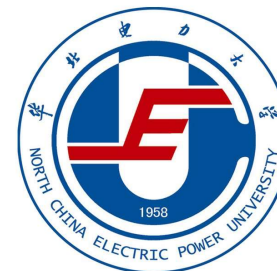


即将直播授课



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

简化及其合理性

- **忽略发电机定子绕组电阻的影响，认为 $r=0$**
 - 这是因为发电机参数中有 $r \ll x$ ，即发电机电抗远大于发电机电阻，发电机电抗标么值通常在零点几或几，而电阻的标么值通常为 10^{-3} 次方甚至更小。
- **设发电机转速接近同步转速，认为 $\omega \approx 1$**
 - 需要注意的是认为 $\omega \approx 1$ 并不表示等于认为 $\Delta\omega=0$ 。认为 $\omega \approx 1$ 即相当于假设 $\omega/\omega_0=1$ 以及 $\Delta\omega\omega_0=\Delta\omega$
- **不计定子绕组中的电磁暂态过程， $p\Psi_d = p\Psi_q = 0$**
 - 由于机电暂态过程通常为1s左右，而电磁暂态过程通常发生在几个周期内。因此忽略电磁暂态过程是合理的，即认为磁链不再随时间发生变化， $p\Psi_d = p\Psi_q = 0$ 。
- **发电机的某个电势恒定**
 - 如果假设励磁电流 I_f 不变，则发电机空载电动势 E_q 不变。如果认为自动励磁装置能够补偿暂态电动势的衰减，则 E'_q 为常数。如果认为自动励磁装置的作用极强，则近似认为机端电压 U_G 不变。

发电机功角特性

$$P_E = \operatorname{Re}(\dot{S}) = \operatorname{Re}(\dot{U}\hat{I})$$

+

$$\dot{U} = \dot{U}_d + \dot{U}_q = U_d + jU_q$$

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q = I_d + jI_q$$

$$\begin{aligned} P_E &= \operatorname{Re} \left[(U_d + jU_q)(I_d - jI_q) \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[(U_d I_d + U_q I_q) + j(U_q I_d - U_d I_q) \right] \\ &= U_d I_d + U_q I_q \end{aligned}$$

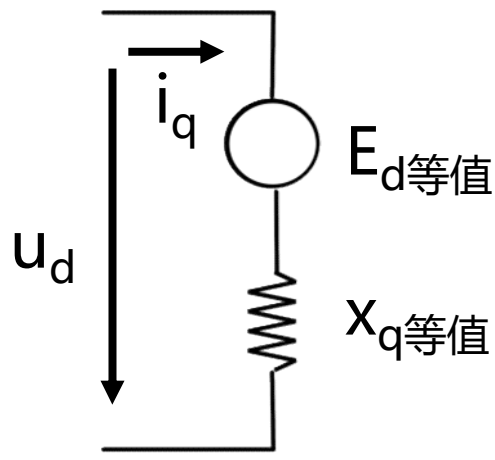
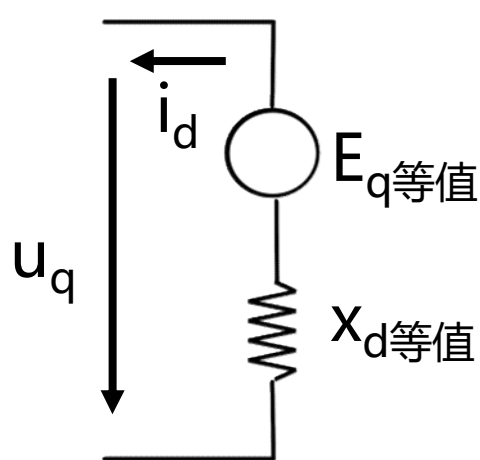
观察功率表达式，希望将电流用电压和系统参数来代替，即

$$P_E = f(E_q, U, \delta) \quad \text{便于 } E_q \text{ 不变时采用}$$

$$P_E = f(E'_q, U, \delta) \quad \text{便于 } E'_q \text{ 不变时采用}$$

$$P_E = f(U_G, U, \delta_G) \quad \text{便于 } U_G \text{ 不变时采用}$$

隐极机功角特性



$$u_q = E_q^{eq} - i_d x_d^{eq}$$

$$u_d = E_d^{eq} + i_q x_q^{eq}$$

$$u_q = E_q - i_d x_d$$

$$u_d = E_d + i_q x_q = i_q x_q$$

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

$$P_E = U_d I_d + U_q I_q$$

$$u_q = E'_q - i_d x'_d$$

$$u_d = E_d + i_q x_q = i_q x_q$$

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

用 E_q 表示隐极机电磁功率

$$P_E = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

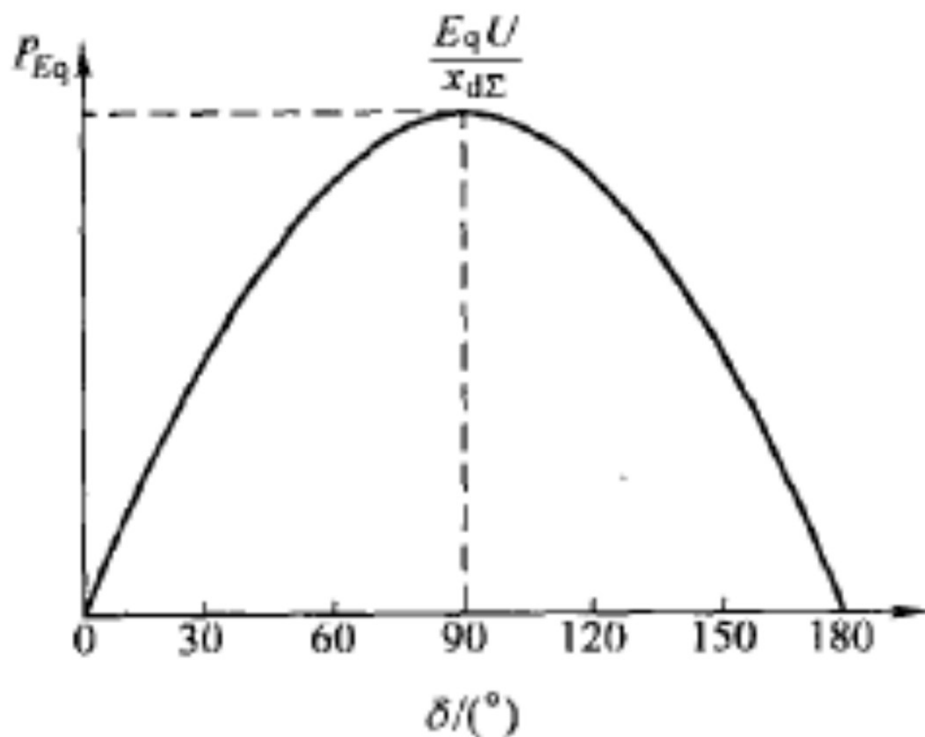
与发电机电势和无穷大母线电压的幅值成正比
与两个电压所在母线之间的总电抗成反比
与两个电压之间的夹角的正弦函数成正比

- 发电机电磁功率就是从发电机母线送向无穷大母线的有功功率。
- 可以扩展到任意两个母线之间联络线传输有功功率。

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \delta_{12}$$

E_q 和 U 为常数时的隐极机功角特性曲线

$$P_E = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$



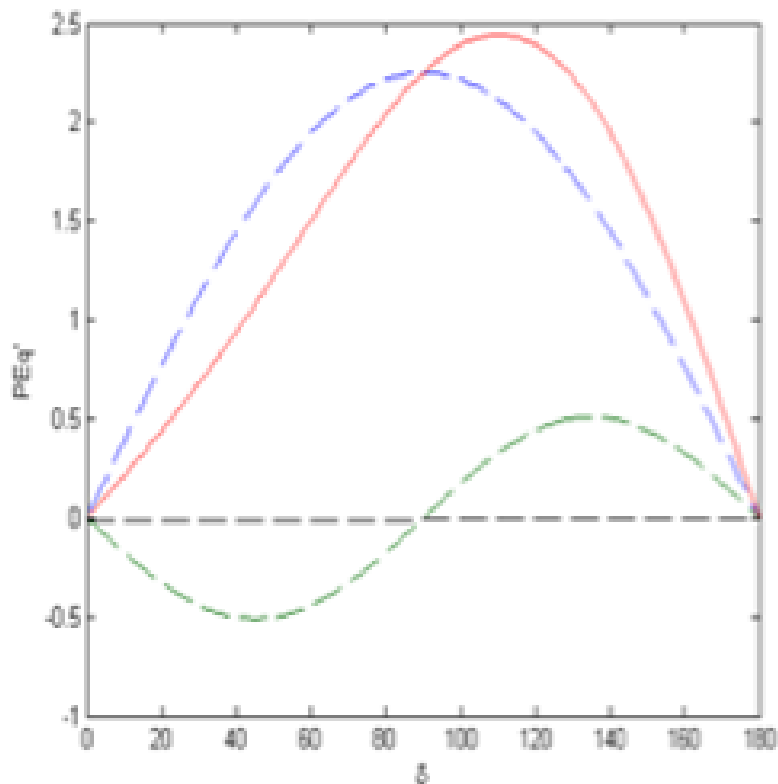
对于隐极机，当发电机空载电势恒定时，在功角为90度时达到功率极限。

$$P_{\max} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}}$$

E_q 为常数时，有功功率和功角 δ 的关系曲线为一正弦曲线。

E'_q 和 U 为常数时的隐极机功角特性曲线

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



- 发电机暂态电动势 E'_q 不变，意味着假设自动励磁装置能够补偿暂态电动势的衰减。
- 对隐极机，当发电机 E'_q 恒定时，功率极限出现在功角**大于90度**处。
- E'_q 为常数时，由于暂态磁阻功率的存在，有功功率和功角的关系曲线发生了畸变，**不再维持正弦曲线**。

隐极机三种表示方式的功角特性比较

$$P_E = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

$$P_E = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X'_{d\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

$$P_E = \frac{U_G U}{X_e} \sin \delta_G$$

E_q 和 E'_q 的关系

$$E'_q = E_q \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} + U \left(1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \right) \cos \delta$$

E_q 为常数时

$$\frac{dE'_q}{d\delta} = -U \left(1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \right) \sin \delta < 0$$

- 当 E_q 为常数时， δ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内 E'_q 随着 δ 的增大而减小。
- 要想随着 δ 的增大维持 E'_q 不变，只能增大 E_q ，即增加励磁。
- 因此， E'_q 为常数时的功率极限大于 E_q 为常数时的功率极限。

隐极机三种表示方式的功角特性比较

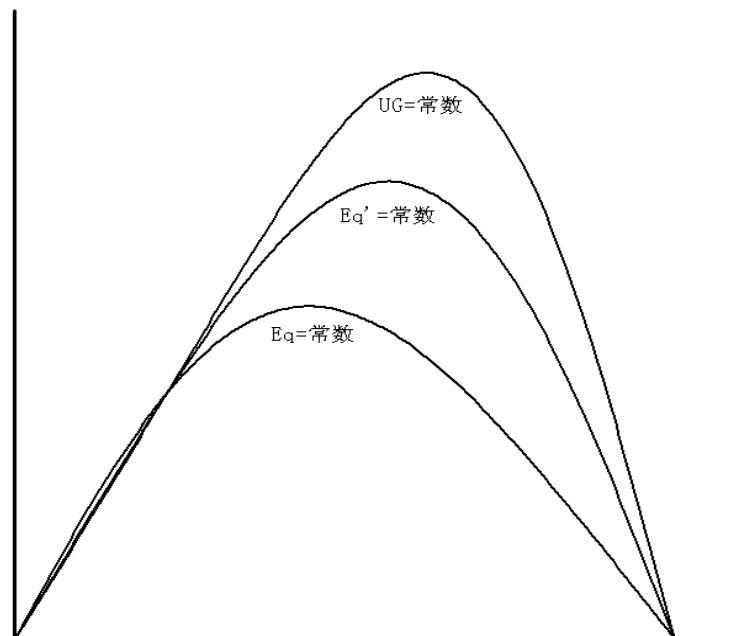
$$E'_q = E_q \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} + U \left(1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \right) \cos \delta$$

E_q 为常数时

$$\frac{dE'_q}{d\delta} = -U \left(1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \right) \sin \delta < 0$$

如果在某一运行点，对应
 $E_{q|0|}$ ， $E'_{q|0|}$ 和 $U_{G|0|}$ ，那么：

- E_q 为常数($E_{q|0|}$)时的功率极限值 $<$ E'_q 为常数($E'_{q|0|}$)时的功率极限值 $<$ U_G 为常数($U_{G|0|}$)时的功率极限值



电气联系与功率极限

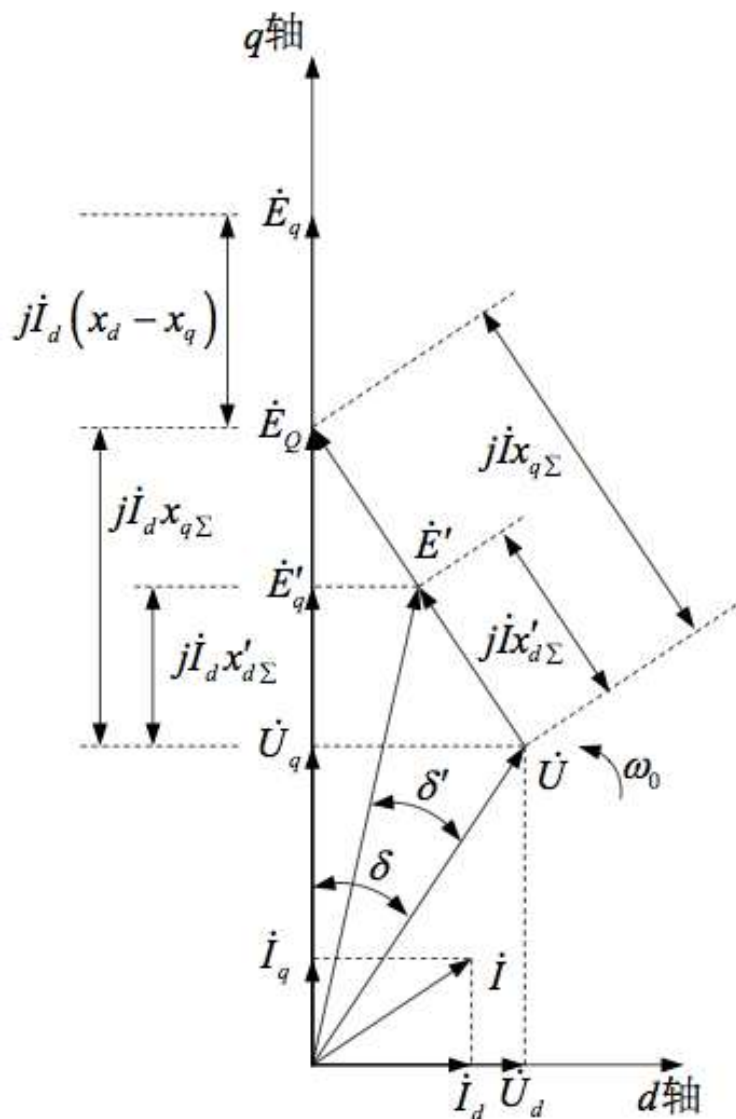
$$P_E = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta$$

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

$$P_E = \frac{U_G U}{x_e} \sin \delta_G$$

- E_q 、 E'_q 和 U_G 与系统间的联系电抗由大到小，对应的功率极限由小到大 ($x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L > x_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L > x_e = x_T + x_L$)
- 可以得到这样一个普遍结论：**发电机与系统之间电气联系越紧密，该发电机能够输出的电磁功率极限越大。**
- 发电机与系统之间电抗越小，该发电机传输功率越大，意味着该发电机电磁功率的控制范围越大，越容易使之满足同步运行，即越容易达到稳态运行状态，换句话说，**电气联系越紧密，则越容易稳定。**

用 E_q 表示凸极机电磁功率



由图可知

$$\begin{cases} E_q = U_q + I_d X_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q X_{q\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \frac{E_q - U_q}{X_{d\Sigma}} \\ I_q = \frac{U_d}{X_{q\Sigma}} \end{cases}$$

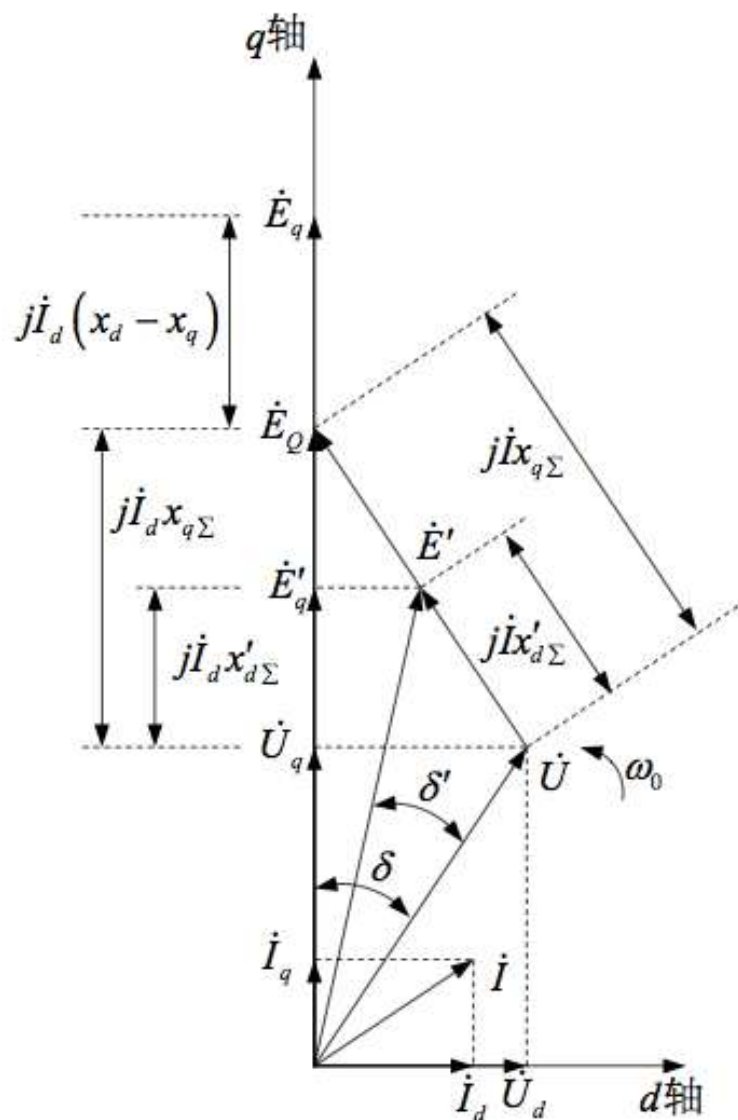
代入 ↓

$$P_E = U_d I_d + U_q I_q$$

↓ x_d 和 x_q 不相等

$$\begin{aligned} P_E &= U_d \frac{E_q - U_q}{X_{d\Sigma}} + U_q \frac{U_d}{X_{q\Sigma}} = \frac{E_q U_d}{X_{d\Sigma}} - \frac{U_d U_q}{X_{d\Sigma}} + \frac{U_d U_q}{X_{q\Sigma}} \\ &= \frac{E_q U_d}{X_{d\Sigma}} + U_d U_q \left(\frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \end{aligned}$$

用 E_q 表示凸极机电磁功率



$$P_E = U_d \frac{E_q - U_q}{x_{d\Sigma}} + U_q \frac{U_d}{x_{q\Sigma}} = \frac{E U_d}{x_{d\Sigma}} - \frac{U_d U_q}{x_{d\Sigma}} + \frac{U_d U_q}{x_{q\Sigma}}$$

$$= \frac{E U_d}{x_{d\Sigma}} + U_d U_q \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right)$$

由图可知, $U_q = U \cos \delta$
 $U_d = U \sin \delta$

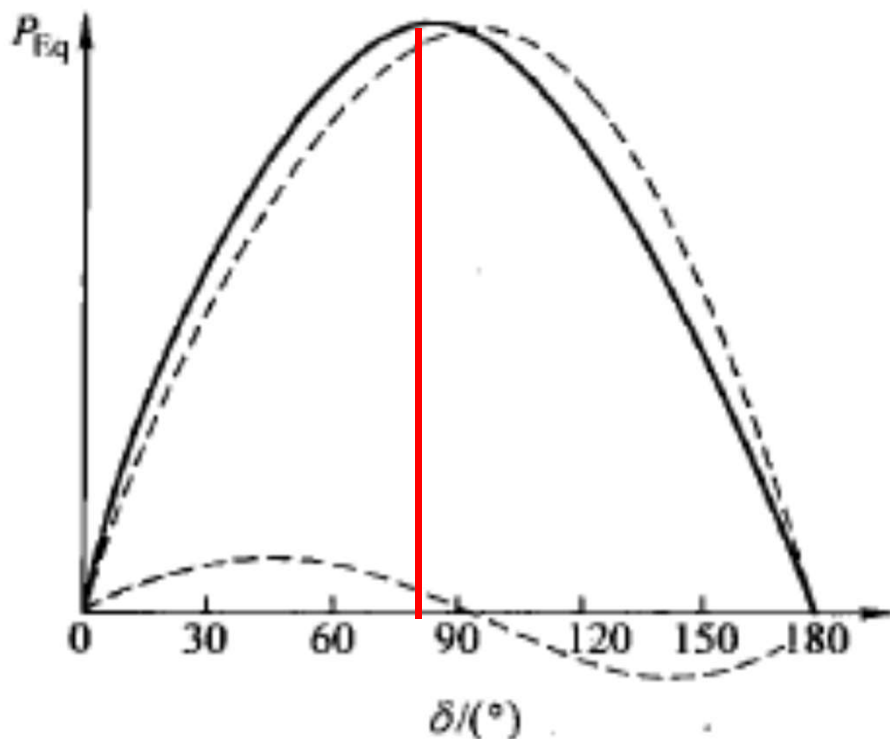
↓ 得到

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

磁阻功率

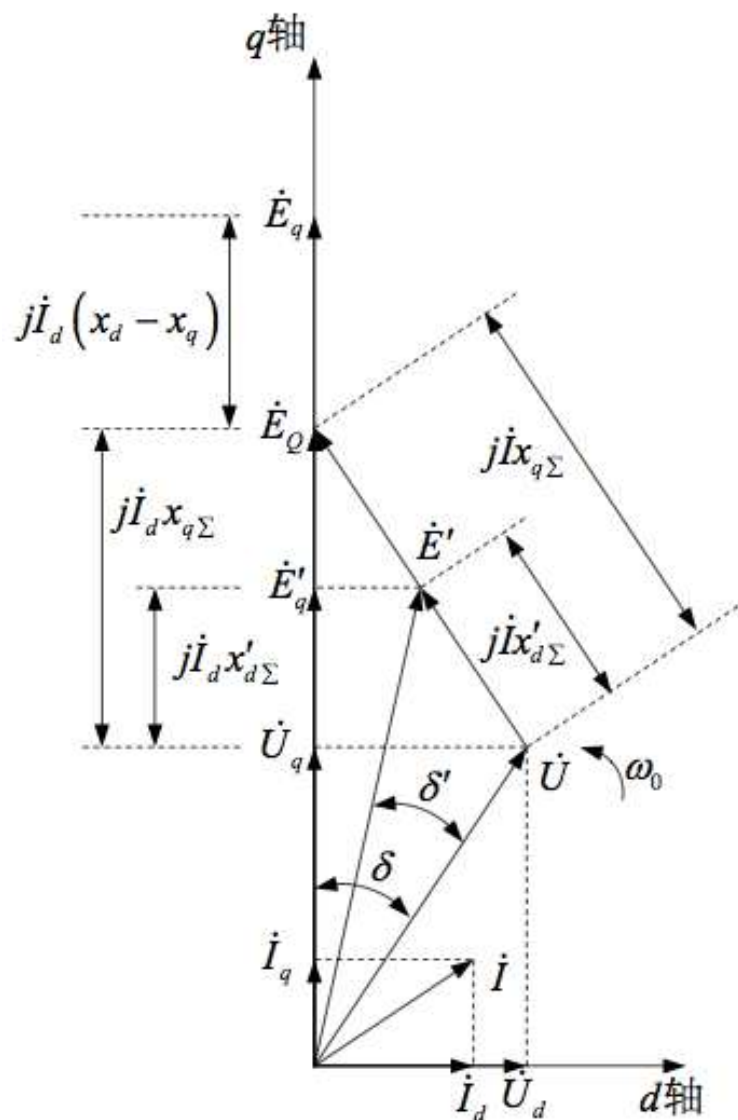
用Eq表示凸极机电磁功率

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



- 对于凸极机，**当发电机空载电势恒定时**，功率极限值出现在功角小于 90° 处。
- 磁阻功率的存在，使功角特性曲线畸变，功率极限略有增加。

用 E'_q 表示凸极机电磁功率



由图可知

$$\begin{cases} E'_q = U_q + I_d X'_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q X_{q\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \frac{E'_q - U_q}{X'_{d\Sigma}} \\ I_q = \frac{U_d}{X_{q\Sigma}} \end{cases}$$

代入 ↓

$$P_E = U_d I_d + U_q I_q$$

得到 ↓

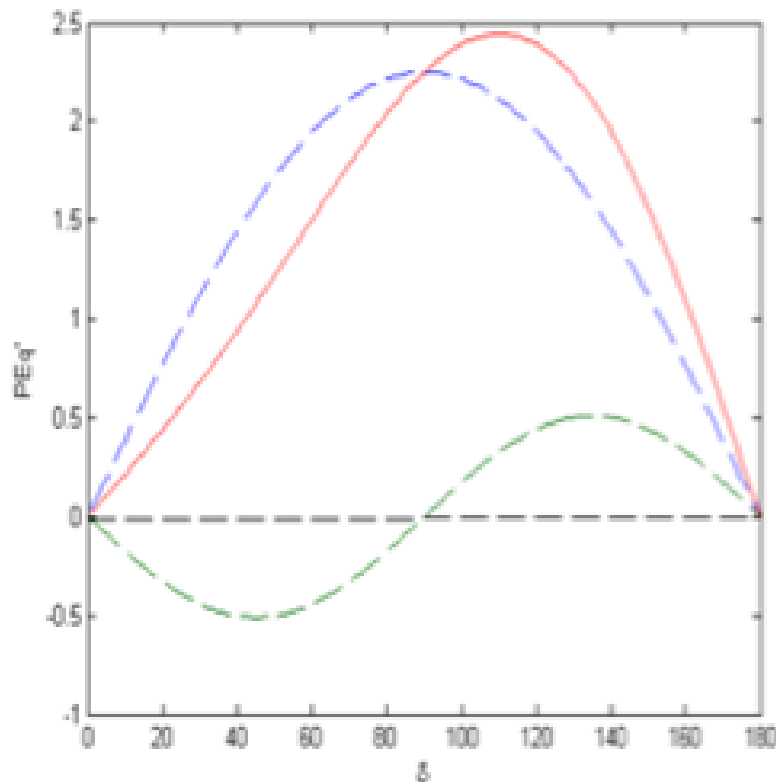
$$\begin{aligned} P_E &= U_d \frac{E'_q - U_q}{X'_{d\Sigma}} + U_q \frac{U_d}{X_{q\Sigma}} = \frac{E'_q U_d}{X'_{d\Sigma}} - \frac{U_q U_d}{X'_{d\Sigma}} + \frac{U_q U_d}{X_{q\Sigma}} \\ &= \frac{E'_q U_d}{X'_{d\Sigma}} - U_q U_d \left(\frac{1}{X'_{d\Sigma}} - \frac{1}{X_{q\Sigma}} \right) \end{aligned}$$

用 E'_q 表示凸极机电磁功率

$$P_E = \frac{E'_q U_d}{x'_{d\Sigma}} - U_q U_d \left(\frac{1}{x'_{d\Sigma}} - \frac{1}{x_{q\Sigma}} \right)$$

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

暂态磁阻功率



- 对于凸极机，当**发电机暂态电势恒定时**，功率极限出现在功角大于90度处。
- 由于凸极机的 x_q 往往小于隐极机的 x_d ，因此其暂态磁阻功率往往小于隐极机的相应分量。
- 同样对凸极机可以用 E' 做近似简化，简化结果与隐极机的相同。

发电机端电压常数时的功角特性

- 由之前的推论可以直接写出用发电机机端电压表示的功角特性关系

$$P_E = \frac{U_G U}{x_e} \sin \delta_G$$

$$x_e = x_T + x_L$$

$$\delta_G = \delta - \arcsin \left[\frac{U}{U_G} \left(1 - \frac{x_e}{x_{q\Sigma}} \right) \sin \delta \right]$$

多机系统功角特性

- 若系统中有多台发电机，近似地将每台发电机以一个等值电抗和其后的电动势来代表。

$$P_E = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

$$P_E = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta'$$

$$P_E = \frac{U_G U}{X_e} \sin \delta_G$$

- 假设已经消去了网络中除发电机电势节点外的其它负荷节点和联络节点，设系统的节点导纳矩阵为Y。

$$\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = |Y_{ij}| \angle \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{ij} \right)$$

$$|Y_{ij}| = \sqrt{G_{ij}^2 + B_{ij}^2}, \beta_{ij} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{G_{ij}}{B_{ij}}$$

多机系统功角特性

$$\begin{aligned} P_{E_i} &= \operatorname{Re}\left(\dot{E}_i \hat{I}_i\right) = \operatorname{Re}\left(\dot{E}_i \sum_{j=1}^G \hat{E}_j \hat{Y}_{ij}\right) = E_i \sum_{j=1}^G E_j \left(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}\right) \\ &= E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G E_j \left(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}\right) \\ &= E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G E_j |Y_{ij}| \sin\left(\delta_{ij} + \beta_{ij}\right) \end{aligned}$$

- 在多机系统中，任一**发电机发出的功率**是该发电机电动势相对于其他发电机电动势相量的**相角差**的函数。
- 当系统中含有三台以上发电机的情况下，**无法用曲线**作出发电机的功角特性。

电动势变化过程

$$u_f = r_f i_f + \dot{\psi}_f \quad \rightarrow \quad \frac{x_{ad}}{r_f} u_f = \frac{x_{ad}}{r_f} (r_f i_f + \dot{\psi}_f)$$

$$\rightarrow x_{ad} \frac{u_f}{r_f} = x_{ad} i_f + \frac{x_{ad}}{r_f} \dot{\psi}_f = x_{ad} i_f + \frac{x_f}{r_f} \frac{x_{ad}}{x_f} \dot{\psi}_f$$

$$\downarrow \quad \frac{x_{ad}}{x_f} \dot{\psi}_f = \frac{x_{ad}}{x_f} \frac{d\psi_f}{dt} = d \left(\frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f \right) / dt = \frac{dE'_q}{dt}$$

$$x_{ad} \frac{u_f}{r_f} = x_{ad} i_f + \frac{x_f}{r_f} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$\frac{x_f}{r_f} = T_f \quad \text{励磁绕组时间常数}$$

$$x_{ad} \frac{u_f}{r_f} \quad \text{强制空载电动势 } E_{qe}$$

$$E_{qe} = E_q + T_f \frac{dE'_q}{dt} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$x_{ad} i_f \quad \text{空载电动势}$$

电动势变化过程

$$E_{qe} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$E_{qe} = x_{ad} \frac{u_f}{r_f} \quad \text{强制空载电动势 } E_{qe}$$



能否用 E'_q 表示 E_q ? $E_q = E'_q + (x_d - x'_d) I_d$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - [E'_q + I_d (x_d - x'_d)] \quad \text{微分代数方程, 描述暂态电动势的变化过程}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1) \omega_0$$

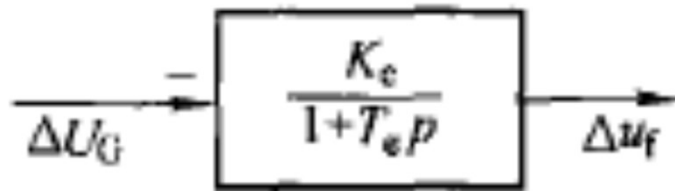
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_{T^*} - P_{E^*})$$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - [E'_q + I_d (x_d - x'_d)]$$

E_{qe} 是不是常数取决于 u_f

自动励磁系统

自动调节励磁系统的简化模型：比例式自动励磁调节器



$$-\Delta U_G \frac{K_e}{1 + T_e p} = \Delta u_f$$



$$-K_e \Delta U_G = (1 + T_e p) \Delta E_{qe}$$



$$T_e \frac{d\Delta E_{qe}}{dt} = -\Delta E_{qe} - K_e \Delta U_G$$

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_{T^*} - P_{E^*})$$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - [E'_q + I_d(x_d - x'_d)]$$

$$T_e \frac{d\Delta E_{qe}}{dt} = -\Delta E_{qe} - K_e \Delta U_G$$

更详细模型再加原动机模型、调速器模型、复杂的励磁系统模型

电力系统稳定问题的数学描述

- 转子运动方程
$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_{T^*} - P_{E^*}) \end{cases}$$
- 考虑暂态电势的衰减
$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - [E'_q + I_d(x_d - x'_d)]$$
- 考虑励磁调节
$$T_e \frac{d\Delta E_{qe}}{dt} = -\Delta E_{qe} - K_e \Delta U_G$$
- 考虑原动机模型、调速器模型、更复杂的励磁机
- 负荷模型?

负荷特性

- 假设已经**消去了**网络中除发电机电势节点外的其它**负荷节点**和**联络节点**，设系统的节点导纳矩阵为Y：

$$\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = |Y_{ij}| \angle \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{ij} \right)$$

- 则发电机的电磁功率可以表示为：

$$P_{E_i} = \operatorname{Re} \left(\dot{E}_i \hat{I}_i \right) = E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G E_j |Y_{ij}| \sin \left(\delta_{ij} + \beta_{ij} \right)$$

- 负荷节点和联络节点的**消去原则是什么**？
- 对复杂系统，负荷是怎么对稳定问题产生影响的？

负荷特性

- 复杂系统潮流方程：

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

P_i和Q_i是什么？

- A 发电机电磁功率**
- B 负荷功率**
- C 节点注入功率**
- D 发电机电磁功率、负荷功率、功率补偿等的差值**

负荷特性

■ 复杂系统发电机电磁功率的表达

$$P_{Ei} = P_{Di} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_{Ei} = Q_{Di} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

- 在一般的稳定研究中，描述负荷特性的方法主要有以下三种：
 - 恒定阻抗负荷模型
 - 综合负荷的静态模型
 - 感应电动机模型

恒定阻抗负荷模型

- 方法简单，但误差较大，**只适用于近似计算分析。**
- 假设所有负荷均为恒定阻抗。
- 近似地认为负荷从系统吸收的功率总是正比于负荷节点电压的平方。

$$Z_L = R_L + jX_L \quad P_L = U^2 \frac{R_L}{R_L^2 + X_L^2} \quad Q_L = U^2 \frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2}$$

- 假设已经**消去了**网络中除发电机电势节点外的其它**负荷节点**和联络节点，设系统的节点导纳矩阵为Y：

$$\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = |Y_{ij}| \angle \left(\frac{\pi}{2} - \beta_{ij} \right)$$

导纳矩阵中含有
负荷等值阻抗

综合负荷静态模型

- 负荷静态模型反映了负荷有功、无功功率随频率和电压缓慢变化而变化的规律。

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{p_\omega} \\ Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_u} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{q_\omega} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P = P_0 \left[a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_p \right] \left(1 + \left. \frac{dP_*}{df_*} \right|_{f_0} \Delta f_* \right) \\ Q = Q_0 \left[a_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_q \right] \left(1 + \left. \frac{dQ_*}{df_*} \right|_{f_0} \Delta f_* \right) \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{P}{P_0} = a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_p \\ \frac{Q}{Q_0} = a_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_q \end{cases}$$

异步电动机三阶模型

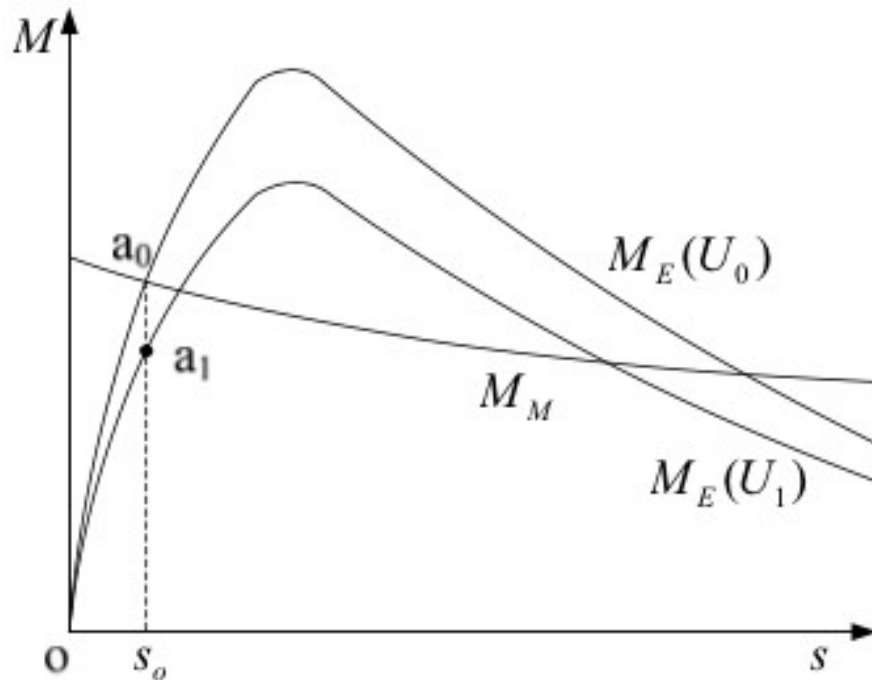
- 一般来说，感应电动机定子绕组的电磁暂态过程比转子绕组的暂态过程要快得多，且比电力系统暂态过程快得多。
- 因此，就感应电动机对电力系统的影响而言，是否计及定子的暂态过程影响不大，因此在一般分析中采用三阶模型就可以达到足够的精度。

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\omega_s s E'_d - \frac{1}{T'_0} E'_q + \frac{X - X'}{T'_0} i_d$$

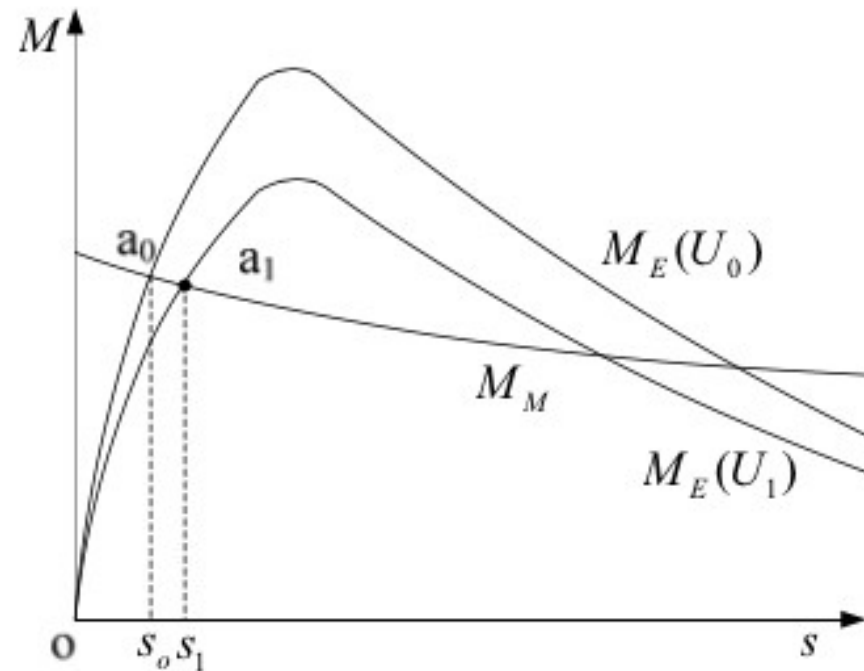
$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_0} E'_d + \omega_s s E'_q - \frac{X - X'}{T'_0} i_d$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (T_e - T_m)$$

异步电动机模型动态特性和静态特性



动态特性



静态特性

复习本节内容

发布随堂测验6试卷
5分钟

绝地反击
根本不用复习法



考试的时候带上一支红笔
边做边给自己评分
然后老师改卷时会以为
这张改过了直接跳过

第五次作业 (电力系统稳定性)

- P133
 - 4-1, 4-2, 4-5

第五章

电力系统的静态稳定性

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

静态稳定性的研究目的

- 电力系统受到小干扰后，不发生自发性振荡或非周期性失步，自动恢复到初始运行状态的能力。
- 简单地说，就是指电力系统受到小干扰时维持同步运行状态的能力。
- 也可以将静态稳定问题理解为确定系统的某个运行稳态能否保持的问题。
- 确定系统运行参数变化的性质和趋势，以便从中判断系统的稳定状况，不对状态量的变化过程进行研究。
- 用简单电力系统来讨论静态稳定性的特征和分析方法。

简单电力系统

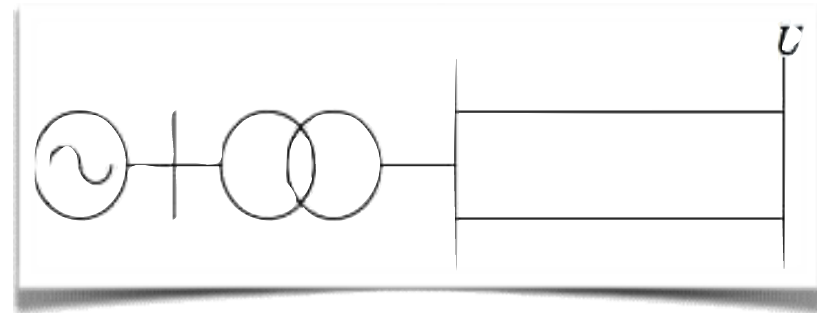
- 简单电力系统也被为**单机无限大母线系统**，或**单机无穷大系统**。

- **无限大母线**

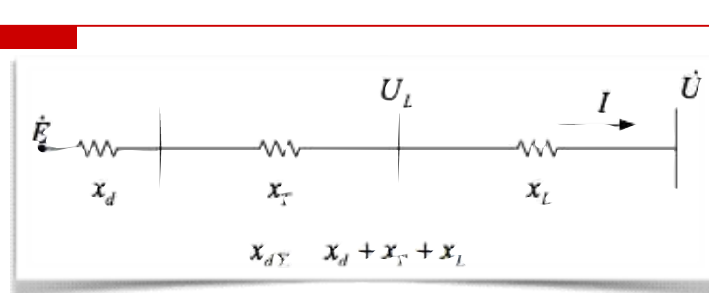
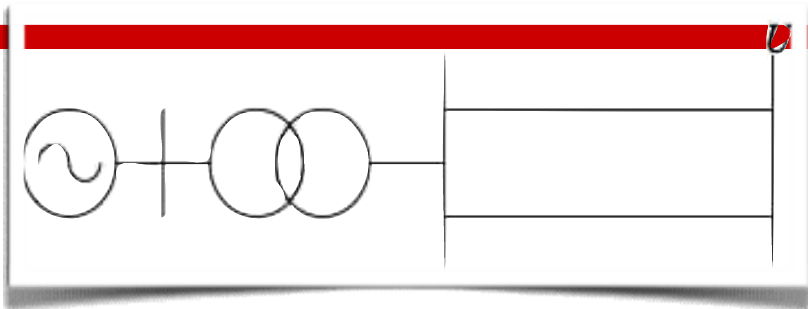
- 容量无限大
- 惯性时间常数无限大

- **单机是理想电机**

- 发电机为隐极机
- 不考虑发电机励磁调节器的作用
- 不计原动机调速器作用
- 忽略发电机的风阻、摩擦等机械阻力和各阻尼的影响



简单电力系统



■ 无限大母线

- 容量无限大
- 惯性时间常数无限大



受端系统频率为常数
电压U的大小和相位为常数

■ 单机是理想电机

- 发电机为隐极机
- 不考虑发电机励磁调节器的作用
- 不计原动机调速器作用
- 忽略发电机的风阻、摩擦等机械阻力和各阻尼的影响

$$P_E = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

E_q恒定

P_T不变

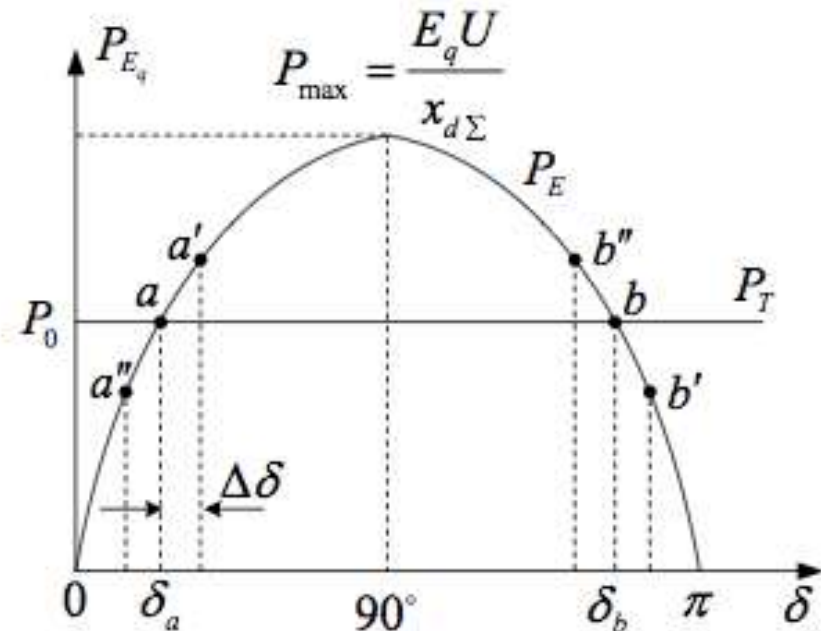
只有P_E和P_T

简单电力系统

假定在某一正常运行情况下，发电机向无限大系统输送的功率为 P_0 ，此时一定有 $P_0 = P_{T0} = P_{E0}$ 。

系统可能有两个运行点(必然是 P_T 与 P_E 的焦点)，如图所示a点和b点，分别对应发电机功角为 δ_a 和 δ_b 。

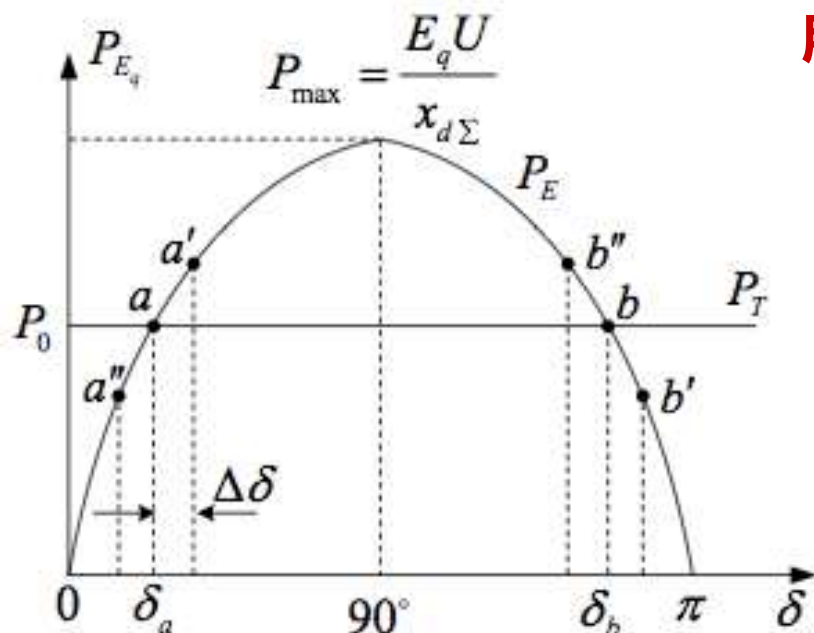
问题：这两个运行点都是稳定的吗？



- A a点是稳定运行点，b点不是
- B b点是稳定运行点，a点不是
- C a点和b点都是稳定运行点
- D a点和b点都不是稳定运行点

小扰动下的响应过程分析

用电力系统稳定问题的数学描述进行分析。



对于单机无穷大系统

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_{T^*} - P_{E^*}) \end{array} \right.$$

扰动发生前的稳态状态:

$$\Delta P = 0 \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow \omega = \omega_0 \Rightarrow \frac{d\delta}{dt} = 0 \Rightarrow \delta = \delta_0$$

电力系统稳定问题的数学描述

- 转子运动方程
$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_T - P_E) \end{cases}$$
- 考虑暂态电势的衰减
$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{qe} - [E_q' + I_d(x_d - x_d')]$$
- 考虑励磁调节
$$T_e \frac{d\Delta E_{qe}}{dt} = -\Delta E_{qe} - K_e \Delta U_G$$
- 考虑原动机模型、调速器模型、更复杂的励磁机
- 负荷模型?

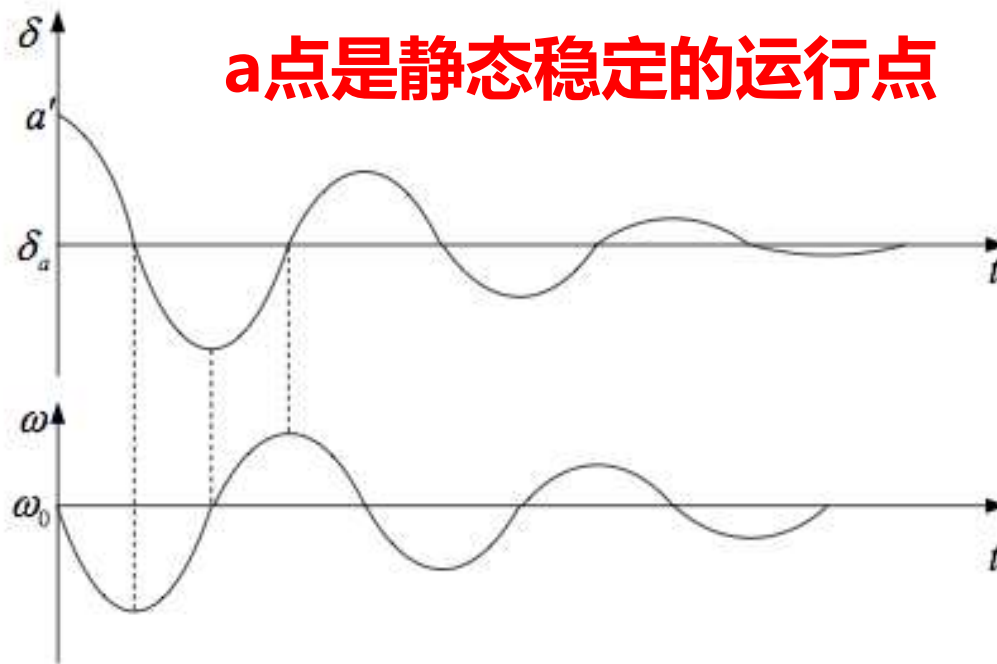
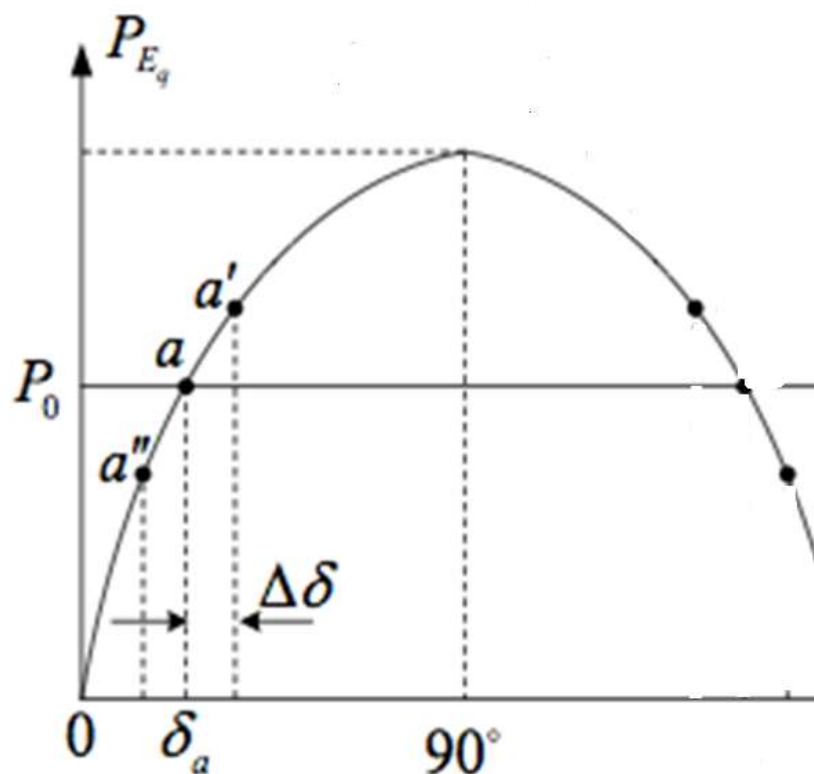
刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

小扰动下的响应过程分析——a点

扰动发生后，分两种情况讨论：

- 一种是扰动使转子角增大
- 一种是扰动是转子角减小

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \cdot (P_{T^*} - P_{E^*}) \end{cases}$$



a点是静态稳定的运行点