|_{x_0} \Delta X = A \Delta X} \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{1}{T_J} \cdot \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta \end{array} \right.$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

分三种情况讨论

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{\omega_0}{T_J} \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0}}$$

$$\frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} < 0 \quad \text{一正根, 一负根}$$

$$\frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} = 0 \quad \text{零根}$$

$$\frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} > 0 \quad \text{一对虚根}$$

理论上,  $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 将等幅振荡, 振荡频率约为1Hz左右, 通常称为低频振荡。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_0}{T_J} \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0}}$$

# 阻尼对系统稳定性的作用

列出描述系统的非线性微分方程组

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{cases} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{bmatrix}$$

线性化



近似的线性微分方程组

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \Delta \dot{\mathbf{X}} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}^T} \right|_{\mathbf{x}_0} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} & -\frac{1}{T_J} D \end{bmatrix}$$

列写特征方程,  
求特征根



$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = \begin{vmatrix} 0 - \lambda & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} & -\frac{D}{T_J} - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + \frac{D}{T_J} \lambda + \frac{\omega_0}{T_J} \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} = 0$$

根据其特征根用李雅普诺夫的第一方法判断系统的稳定性

$$\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2T_J} \pm \frac{1}{2T_J} \sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0}}$$

# 阻尼对系统稳定性的作用

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_E - P_D) \end{array} \right. \xrightarrow{\Delta \dot{X} = \frac{\partial F}{\partial X^T} \Big|_{x_0} \Delta X = A \Delta X} \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{1}{T_J} \left[ \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta + D\Delta\omega \right] \end{array} \right.$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{1}{T_J} \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} & -\frac{1}{T_J} D \end{bmatrix}$$

分情况讨论

$$\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2T_J} \pm \frac{1}{2T_J} \sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J \frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0}}$$

$\frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} < 0$  存在正实根

$\frac{dP_E}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} > 0$   $\rightarrow$   $D > 0$  实部为负  
 $\rightarrow$   $D < 0$  实部为正

系统稳定的要求:

- 整步功率系数大于零
- 阻尼系数大于零

# 小干扰法的应用

$$\dot{x} = f(x, u)$$

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

泰勒展开  
(忽略高阶项)

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

寻找 $\Delta x$ 和 $\Delta u$ 的关系  
 $C'\Delta x + D'\Delta u = 0$

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta u = -D'^{-1}C'\Delta x$$

$$\Delta \dot{x} = (A - BD'^{-1}C')\Delta x \triangleq A'\Delta x$$

$$|A' - \lambda I| = 0$$

李雅普诺夫第一方法

零输入系统

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x$$

$$\Delta y = C\Delta x$$

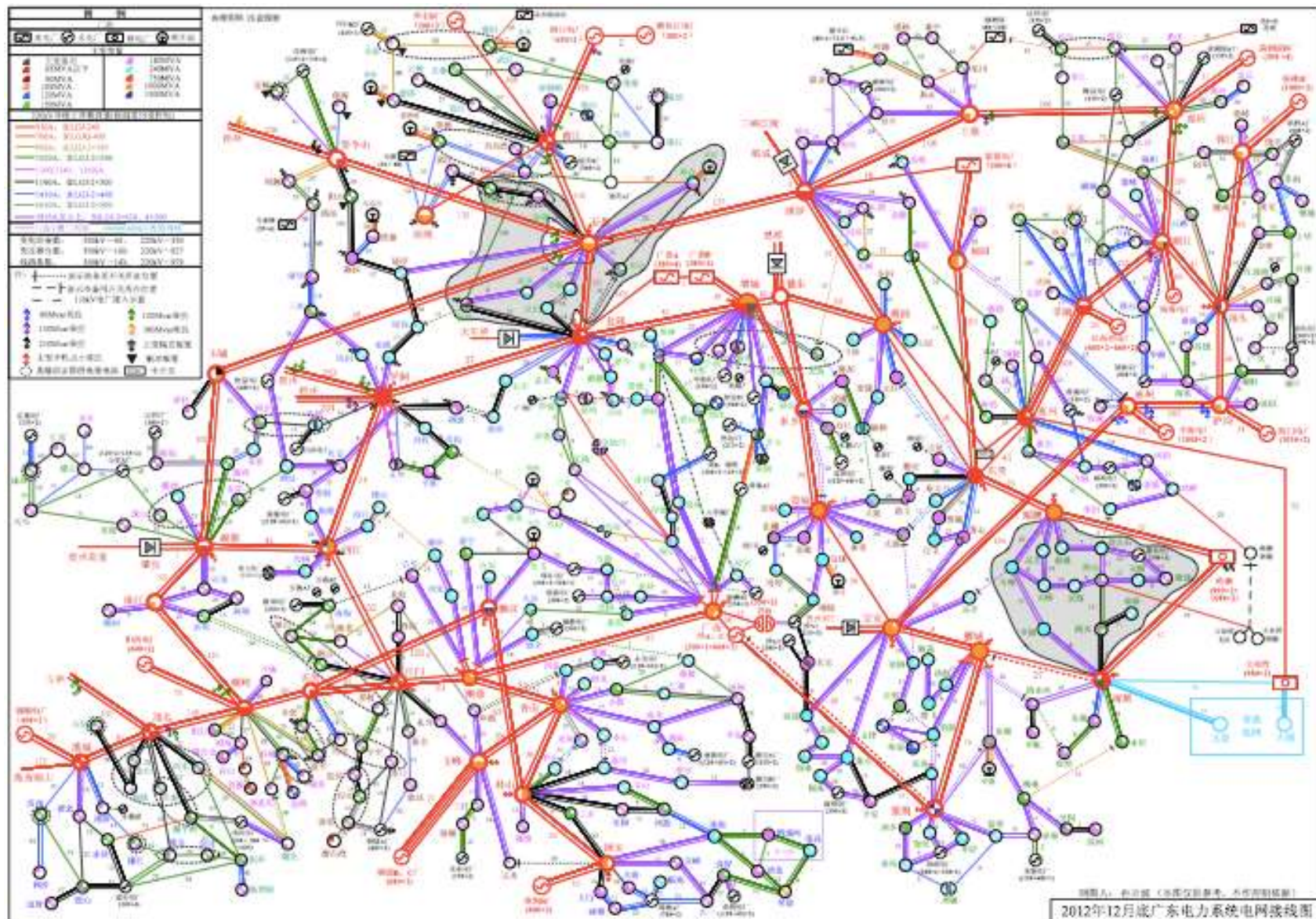
拉普拉斯变换

计算 $\Delta x(s)$ 和 $\Delta y(s)$ 的极点

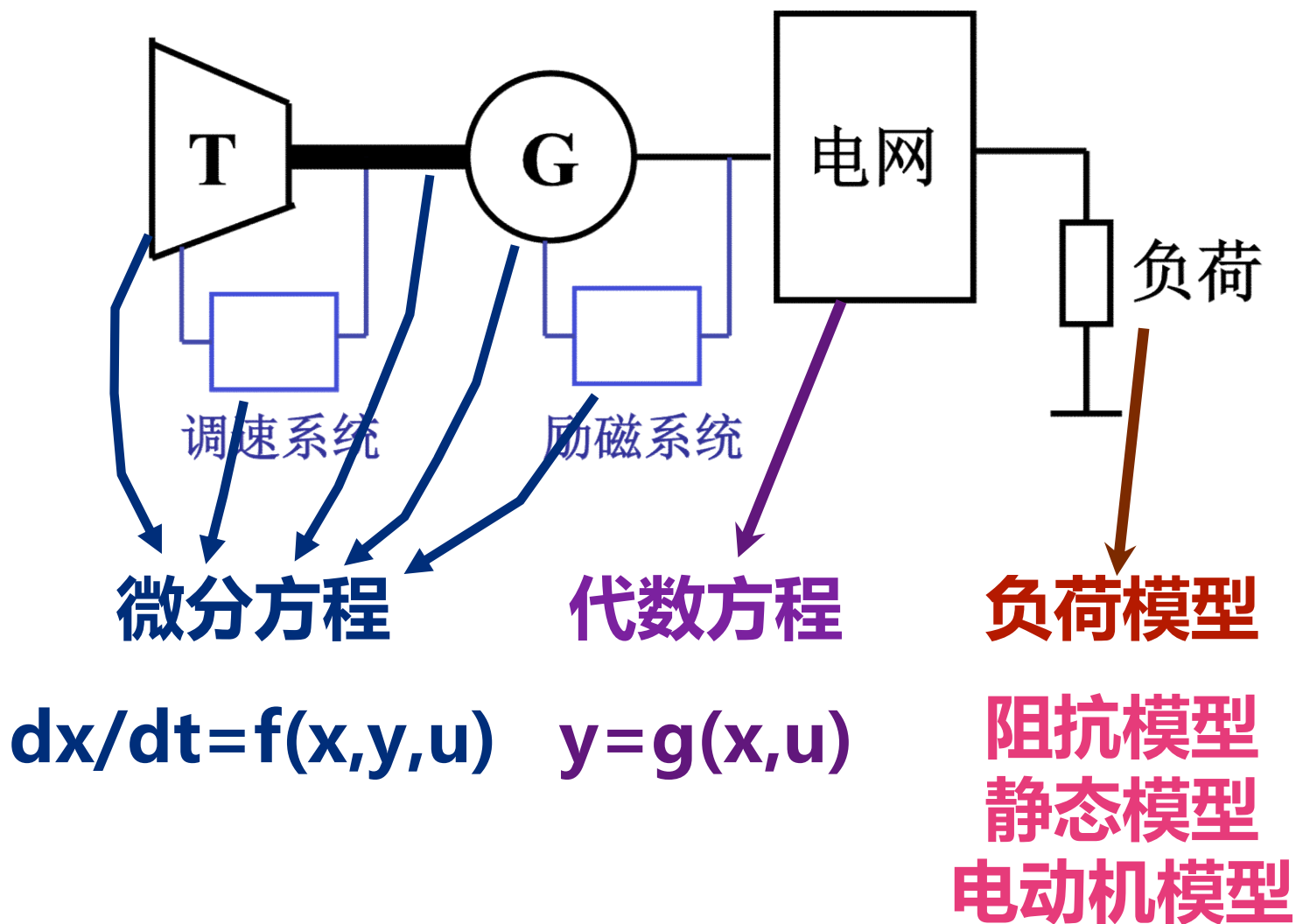
特征方程、特征根

求解特征方程 $|sI - A| = 0$ ，根据矩阵A的特征值判断系统稳定性。

# 小干扰法的应用



# 小干扰法在复杂电力系统中的应用

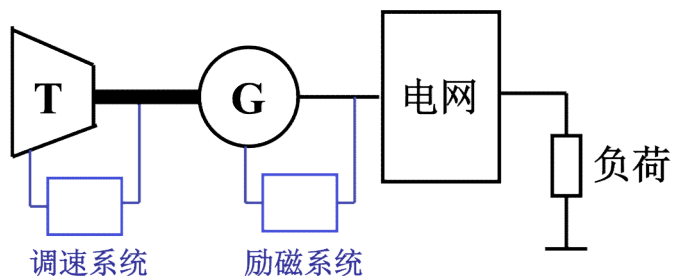


# 关于参考轴的选择

---

- **有两种参考轴的选取方式：**
  - **以发电机转子相对于同步旋转轴的角度和相对于同步转速的转速，即以绝对角和绝对速度作为变量；**
  - **以某一发电机的转子角度和转子转速为参考，即以相对角和相对速度作为变量。**
- **需要注意的是，发电机进行dq变换之后，每个发电机的dq轴不重合，需要进行选择统一的坐标系（xy）进行映射，否则计算结果无意义。**

# 小干扰法在复杂电力系统中的应用



微分方程  $dx/dt=f(x,y,u)$

代数方程  $y=g(x,u)$

负荷模型      阻抗模型, 静态模型, 电动机模型

直流输电及其控制系统

静止补偿器 (SVC)

可控串联补偿器 (TCSC)

等等

DAE-微分代数方程

然后呢?

求解!



特征值计算一般采用数值迭代方法，具体处理方式有两种：一种是消去数学模型（微分代数方程）中的代数方程，形成系统状态矩阵，然后计算状态矩阵的特征值；另一种是微分方程和代数方程交替进行迭代，最后求出系统的特征值。

# 小干扰法在复杂电力系统中的应用

---

## ■ 特征值的计算方法

- QR算法一直被当做一种最有效的方法。但是当矩阵的维数比较大的时候，QR算法就会面临维数灾。
- 隐式重启动Arnoldi算法被广泛的认为是求解大型非对称矩阵关键特征值非常有效地方法（关键特征值是指虚部、实部最大或者最小，或者模值最大的特征值）。

## ■ 商业软件

- BPA、PSASP、PSSE、DigSilent

# 自动调节励磁系统对静态稳定性的影响

## 按电压偏差比例调节励磁

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \Delta\omega\omega_0 \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} &= -\frac{1}{T_J} \Delta P_e \\ T_{d0}' \frac{d\Delta E_q'}{dt} &= -\Delta E_q + \Delta E_{qe} \\ T_e \frac{d\Delta E_{qe}}{dt} &= -\Delta E_{qe} - K_e \Delta U_G \end{aligned} \right\} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}_q' \\ \Delta\dot{E}_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{T_J} & 0 & -\frac{K_2}{T_J} & 0 \\ -\frac{K_4}{T_{d0}'} & 0 & -\frac{1}{T_{d0}'} & \frac{1}{T_{d0}'} \\ -\frac{K_e K_5}{T_e} & 0 & -\frac{K_e K_6}{T_e} & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{qe} \end{bmatrix}$$

$$\Delta P_e = \left( \frac{\partial P_{E_q'}}{\partial \delta} \right)_0 \Delta\delta + \left( \frac{\partial P_{E_q'}}{\partial E_q'} \right) \Delta E_q' = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E_q'$$

$$\Delta E_q = \left( \frac{\partial E_q}{\partial E_q'} \right)_0 \Delta E_q' + \left( \frac{\partial E_q}{\partial \delta} \right)_0 \Delta\delta = \frac{1}{K_3} \Delta E_q' + K_4 \Delta\delta$$

$$\Delta U_G = \left( \frac{\partial U_G}{\partial \delta} \right)_0 \Delta\delta + \left( \frac{\partial U_G}{\partial E_q'} \right)_0 \Delta E_q' = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E_q'$$

根据劳斯判据来分析各系数应满足的关系和条件

# 冗余状态变量导致零根出现

---

- **当状态空间的选取使得原问题本身具有多解性时，状态方程的系数矩阵会出现零特征根。**
- **在多机电力系统静态稳定分析中，如果以绝对角和绝对速度作变量来列写转子运动方程，则状态方程的系数矩阵A将会出现零特征值。**
- **没有无限大母线，只有所有发电机时，如果发电机选择转子角和角速度为状态变量，则会出现零根。**

# 冗余状态变量导致零根出现

---

- **选择发电机功角带来的零根：** 如果所有的发电机功角都增加一个相同的常数，系统的稳定性不受到任何影响。这种冗余的功角，可以通过选择一台发电机的功角作为参考功角，其他发电机功角选择为与这台参考发电机的功角差，就可以消除因功角的绝对值作为状态变量而带来的零根。
- **不考虑阻尼时选择发电机角速度带来的零根：** 如果所有的发电机的角速度都增加一个常数，系统的稳定性也不受影响。因此，通过选择参考发电机的转速为参考转速，其他发电机的转速变量选择与这台发电机的转速差，就会消除因此带来的零根。

# 两机系统为例说明零根的出现和消除

$$P_{E_i} = E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G E_j |Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \beta_{ij}) \rightarrow \begin{cases} P_{E_1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} + \beta_{12}) \\ P_{E_2} = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 |Y_{21}| \sin(\delta_{21} + \beta_{21}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta_{12} = \delta_1 - \delta_2 \\ \delta_{21} = \delta_2 - \delta_1 \end{cases} + \begin{cases} Y_{12} = Y_{21} \\ \beta_{12} = \beta_{21} \end{cases} \rightarrow$$

$$\begin{cases} P_{E_1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} + \beta_{12}) \\ P_{E_2} = E_2^2 G_{22} - E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} - \beta_{12}) \end{cases}$$

运行点处线性化:

$$\begin{cases} P_{E_1} = f(\delta_1, \delta_2) \\ P_{E_2} = f(\delta_1, \delta_2) \end{cases} \rightarrow \begin{bmatrix} \Delta P_{E_1} \\ \Delta P_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix}$$

**同步功率系数矩阵**

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_2} \end{bmatrix}$$

# 两机系统为例说明零根的出现和消除

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{E_1} \\ \Delta P_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{带入线性化后的转子运动方程}} \begin{cases} \frac{d\Delta \delta_1}{dt} = \Delta \omega_1 \omega_0 \\ \frac{d\Delta \delta_2}{dt} = \Delta \omega_2 \omega_0 \\ \frac{d\Delta \omega_1}{dt} = -\frac{1}{T_{J1}} (K_{11} \Delta \delta_1 + K_{12} \Delta \delta_2) \\ \frac{d\Delta \omega_2}{dt} = -\frac{1}{T_{J2}} (K_{21} \Delta \delta_1 + K_{22} \Delta \delta_2) \end{cases}$$

求特征方程：

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} -\lambda & 0 & \omega_0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & \omega_0 \\ -\frac{K_{11}}{T_{J1}} & -\frac{K_{12}}{T_{J1}} & -\lambda & 0 \\ -\frac{K_{21}}{T_{J2}} & -\frac{K_{22}}{T_{J2}} & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda^4 + \lambda^2 \omega_0 \left( \frac{K_{11}}{T_{J1}} + \frac{K_{22}}{T_{J2}} \right) + \omega_0^2 \left( \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{T_{J1}T_{J2}} \right) = 0$$

$$\begin{aligned} K_{11} &= -K_{12} \\ K_{21} &= -K_{22} \end{aligned}$$

$$\lambda^2 \left[ \lambda^2 + \omega_0 \left( \frac{K_{11}}{T_{J1}} + \frac{K_{22}}{T_{J2}} \right) \right] = 0$$

**出现两个零根**

# 两机系统为例说明零根的出现和消除

选择相角差作为状态变量：

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{E_1} \\ \Delta P_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_{12}} \\ \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_{12}} \end{bmatrix} \Delta \delta_{12} \xrightarrow{\text{带入线性化后的转子运动方程}} \begin{cases} \frac{d\Delta \delta_{12}}{dt} = (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) \omega_0 \\ \frac{d\Delta \omega_1}{dt} = -\frac{1}{T_{J1}} K_{11} \Delta \delta_{12} \\ \frac{d\Delta \omega_2}{dt} = -\frac{1}{T_{J2}} K_{21} \Delta \delta_{12} \end{cases}$$

求特征方程：

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} -\lambda & \omega_0 & -\omega_0 \\ -\frac{K_{11}}{T_{J1}} & -\lambda & 0 \\ -\frac{K_{21}}{T_{J2}} & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda^3 + \lambda \omega_0 \left( \frac{K_{11}}{T_{J1}} - \frac{K_{21}}{T_{J2}} \right) = 0$$

少了一个零根

# 两机系统为例说明零根的出现和消除

选择转速差作为状态变量：

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{E_1} \\ \Delta P_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{E_1}}{\partial \delta_{12}} \\ \frac{\partial P_{E_2}}{\partial \delta_{12}} \end{bmatrix} \Delta \delta_{12}$$

带入线性化后的  
转子运动方程

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta_{12}}{dt} = \Delta\omega_{12}\omega_0 \\ \frac{d\Delta\omega_{12}}{dt} = -\left(\frac{K_{11}}{T_{J1}} - \frac{K_{21}}{T_{J2}}\right)\Delta\delta_{12} \end{cases}$$

求特征方程：

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} 0 - \lambda & \omega_0 \\ -\left(\frac{K_{11}}{T_{J1}} - \frac{K_{21}}{T_{J2}}\right) & 0 - \lambda \end{vmatrix}_{\delta=\delta_0} = \lambda^2 + \omega_0 \left(\frac{K_{11}}{T_{J1}} - \frac{K_{21}}{T_{J2}}\right)_{\delta=\delta_0} = 0$$

**零根消失**

# 补充说明

## 忽略定子绕组磁场变化的同时要忽略转速的变化

$$\begin{array}{l} u_d = -r_a i_d + \dot{\psi}_d - \omega \psi_q \\ u_q = -r_a i_q + \dot{\psi}_q + \omega \psi_d \end{array} \xrightarrow{\text{忽略定子电阻}} \begin{array}{l} u_d = \dot{\psi}_d - \omega \psi_q \\ u_q = \dot{\psi}_q + \omega \psi_d \end{array}$$

线性化

$$\begin{array}{l} \Delta u_d = \Delta \dot{\psi}_d - \Delta \psi_q - \Delta \omega \psi_{q0} = \Delta \dot{\psi}_d - \Delta \psi_q - \psi_{q0} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta u_q = \Delta \dot{\psi}_q + \Delta \psi_d + \Delta \omega \psi_{d0} = \Delta \dot{\psi}_q + \Delta \psi_d + \psi_{d0} \Delta \dot{\delta} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} u_d = \dot{U} \sin \delta \\ u_q = \dot{U} \cos \delta \end{array} \xrightarrow{\text{线性化}} \begin{array}{l} \Delta u_d = \dot{U} \cos \delta_0 \Delta \delta = u_{q0} \Delta \delta = \psi_{d0} \Delta \delta \\ \Delta u_q = -\dot{U} \sin \delta_0 \Delta \delta = -u_{d0} \Delta \delta = \psi_{q0} \Delta \delta \end{array}$$

消去  $\Delta u_q$  和  $\Delta u_d$

$$\begin{array}{l} \psi_{d0} \Delta \delta = \Delta \dot{\psi}_d - \Delta \psi_q - \psi_{q0} \Delta \dot{\delta} \\ \psi_{q0} \Delta \delta = \Delta \dot{\psi}_q + \Delta \psi_d + \psi_{d0} \Delta \dot{\delta} \end{array}$$

# 补充说明

## 忽略定子绕组磁场变化的同时要忽略转速的变化

$$\psi_{d0}\Delta\delta = \Delta\dot{\psi}_d - \Delta\psi_q - \psi_{q0}\Delta\dot{\delta}$$

$$\psi_{q0}\Delta\delta = \Delta\dot{\psi}_q + \Delta\psi_d + \psi_{d0}\Delta\dot{\delta}$$

(a) 定子绕组磁场变化和转速变化均不忽略

$$\psi_{d0}\Delta\delta = -\Delta\psi_q$$

$$\psi_{q0}\Delta\delta = \Delta\psi_d$$

(b) 同时忽略定子绕组磁场变化和转速变化

$$\psi_{d0}\Delta\delta = -\Delta\psi_q$$

$$\psi_{q0}\Delta\delta = \Delta\psi_d$$

(c) 只忽略定子绕组磁场变化

$$\psi_{d0}\Delta\delta = -\Delta\psi_q \left( \frac{\psi_{d0}}{\psi_{d0} + \psi_{q0}p} \right)$$

$$\psi_{q0}\Delta\delta = \Delta\psi_d \left( \frac{\psi_{q0}}{\psi_{q0} - \psi_{d0}p} \right)$$

(d) 只忽略转速变化

$$\psi_{d0}\Delta\delta = -\Delta\psi_q \left( \psi_{d0} \frac{1+p^2}{\psi_{d0} - \psi_{q0}p} \right)$$

$$\psi_{q0}\Delta\delta = \Delta\psi_d \left( \psi_{q0} \frac{1+p^2}{\psi_{q0} + \psi_{d0}p} \right)$$

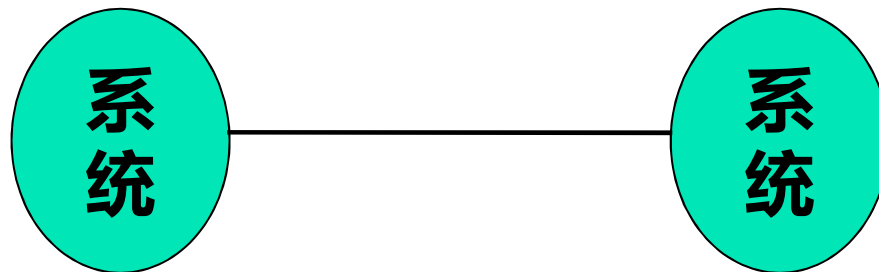
# 低频振荡的类型

## (1) 互联系统振荡

**振荡频率：** 0.2~0.5Hz

**振荡特点：** 振荡频率较低

系统中几乎所有机组都参与  
振荡能量集中于联络线，振幅明显



## (2) 区域低频振荡

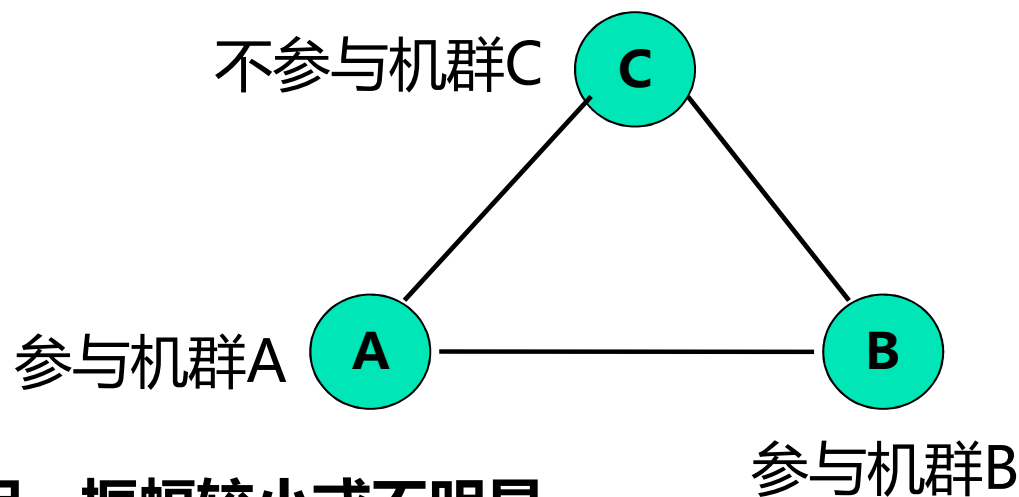
**振荡频率：** 0.5~1.5Hz

**振荡特点：**

系统中部分机组参与

振荡能量被多条输电线分担，振幅较小或不明显

机组参与情况复杂，抑制比较困难



# 低频振荡的类型

## (3) 单机（电厂）对系统低频振荡

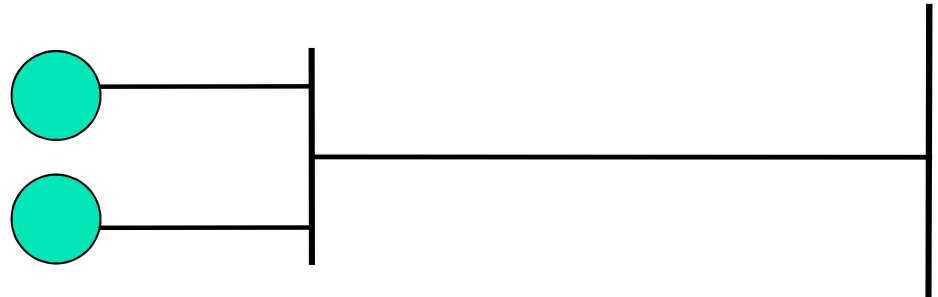
振荡频率：1.0~2.5Hz

振荡特点：

在我国有较高的发生机率

振荡能量集中于一台或少数几台机组，机组振幅明显

振荡抑制比较容易



## (4) 链状式系统低频振荡

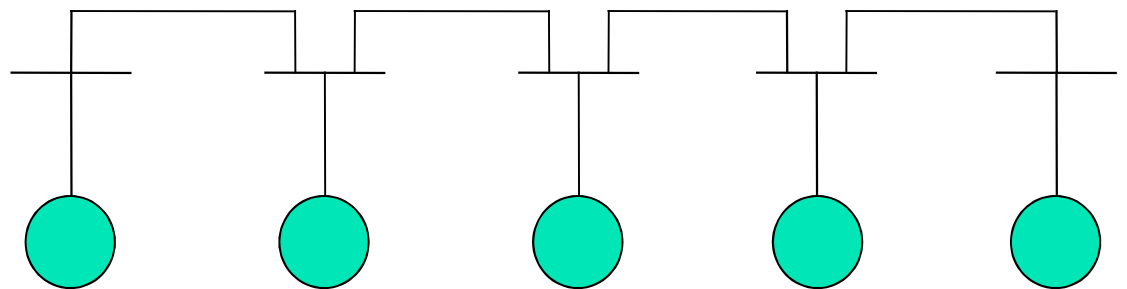
振荡频率：0.5~1.0Hz

振荡特点：

机组参与情况较为复杂，与运行状态有关

不同的联络线与机组振荡幅值差异较大

振荡抑制比较困难



# 低频振荡的实例

---

## 1. 1965年北美—西北联合电力系统 (WSCC)

**起因：**系统互联使机组间电气联系减弱

**后果：**互联系统解列

**措施：**机组加装PSS

## 2. 1984年广东—香港联络线

**起因：**香港侧机组采用了快速励磁

**后果：**联络线长时间增幅低频振荡

**措施：**香港侧机组加装PSS

## 3. 1996-1998年河北南网上安电厂

**起因：**不明确

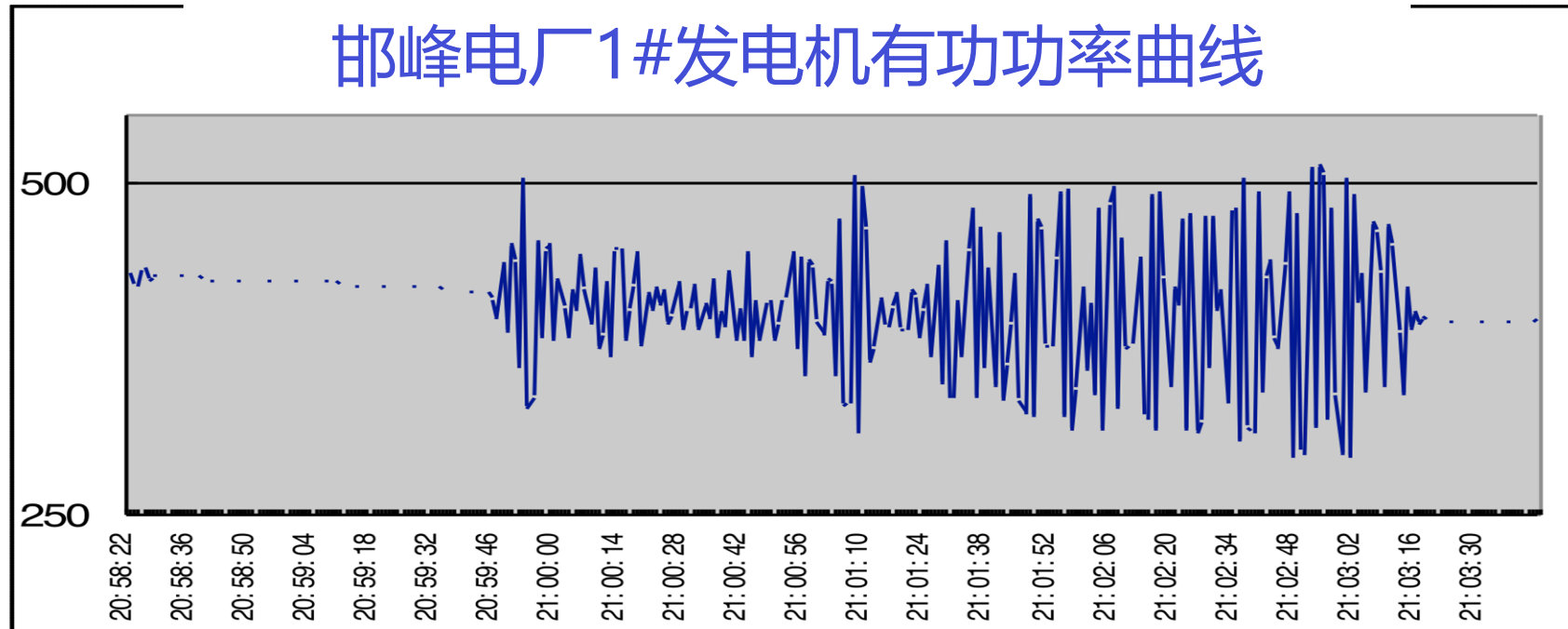
**后果：**安—保线大幅功率振荡，电厂切机

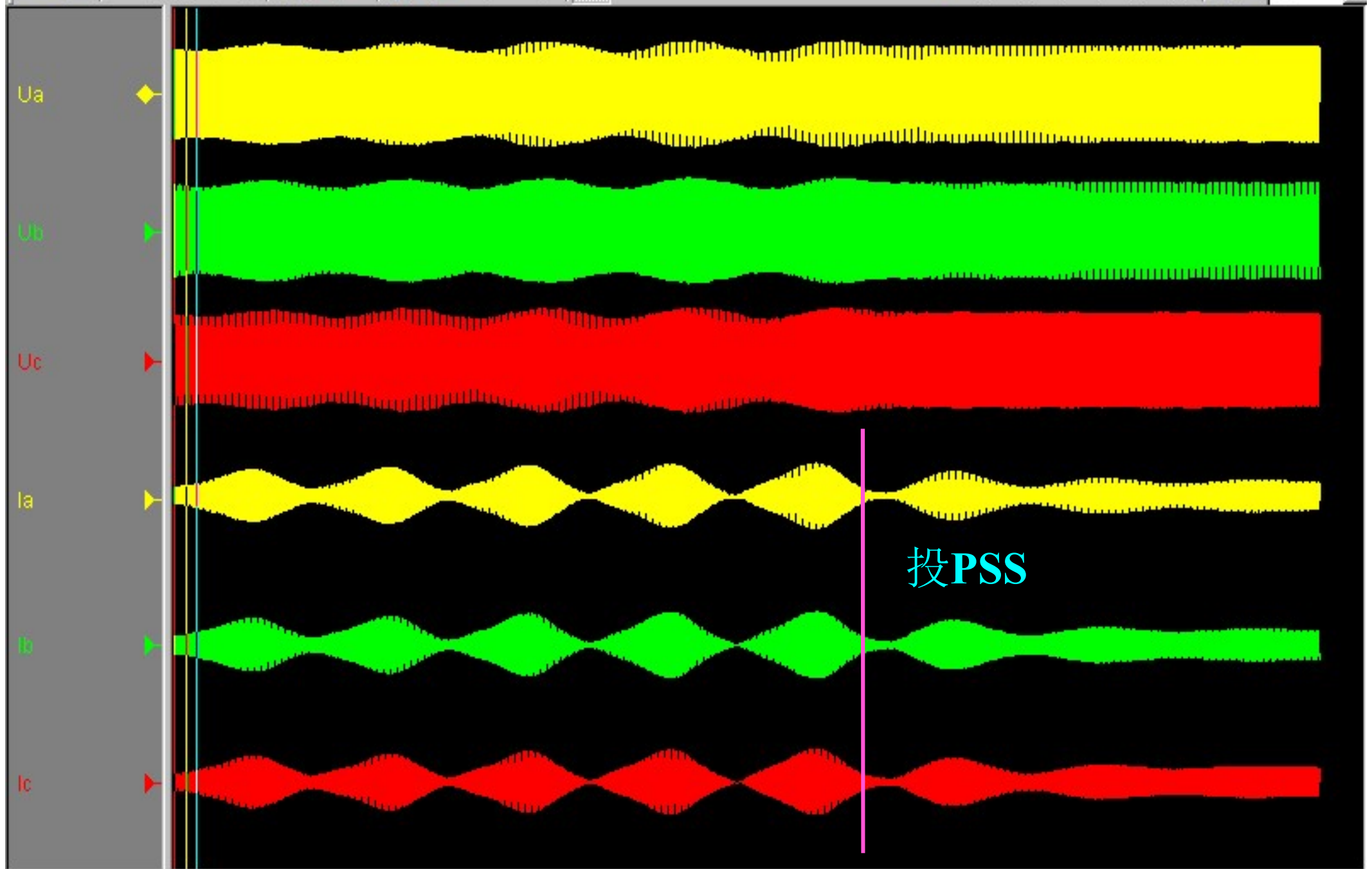
**措施：**上安电厂#3、#4机加装PSS

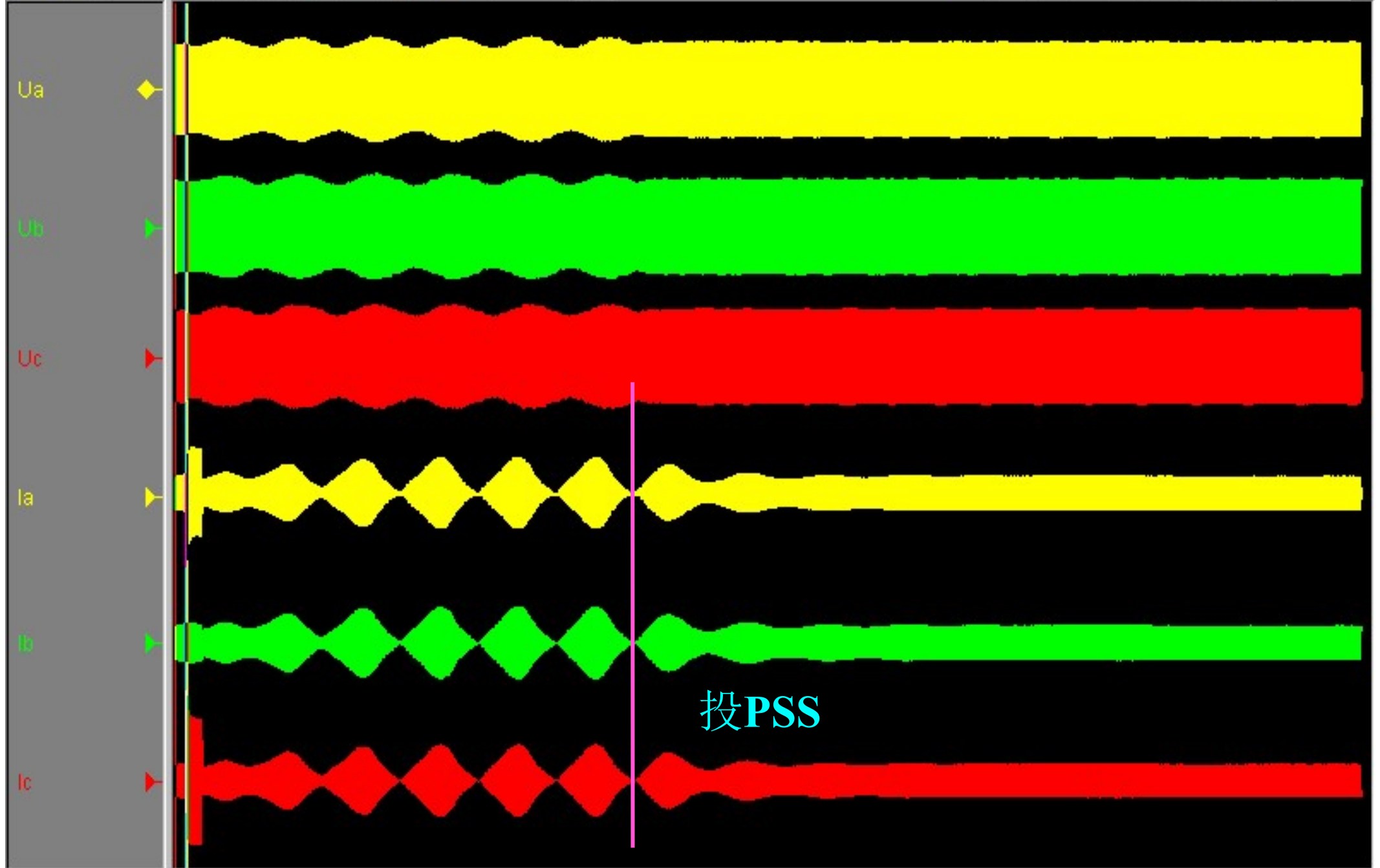
# 低频振荡的实例

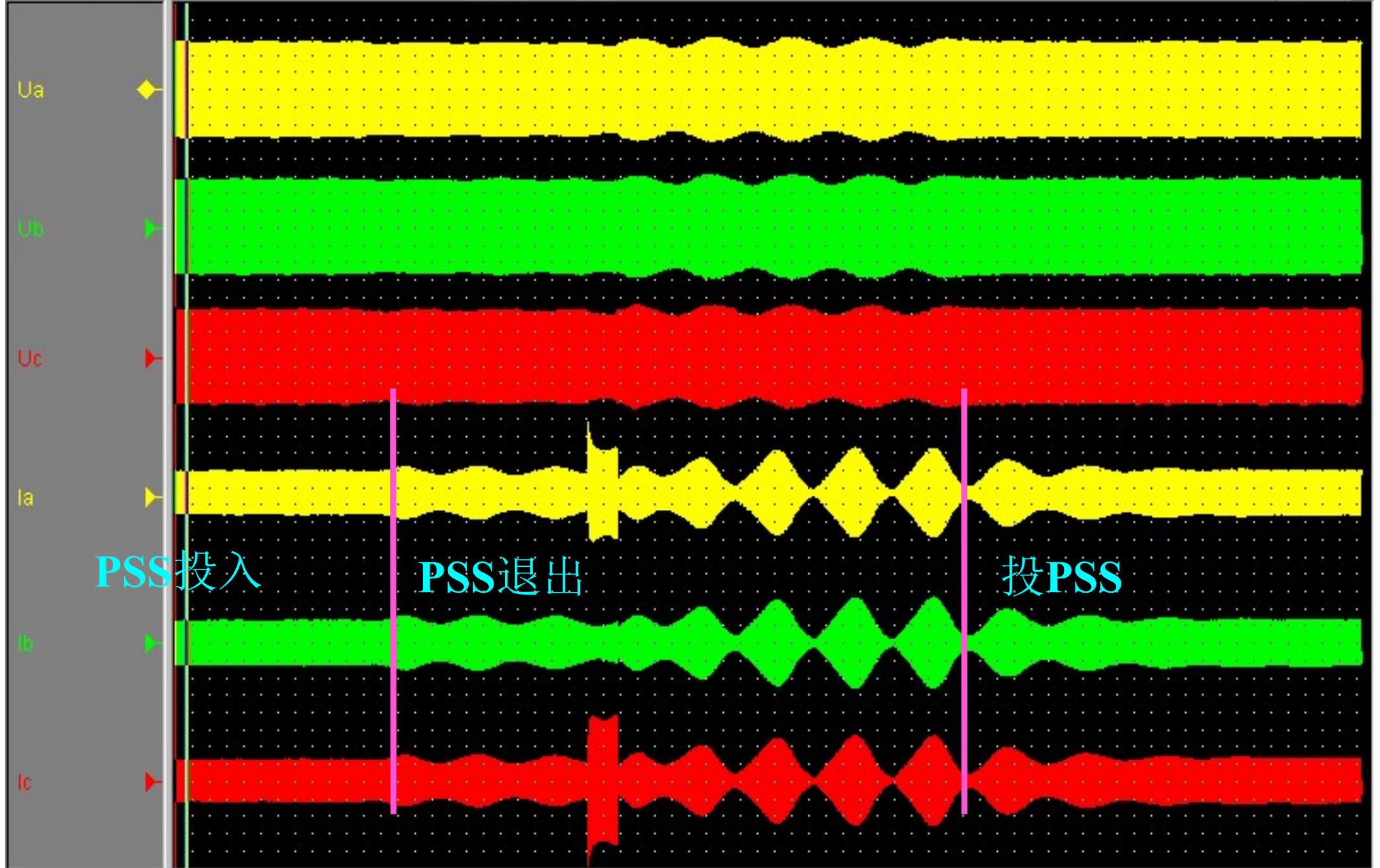
4. 除此之外，还有云南电网、湖北电网、黑龙江北部电网、江苏南通、湖南、葛洲坝电厂、福建、台湾、日本等电网。

5. 2006年7月1日华中、华北电网振荡









# 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：

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

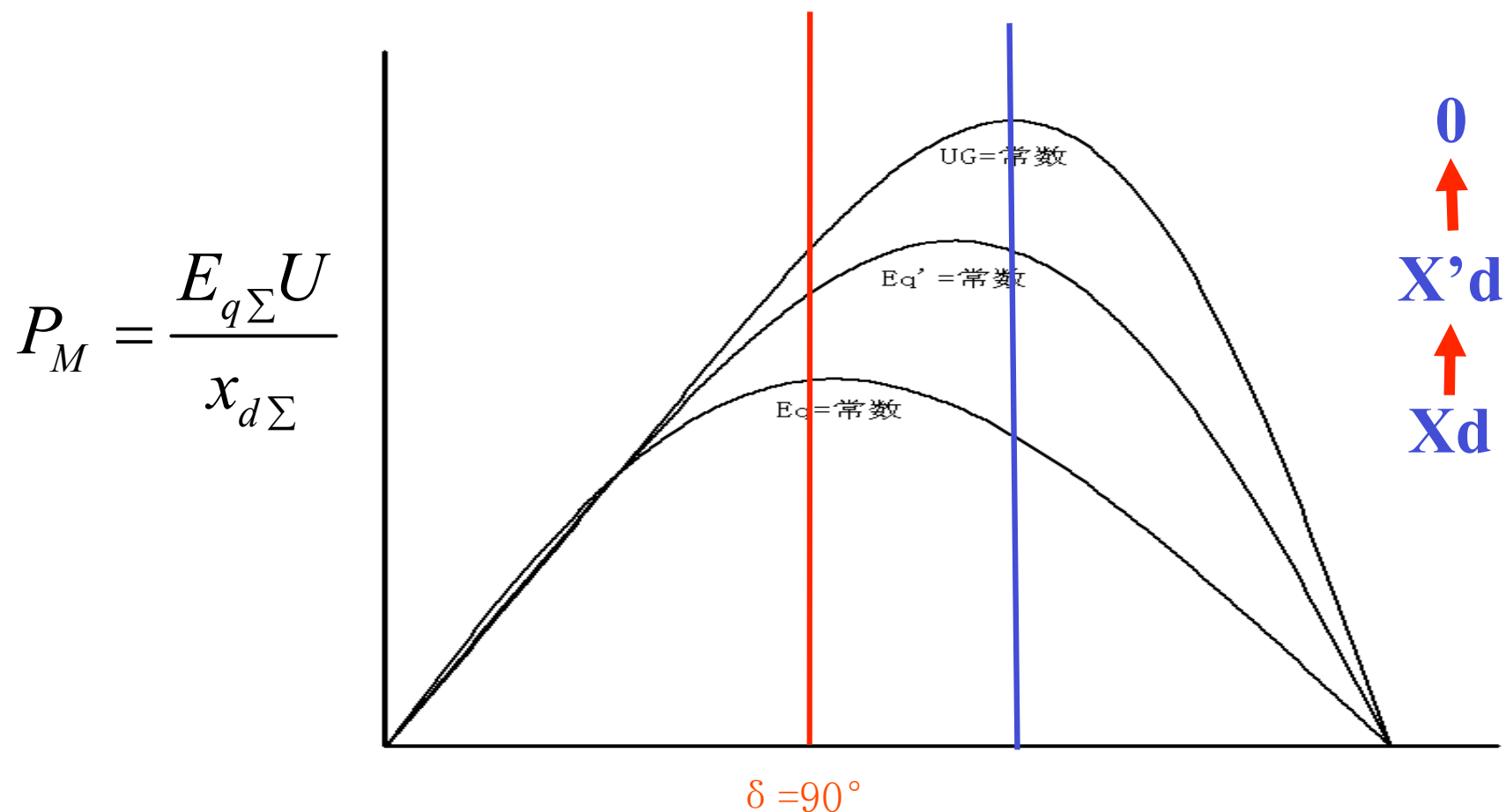
## ■ 以单机无限大系统的情形看

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

- 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。

# 第七次作业 (静态稳定)

---

- **P152**

**5-1, 5-2, 5-3, 5-4**

## 复习本章内容

发布随堂测验7试卷  
8分钟

