即将直播授课

- 下载腾讯课堂学生端APP：
  https://ke.qq.ocm/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

发电机惯性时间常数T_J

$$T_J \frac{d\Omega_*}{dt} = \Delta M_*$$

- **物理意义**

  在发电机转子上施加**单位转矩**后，转子从**停顿状态**加速到**额定转速**时所经过的时间。

- **根据定义计算**

$$T_J = \frac{2W_K}{S_B} = \frac{GD^2}{4S_B}\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \approx \frac{2.74GD^2}{1000S_B}n^2$$

- **其他的表示方式**
  - H，2H=T_J
- **取值范围**
  - 额定容量基准下($S_B=S_N$)，一般在2~10秒内，对水轮机组，其数值一般随机组容量的增加而增加，汽轮机则正好相反。

发电机转子角表示的运动方程组

- 通常说到发电机转子角指的都是电角度，转子角速度指的是转子电角速度。
- 机械角速度与电角速度的关系为：Ω=ω/p

$$\Omega_* = \frac{\Omega}{\Omega_0} = \frac{\omega/p}{\omega_0/p} = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega_*$$

- 功率与转矩的关系为：P=MΩ

$$\Delta M_* = \frac{\Delta M}{M_B} = \frac{\Delta M}{S_B/\Omega_0} = \frac{\Delta M \Omega_0}{S_B} \approx \frac{\Delta M \Omega}{S_B} = \frac{\Delta P}{S_B} = \Delta P_*$$

- 改写

$$T_J \frac{d\Omega_*}{dt} = \Delta M_*$$

$$OR\left(\frac{T_J}{\Omega_0}\frac{d\Omega}{dt} = \Delta M_*\right)$$

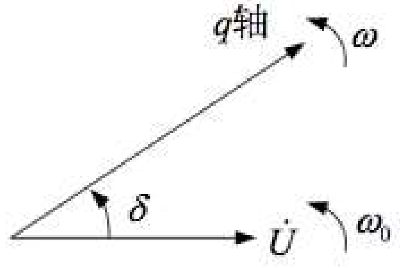
$$\Rightarrow$$

$$\boxed{T_J \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta P_* \quad OR \quad \frac{T_J}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = \Delta P_*}$$

发电机转子角表示的运动方程组

$$T_J \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta M_* \quad OR \quad \frac{T_J}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = \Delta M_*$$

- **考虑转子角相对运动**



$$\left.\begin{aligned}\frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_0 \\ \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{d\omega}{dt}\end{aligned}\right\}$$

- **转子运动方程**

$$\begin{cases}\dfrac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{\omega_0}{T_J}\left(P_{T*} - P_{E*} - P_{D*}\right)\end{cases}$$

ω的有名值形式

ω的标幺值形式

$$\begin{cases}\dfrac{d\delta}{dt} = (\omega_* - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega_*}{dt} = \dfrac{1}{T_J} \cdot \Delta P_*\end{cases}$$

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

转子运动方程

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

转子运动方程，表明了电的或机械的角加速度和转子上不平衡转矩或功率的关系。

- **稳态时**

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

- **暂态时**

机械功率P_T=干扰发生时刻的稳态电磁功率$P_{E|0|}$

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

转子运动方程——暂态情况

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

- 电磁功率P_E
  - 电力系统稳定性计算的复杂性和工作量，主要取决于发电机电磁转矩(或功率)的描述和计算。
  - =?

发电机功角特性方程

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<<x，即发电机电抗远大于发电机电阻，发电机电抗标幺值通常在零点几或几，而电阻的标幺值通常为10^{-3}次方甚至更小。
- 设发电机转速接近同步转速，认为ω≈1
  - 需要注意的是认为ω≈1并不表示等于认为Δω=0。认为ω≈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
  - 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。

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

发电机功角特性

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

+

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

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

$$P_E = \mathrm{Re}\left[(U_d + jU_q)(I_d - jI_q)\right]$$
$$= \mathrm{Re}\left[(U_d I_d + U_q I_q) + j(U_q I_d - U_d I_q)\right]$$
$$= U_d I_d + U_q I_q$$

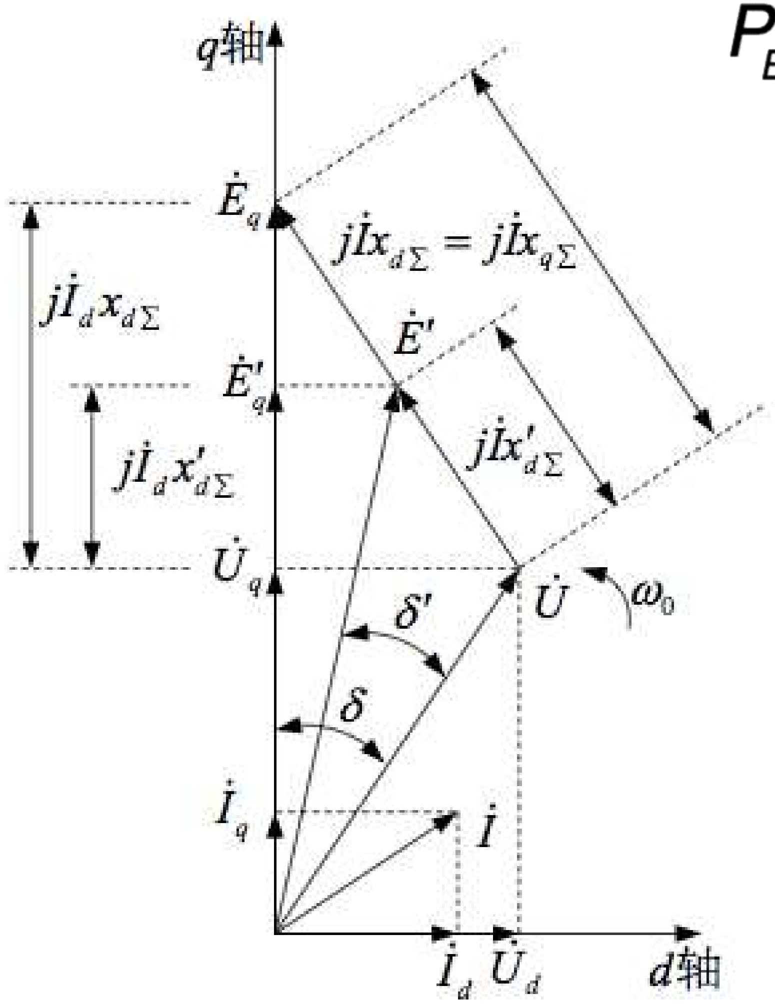
观察功率表达式，希望将电流用电压和系统参数来代替，即

$$P_E = f\left(E_q, U, \delta\right)$$ **便于E_q不变时采用**

$$P_E = f\left(E'_q, U, \delta\right)$$ **便于E'_q不变时采用**

$$P_E = f\left(U_G, U, \delta_G\right)$$ **便于U_G不变时采用**

用E_q表示隐极机电磁功率



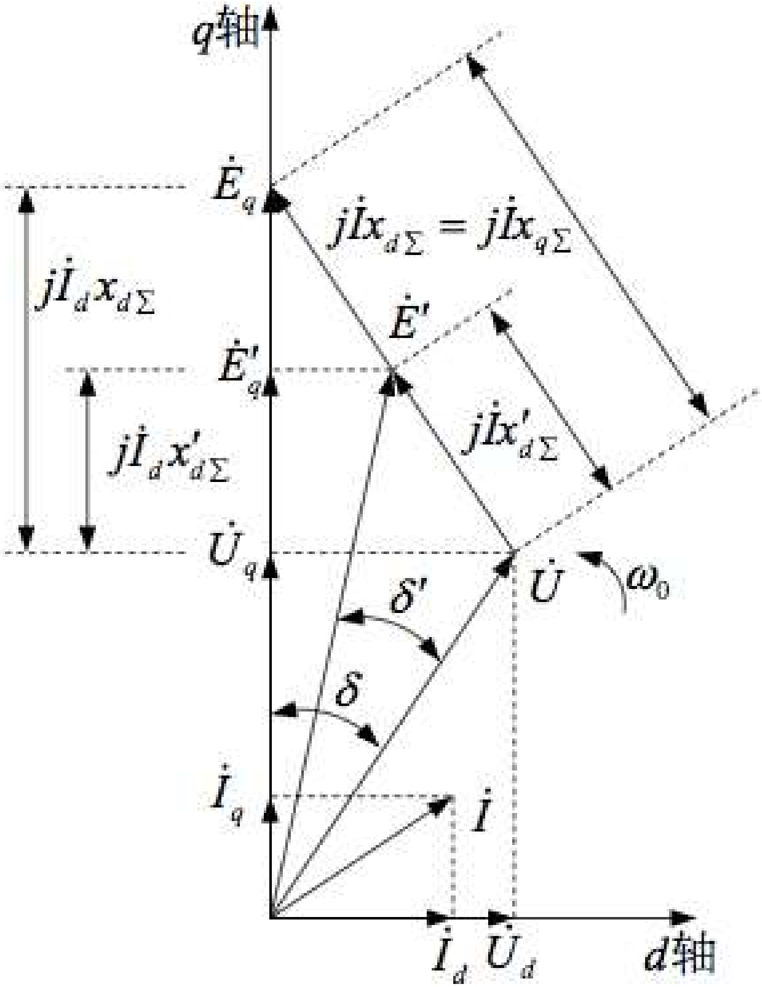
$$P_E = U_d I_d + U_q I_q \Rightarrow P_E = f\left(E_q, U, \delta\right)$$

由图可知

$$\begin{cases} E_q = U_q + I_d x_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q x_{d\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \dfrac{E_q - U_q}{x_{d\Sigma}} \\ I_q = \dfrac{U_d}{x_{d\Sigma}} \end{cases}$$

代入

用E_q表示隐极机电磁功率



$$\begin{cases} E_q = U_q + I_d x_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q x_{d\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \dfrac{E_q - U_q}{x_{d\Sigma}} \\ I_q = \dfrac{U_d}{x_{d\Sigma}} \end{cases}$$

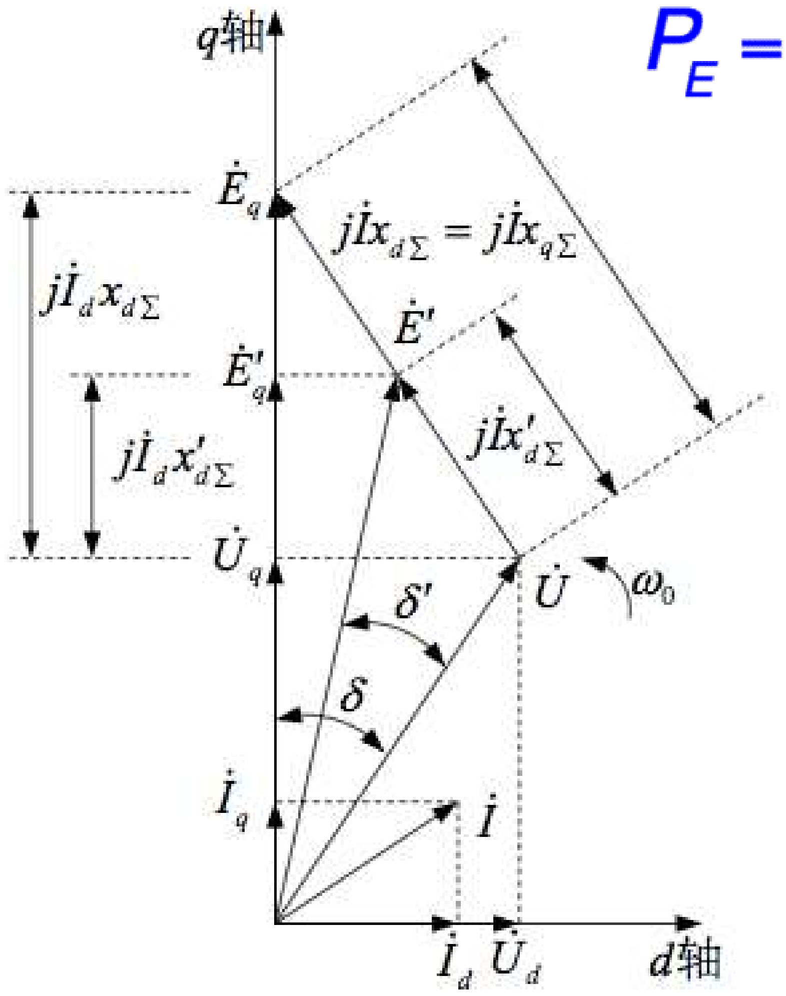
得到

$$P_E = U_d I_d + U_q I_q = U_d \frac{E_q - U_q}{x_{d\Sigma}} + U_q \frac{U_d}{x_{d\Sigma}}$$

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

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

用E_q表示隐极机电磁功率



$$P_E = \frac{E_q U_d}{x_{d\Sigma}}$$

由图可知，$U_d = U\sin\delta$

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

描述了发电机电磁功率和转子角的关系，称为用发电机空载电势和同步电抗表示的**发电机功角特性**，也叫发电机功角关系式。

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。**

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

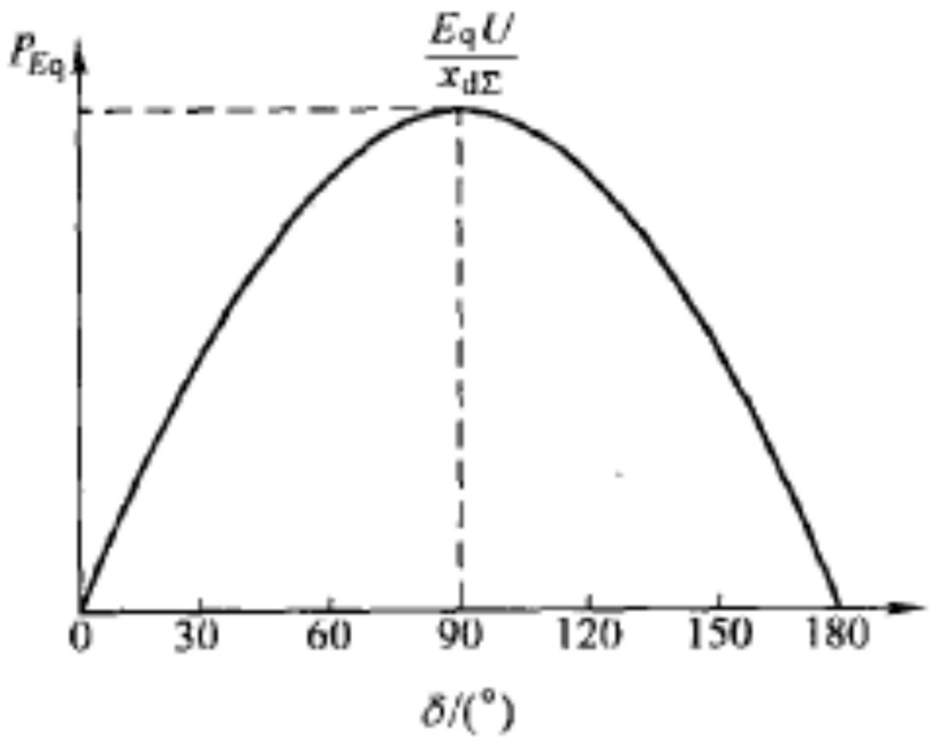
证明?

$$\dot{S}_{12} = \dot{U}_1 I_1^* = U_1 \left(\frac{U_1 - (U_2 \cos\delta_{12} - jU_2 \sin\delta_{12})}{jx_{12}} \right)^* = \frac{U_1 U_2 \sin\delta_{12}}{x_{12}} + jU_1 \left(\frac{U_1 - U_2 \cos\delta_{12}}{x_{12}} \right)$$

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

E_q和U为常数时的隐极机功角特性曲线

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



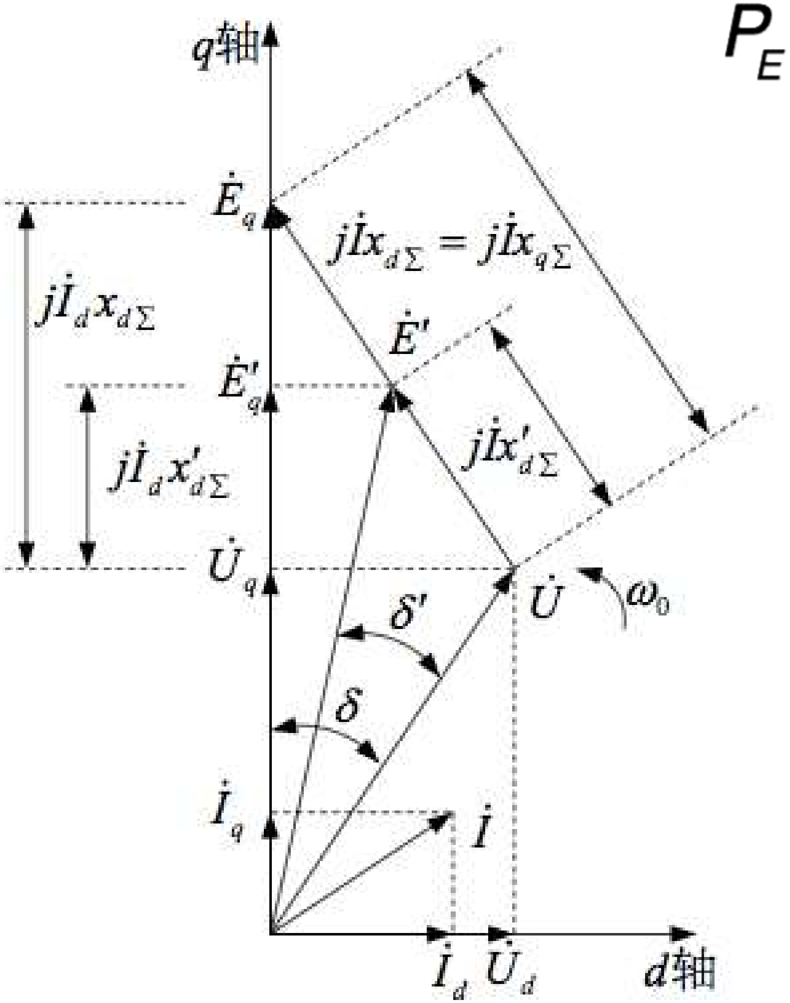
对于隐极机，当发电机空载电势恒定时，在功角为90度时达到功率极限。

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

Eq为常数时，有功功率和功角δ的关系曲线为一正弦曲线。

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

用E'$_q$表示隐极机电磁功率



$$P_E = U_d I_d + U_q I_q \Rightarrow P_E = f\left(E'_q, U, \delta\right)$$

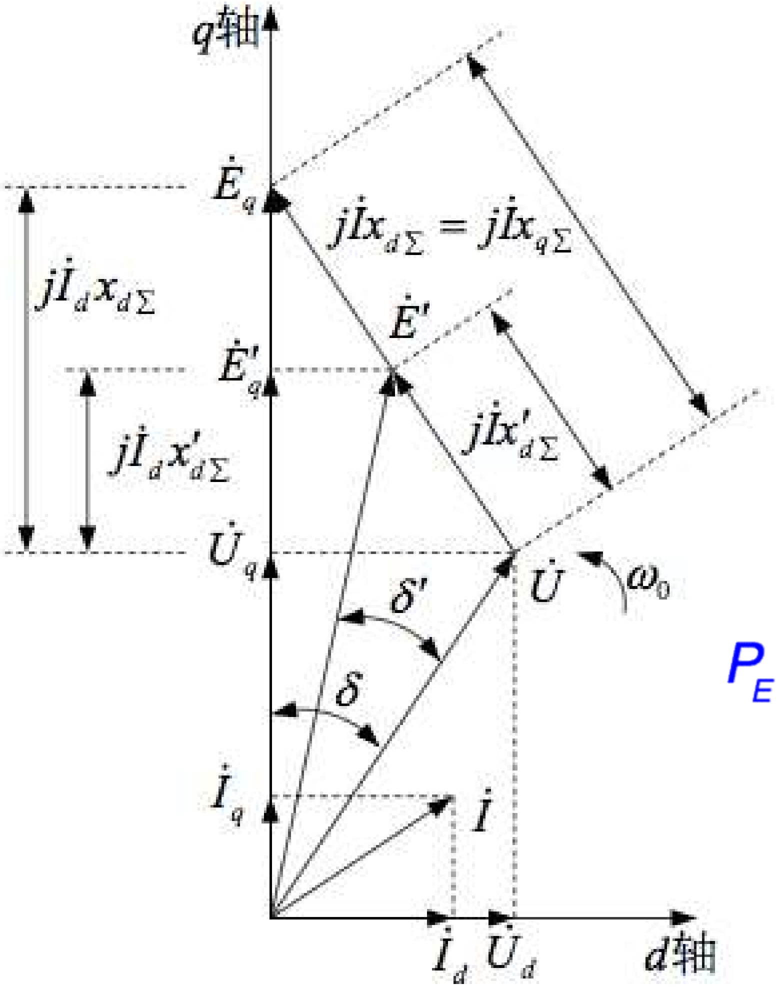
代入

由图可知

$$\begin{cases} E'_q = U_q + I_d x'_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q x_{d\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \dfrac{E'_q - U_q}{x'_{d\Sigma}} \\ I_q = \dfrac{U_d}{x_{d\Sigma}} \end{cases}$$

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

用E'$_q$表示隐极机电磁功率



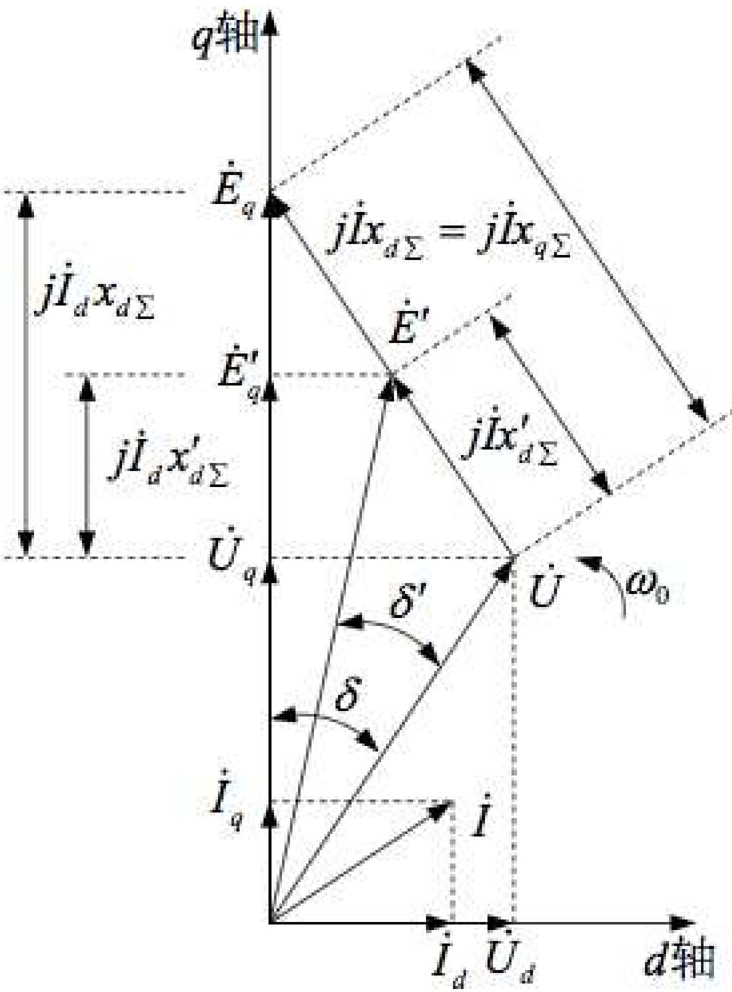
$$\begin{cases} E'_q = U_q + I_d x'_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q x_{d\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_d = \dfrac{E'_q - U_q}{x'_{d\Sigma}} \\ I_q = \dfrac{U_d}{x_{d\Sigma}} \end{cases}$$

得到

$$P_E = U_d \frac{E'_q - U_q}{x'_{d\Sigma}} + U_q \frac{U_d}{x_{d\Sigma}} = \frac{E'_q U_d}{x'_{d\Sigma}} - \frac{U_q U_d}{x'_{d\Sigma}} + \frac{U_q U_d}{x_{d\Sigma}}$$

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

用E'_q表示隐极机电磁功率



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

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

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

由于暂态电抗与同步电抗不相等，出现了一个按两倍功角正弦变化的功率分量，称为暂态磁阻功率。

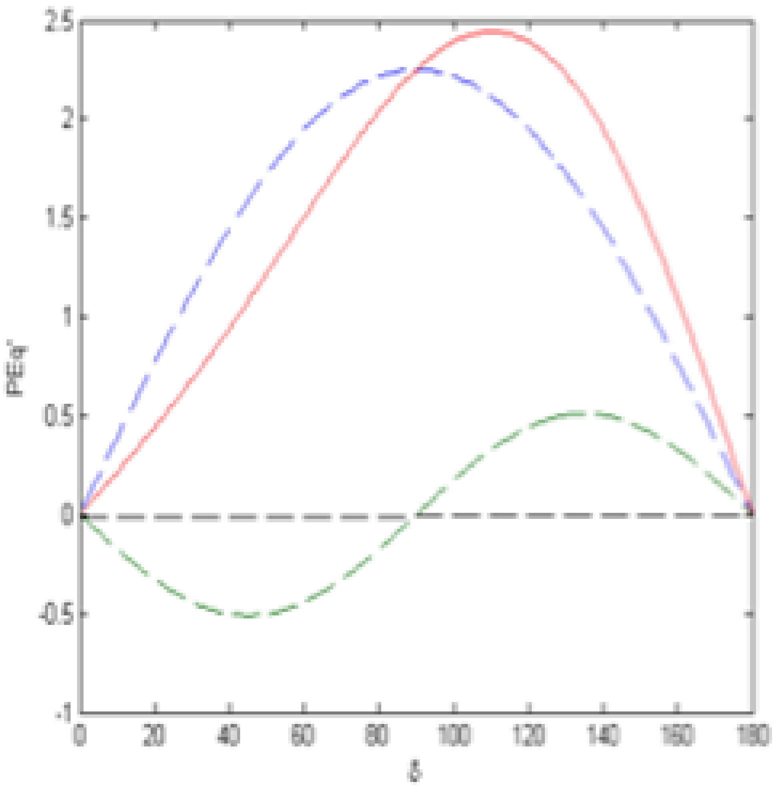
用E'$_q$表示隐极机电磁功率

$$P_E=\frac{E'_qU}{x'_{d\Sigma}}\sin\delta-\underbrace{\frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x'_{d\Sigma}}-\frac{1}{x_{d\Sigma}}\right)\sin 2\delta}_{\text{暂态磁阻功率}}$$

- 由于暂态电抗与同步电抗不相等，出现了一个按两倍功角正弦变化的功率分量，称为暂态磁阻功率。
- 由于它的存在，功角特性曲线发生畸变。
- 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。

E'_q和U为常数时的功角特性曲线

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



- 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**。

E'_q为常数时的工程近似处理

- 由于E'_q必须通过q、d轴的分别计算才能得到，在近似工程计算中采取工程近似处理。
  - 提问：E’q的计算过程

- 在工程上，对精度的要求不高，但要求能够方便快速的进行估算，因此用x'_d后的电动势E’代替E'_q。

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

- 可直接应用之前的推论
  - 提问：什么推论？

（P121页式4-21有误）

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

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

$$x_e = x_T + x_L$$

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

隐极机三种表示方式的功角特性比较

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

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

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

Eq和E’q的关系？（黑板推导）

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

能得到什么信息？

隐极机三种表示方式的功角特性比较

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

大于零，且随着转子角增大而减小

Eq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°～90°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

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

Eq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**
- **原因**
  - **随着δ的增大维持E'_q不变，意味着随着δ增大E_q增大**
  - **U_G为恒定时，说明励磁作用的更为明显**

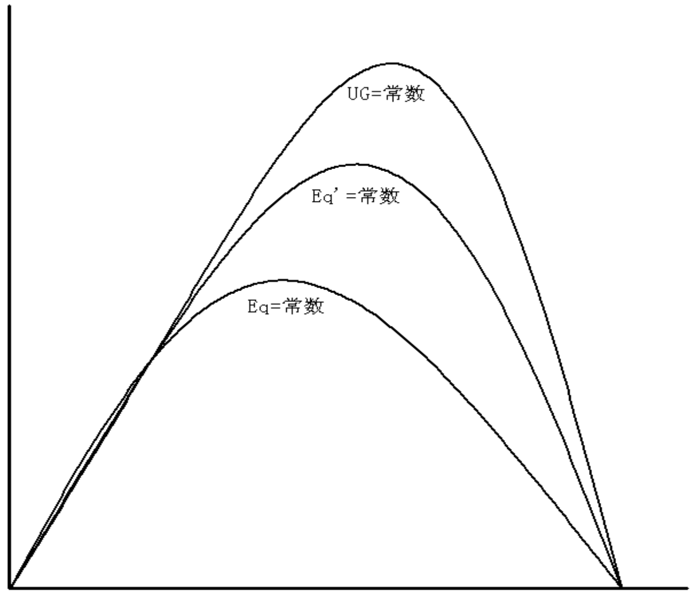
隐极机三种表示方式的功角特性比较

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

Eq为常数时

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

- **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，如何理解？**



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**。

复习本节内容

发布随堂测验5试卷
8分钟

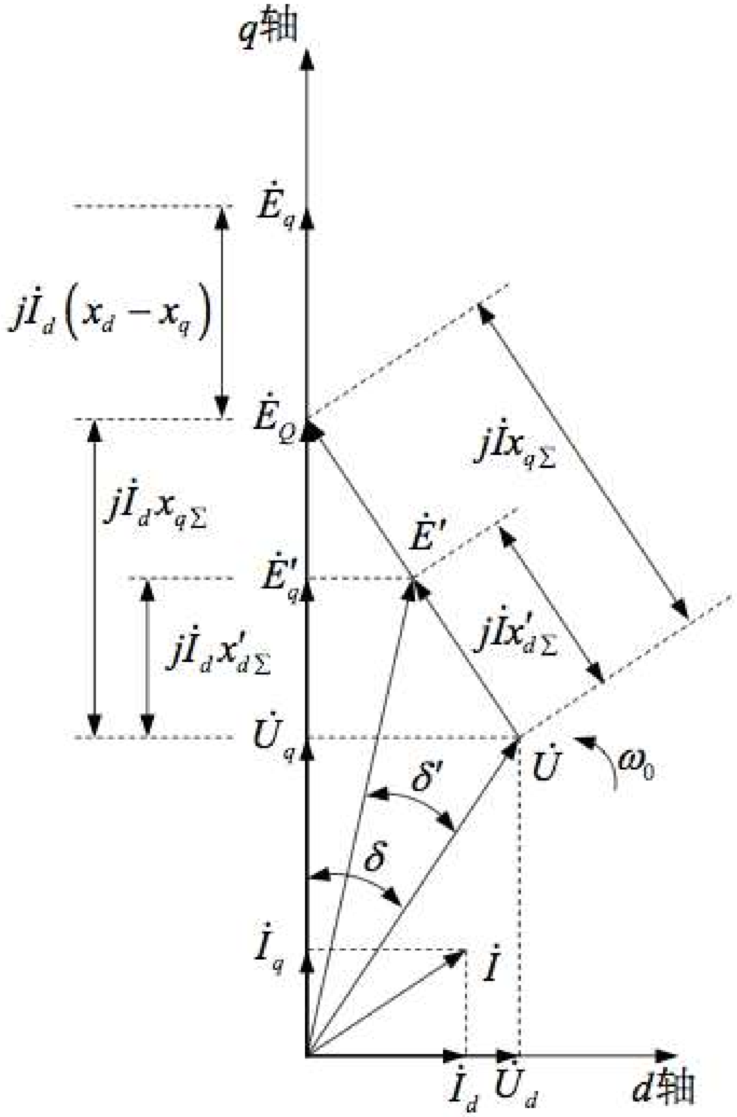
第四次作业（功角特性方程）

1： 已知一汽轮发电机的惯性时间常数$T_J=10s$。若运行在输出额定功率状态，在t=0时其出口断路器突然断开，试计算（不计调速器的作用，忽略阻尼）：

- 经过多少时间其相对电角度（功角）$\delta=\delta_0+\pi$（δ_0为断开前的值）。
- 在该时刻转子的电角速度ω。
- 计算该时刻转子的转速。

2： 其中单机无穷大母线电压为U=1，功率因数为0.98，发电机输出功率为1.0，单条线路电抗0.8。变压器电抗0.4。假设发电机为隐极机，同步电抗为1.0，暂态电抗为0.3。试计算：发电机的内电势E_q，绘制当E_q为常数时发电机的功率特性曲线，发电机暂态电势E'_q，绘制当E'_q为常数时发电机的功率特性曲线。

用E_q表示凸极机电磁功率



由图可知

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

代入

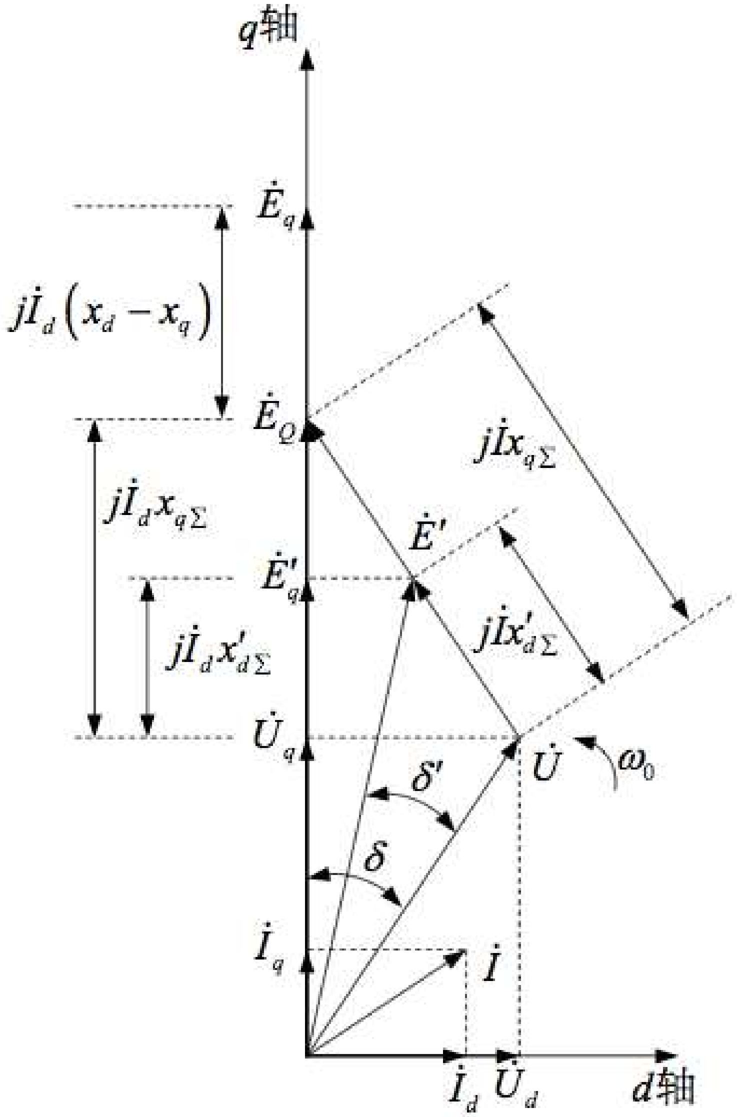
$$P_E = U_d I_d + U_q I_q$$

xd和xq不相等

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

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

用E_q表示凸极机电磁功率



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

$$= \frac{E_qU_d}{x_{d\Sigma}} + U_dU_q\left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}}\right)$$

由图可知， $U_q = U\cos\delta$

$U_d = U\sin\delta$

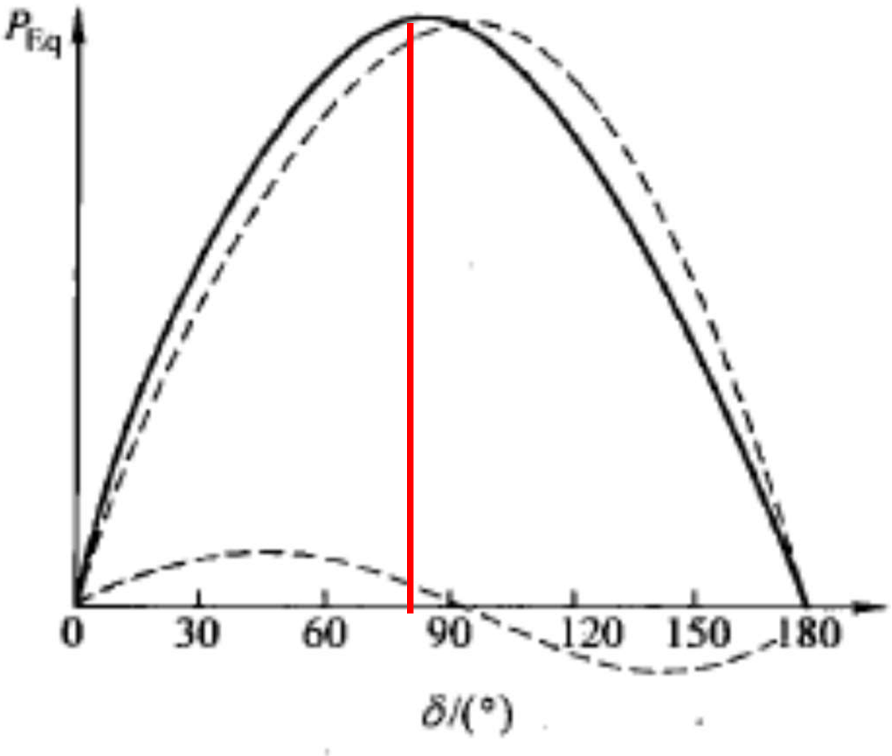
得到

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

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。

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn