



电机与拖动**课件**之七

同步电机及同步电动机 的电力拖动

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

6.1 同步电机的基本工作原理与结构

6.2 同步发电机的空载运行

6.3 同步发电机的电枢反应

6.4 同步发电机的负载运行

6.5 同步发电机的并联运行

6.6 同步电动机和同步调相机

6.7 同步电动机的电力拖动

并联运行的含义

➤ 将两台或更多台发电机分别接在电力系统对应母线上，或通过变压器、输电线接在电力系统的公共母线上，共同向负荷供电。

为什么要并联？

- 1、提高供电的可靠性；
- 2、提高供电的经济性；
- 3、提高电能的质量。

无穷大电网的含义

$$S \Rightarrow \infty$$

$$U_c = C$$

$$f_c = C$$

$$Z_c \Rightarrow 0$$

并联条件

- 1.待并发电机的电压与电网电压大小、相位要相同，即 $\dot{U}_g = \dot{U}_s$
- 2.待并发电机电压频率与电网电压频率相同，即 $f_g = f_s$
- 3.发电机和电网的电压波形相同，均为正弦波；
- 4.待并发电机与电网的相序相同。

不满足任一条件的并列称为非同期并列，将对电机产生严重的危害。



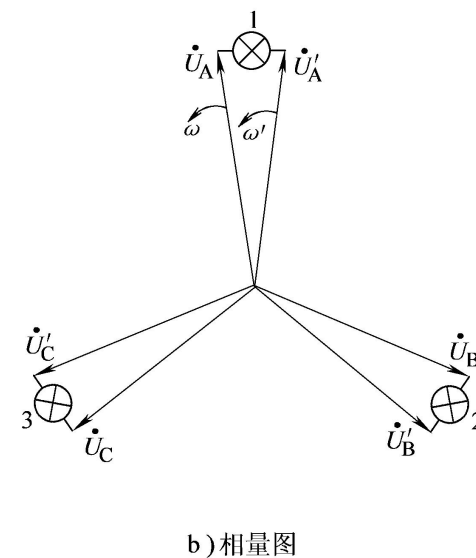
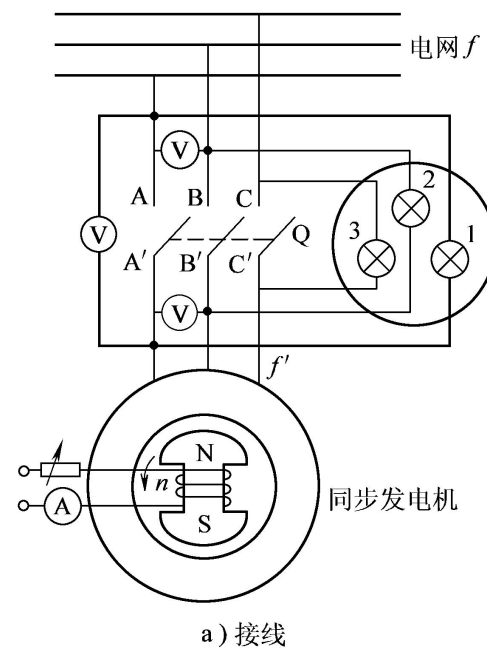
同期过程

- 将发电机并网的过程称为**同期过程**；
- 同期的方法有两种，即**准同期法**和**自同期法**。

一、准同期法

1、直接接法（暗灯法）

- （灯光熄灭法，暗灯法）：在发电机和电网相序相同，电压调整到和电网电压相等、但频率还有差别时。



$$\Delta u_A = u_A - u_{A'} = U \sin(\omega_1 t + \varphi_1) - U \sin(\omega_2 t + \varphi_2) = 2U \sin\left[\frac{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)}{2}\right] \cos\left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right]$$

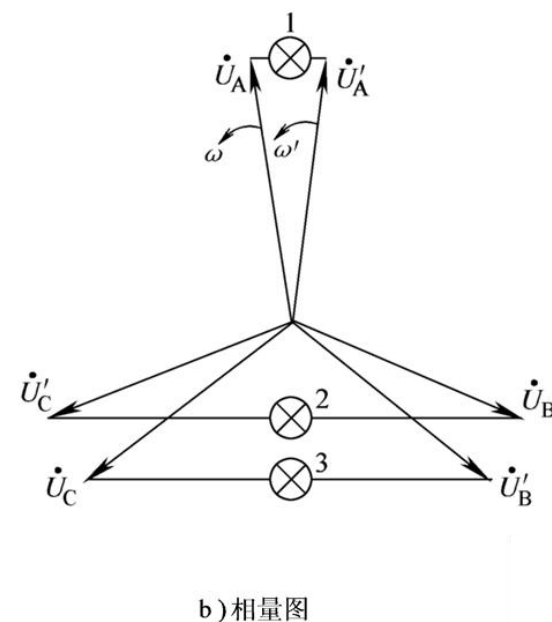
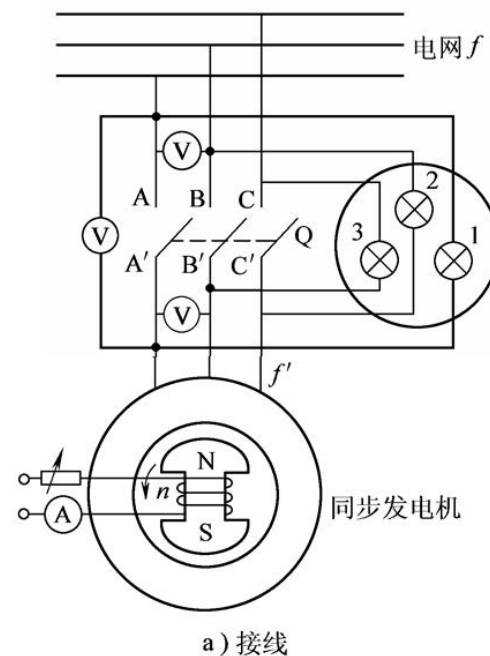


一、准同期法

2、交叉接法（旋灯法）

➤ 当调节发电机的转速，使灯光旋转的速度很低时，就可准备合闸。

$$\begin{aligned}\Delta u_1 &= u_A - u_{A'} = U \sin(\omega_1 t + \varphi_1) - U \sin(\omega_2 t + \varphi_2) = \\ &2U \sin\left[\frac{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)}{2}\right] \cos\left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right] \\ \Delta u_2 &= u_B - u_{C'} = U \sin(\omega_1 t + \varphi_1 - 120^\circ) - U \sin(\omega_2 t + \varphi_2 + 120^\circ) = \\ &2U \sin\left[\frac{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)}{2} - 120^\circ\right] \cos\left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right] \\ \Delta u_3 &= u_C - u_{B'} = U \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + 120^\circ) - U \sin(\omega_2 t + \varphi_2 - 120^\circ) = \\ &2U \sin\left[\frac{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)}{2} + 120^\circ\right] \cos\left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right]\end{aligned}$$



二、自同期法

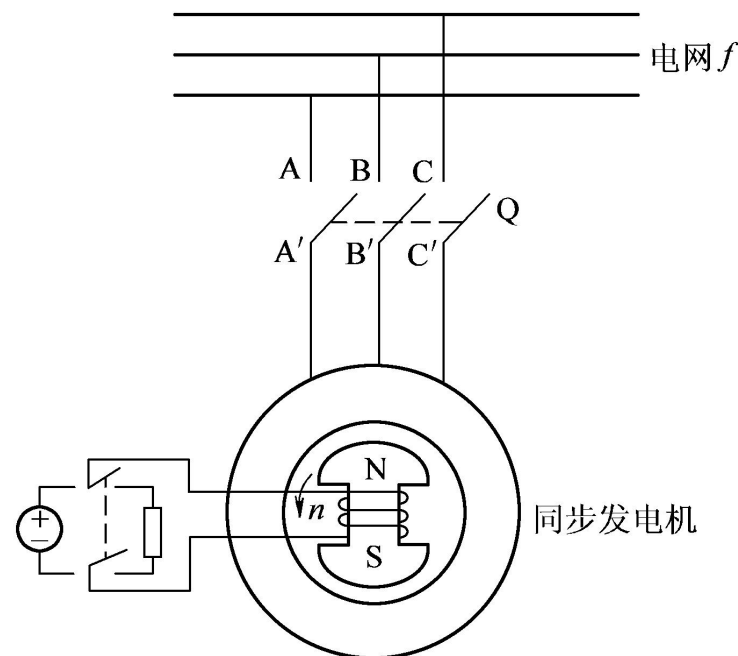
➤ 借助于合闸后电机的自整步作用拉入同步

➤ 步骤：

- (1) 校验发电机的相序；
- (2) 励磁绕组经限流电阻短路；
- (3) 发电机的转速接近同步速；
- (4) 并网；
- (5) 加励磁电流。

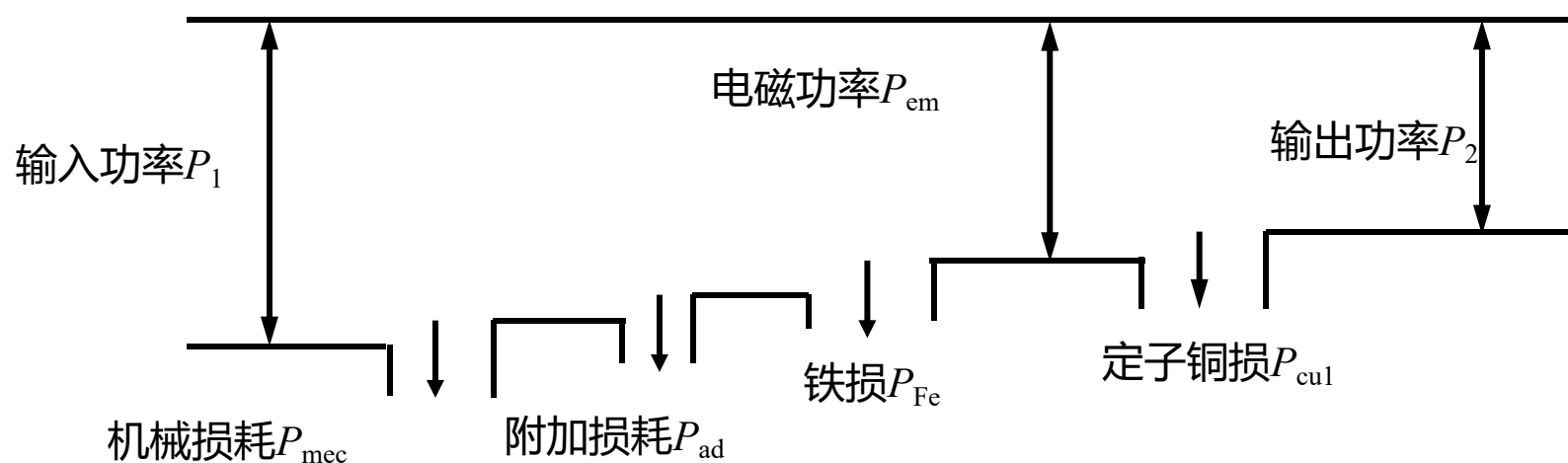
➤ 优缺点：

自同期法的优点是操作简单，并且迅速。缺点是合闸及加入励磁时有电流冲击，普遍用于事故状态下的并网操作。



➤ 一台同步发电机并入电网后，必须向电网输送功率，并根据电力系统的需要随时进行调节，以满足电网中负载变化的需要。为了弄清有功功率的调节，首先必须研究电机的功率平衡关系和功角特性。

一、功率和转矩平衡



同步发电机的功率流程图

$$P_1 = P_2 + \sum P$$

$$\sum P = P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad} + P_{Cu1}$$

$$P_{em} = P_2 + P_{Cu1}$$

$$P_{em} = P_1 - (P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}) = P_1 - P_0$$



一、功率和转矩平衡

➤ 在 $P_{em} = P_1 - P_0$ 两边同时除以同步机械角速度 $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$

$$\frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{P_1}{\Omega_1} - \frac{P_0}{\Omega_1}$$

可得转矩平衡方程为 $T_{em} = T_1 - T_0$ 或 $T_1 = T_{em} + T_0$

➤ 上式说明，电机稳定运行时，驱动性质的原动机转矩与制动性质的电磁转矩和空载转矩之和平衡。

$$T_1 = \frac{P_1}{\Omega_1}$$

原动机转矩，为驱动转矩

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1}$$

电磁转矩，为制动转矩

$$T_0 = \frac{P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}}{\Omega_1}$$

空载转矩，为制动转矩



二、功角特性

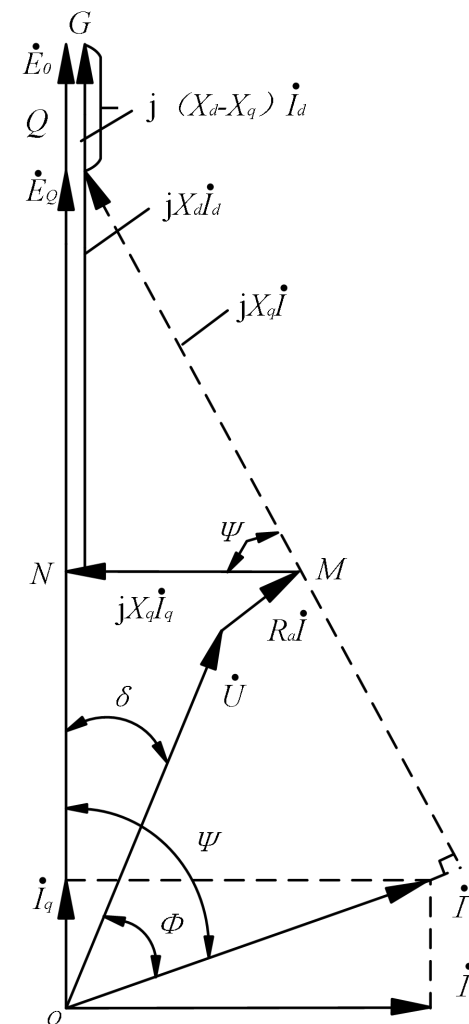
对凸极电机，若忽略电枢绕组电阻，则电磁功率等于输出功率。

$$P_{em} \approx P_2 = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi - \delta) = mUI (\cos \psi \cos \delta + \sin \psi \sin \delta) \\ = mI_q U \cos \delta + mI_d U \sin \delta$$

$$\text{又: } \begin{cases} I_q = \frac{U \sin \delta}{X_q} \\ I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} \end{cases} \quad \text{则: } P_{em} \approx P_2 = mUI \cos \varphi = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

其中, $m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$ 称为**基本的电磁功率**, $m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$ 称为**附加电磁功率**。

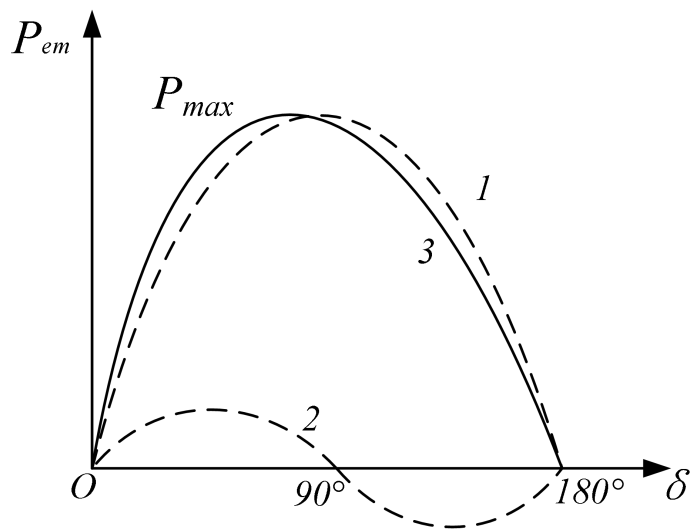
对隐极电机, 因为 $X_d = X_q = X_t$, 则附加电磁功率为零, 则电磁功率为: $P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_t} \sin \delta$



可知：当电网电压 U 和频率 f 恒定，参数 X_d 和 X_q 为常数，励磁电动势 E_0 不变(即 I_f 不变)时，同步发电机的电磁功率只决定于 \dot{E}_0 和 \dot{U} 的夹角 δ 。 δ 称为**功率角**（简称**功角**），称 $P_{em}=f(\delta)$ 为同步电机的**功角特性**。



二、功角特性



(a) 凸极机

水轮发电机的功角特性特性

$$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

水轮发电机的有功功率功角特性分两部分:

$$P'_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta - \text{基本电磁功率}$$

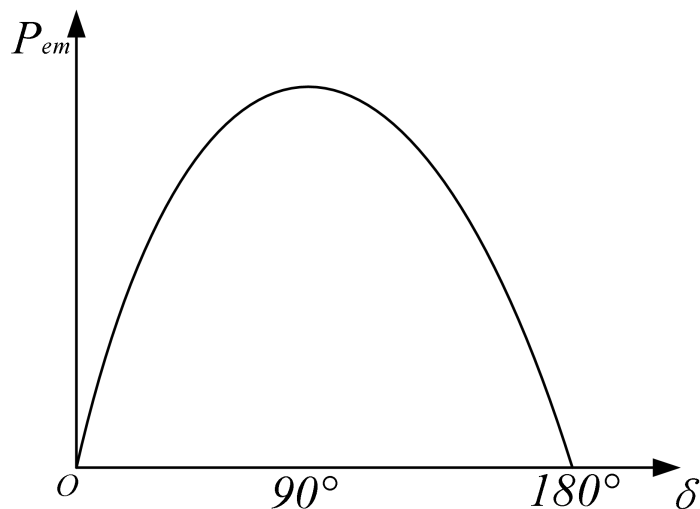
$$P''_{em} = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta - \text{附加电磁功率}$$

附加电磁功率的特点:

- $\delta=45^\circ$ 时附加电磁功率最大;
- 附加电磁功率与 E_0 无关;
- 附加电磁功率是由于 $X_d \neq X_q$ 产生的;



二、功角特性



(b) 隐极机

汽轮发电机的功角特性曲线

$$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_t} \sin \delta$$

汽轮发电机的有功功率角特性的特点:

➤ 1) 电磁功率 P_{em} 与功角 δ 的正弦函数 $\sin\delta$ 成正比;

➤ 2) 当 $\delta = 90^\circ$ 时, 功率达到极限值

$$P_{em \max} = \frac{m E_0 U}{X_t};$$

➤ 3) $\delta > 180^\circ$ 时, P_{em} 为负值, 电机转为电动机运行。



三、矩角特性

把功角特性表达式除以同步角速度 $\Omega_1 = 2\pi \frac{n_1}{60}$ ，就得到电磁转矩与功率角 δ 之间的关系，称为矩角特性，记为 $T_{em}=f(\delta)$ 。

凸极机的矩角特性：
$$T_{em} = m \frac{E_0 U}{\Omega_1 X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

隐极机的矩角特性：
$$T_{em} = m \frac{E_0 U}{\Omega_1 X_t} \sin \delta$$



四、功率角的含义

功率角 δ 的双重含义:

- (1) 它是空载电动势 \dot{E}_0 与发电机端电压 \dot{U} 之间的时间相位角;
- (2) δ 是 $\dot{\Phi}_0$ 和 $\dot{\Phi}_u$ 之间的夹角, 即转子磁极与定子等效假想合成磁极之间的空间夹角。

沿着转子旋转方向, 对功角的正、负作如下规定:

E_0 超前 U , 功率角 δ 为正 \rightarrow 说明 F_f 超前 F_u , 电磁功率 P_{em} 为正, 输出有功功率, 工作于发电机状态;
 E_0 滞后 U , 功率角 δ 为负 $\rightarrow F_f$ 滞后 F_u , 电磁功率 P_{em} 为负, 从电网吸收有功功率, 工作于电动机状态。

说明转子运动的空间位置

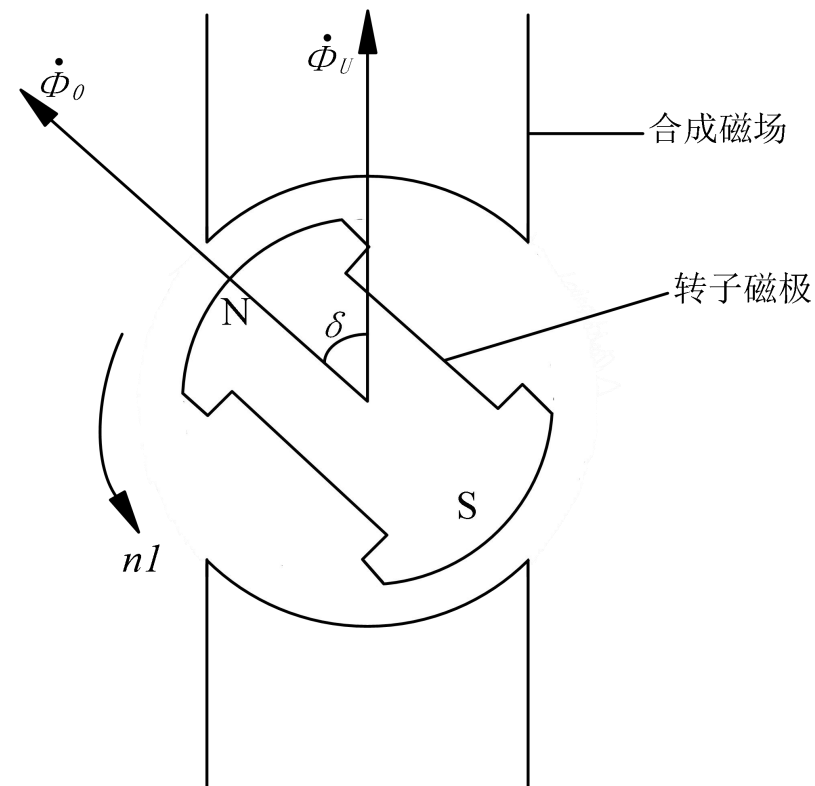
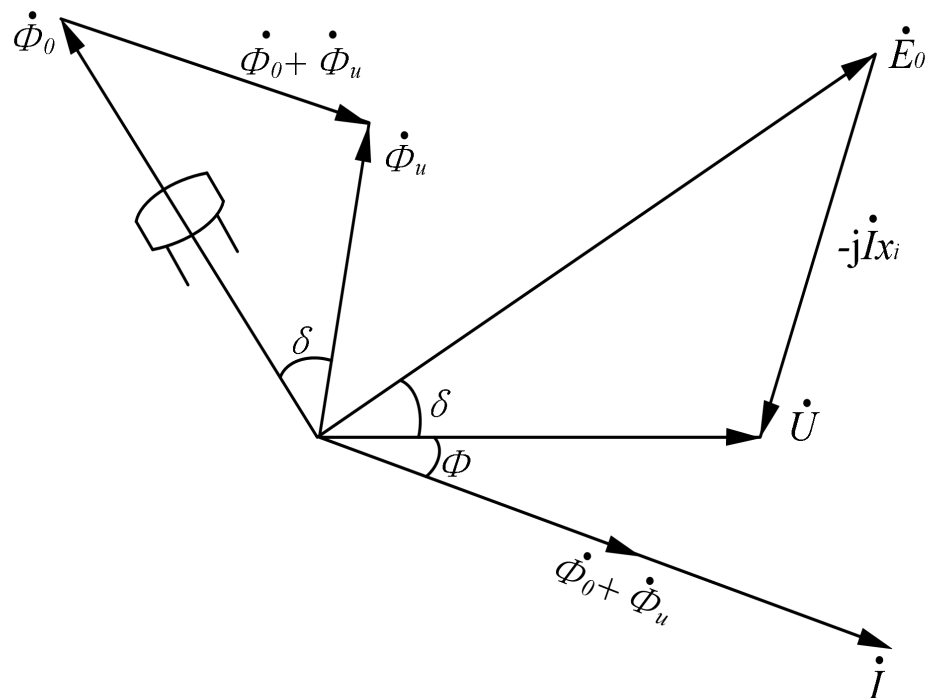
决定并联运行时的输出功率

把电磁变化关系和机械运动联系起来



四、功率角的含义

用图示功角的双重物理意义



由于 F_f 与 F_u 的空间相角差是由于电机中的**交轴电枢反应**引起的，也即只有电机中有交轴电枢反应存在，才会使气隙合成磁场偏离空载气隙磁场一个角度，**所以才有电磁功率**，从而实现机-电能量转换。而**直轴电枢反应仅仅在直轴位置改变磁场的大小，而不产生空间角的位移。故交轴电枢反应是实现机-电能量转换的关键。**



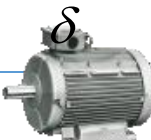
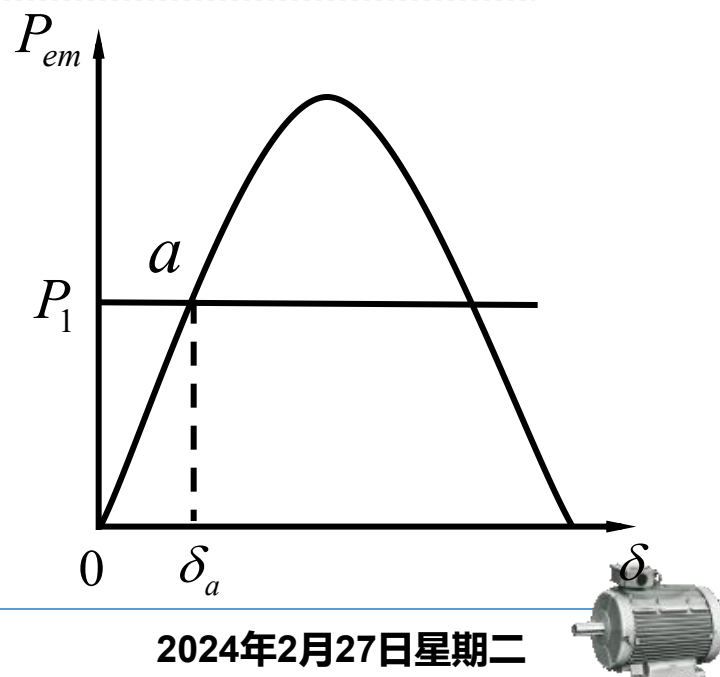
五、同步发电机有功功率的调节

为简化分析，设已并网的发电机为**隐极电机**，忽略磁路饱和影响和电枢电阻，设电网电压和频率为常数，即认为发电机与“无穷大电网”并联。

➤ 发电机空载运行时，原动机输入功率用来平衡各种损耗，此时 $\delta=0^\circ$ ，定、转子磁极轴线重合，它们之间只有径向力而无切向力，所以 $P_{em}=0$ ，在功角特性的0点上。

增大原动转矩（开大汽门），发电机输入功率 P_1 增大， $T_1 > T_{em}$ ， δ 逐渐变大，输出功率 P_{em} 和电磁转矩 T_{em} 逐渐增大，直到 $T_1 = T_{em}$ 为止，如图a点。

可见，并联于无穷大电网的同步发电机要调节有功功率输出，只需调节原动转矩。在功率极限角范围内，输入转矩越大，有功功率输出就越大。



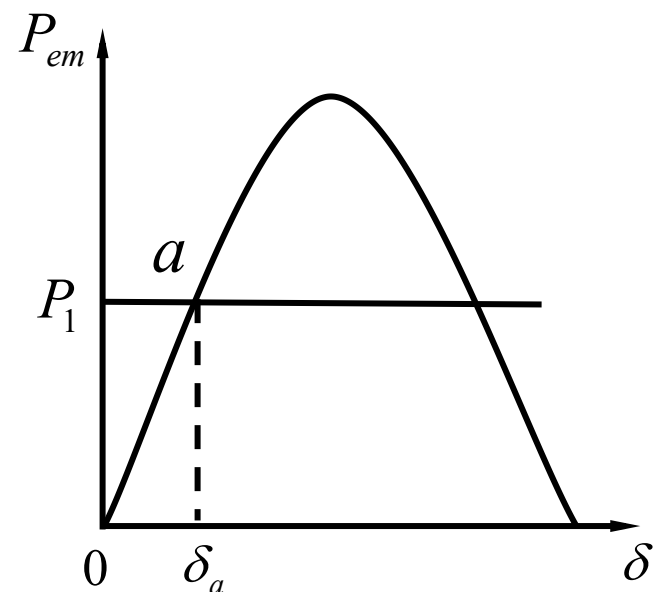
五、同步发电机有功功率的调节

如果不断地加大发电机的输入功率，是否就一定能使发电机稳定地输出电能呢？

发电容量除了受绕组的容量限制之外，主要还是受到“静态稳定”的限制。

当 $\delta > 90^\circ$

- 电磁功率将达到功率的极限值
- 若再增加输入，剩余功率将使转子继续加速
- δ 角继续增大，电磁功率反而减小
- 转速连续上升直至失步，或称为失去“静态稳定”



六、静态稳定的概念

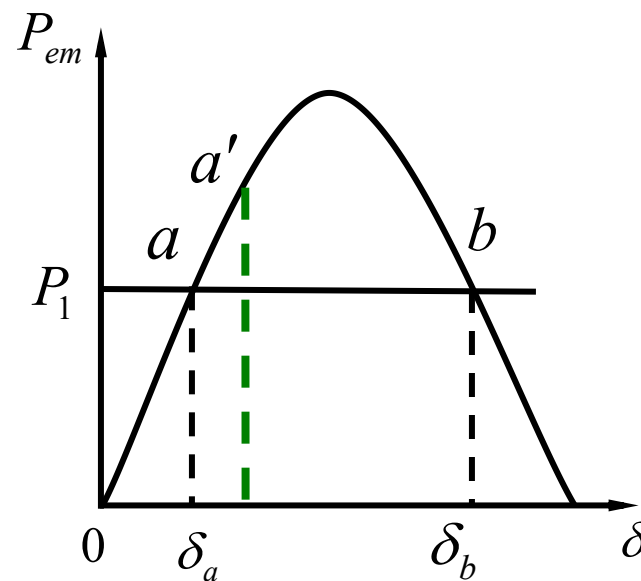
➤ **静态稳定**：指并联在电网上稳定运行的同步发电机，当受电网或原动机方面某些微小扰动时，能在这种干扰消失后，继续保持原来稳定运行状态的能力。

在 a 点运行时电机具有静态稳定的能力。

若干扰使功角 δ 增大到 a' 点， P_{em} 和 T_{em} 增大，迫使电机减速，功角 δ 变小，电机回到 a 点。

干扰使功角 δ 减小时，有同样结论。所以 a 点称为稳定运行点。

b 点为不稳定运行点，分析略。



六、静态稳定的概念

➤ 分析表明，在功角特性曲线的上升部分的工作点，都是静态稳定的，下降部分的工作点，都是静态不稳定的，为此静态稳定的条件用数学式表示为：

$$P_{\text{syn}} = \frac{dP_{em}}{d\delta} > 0$$

P_{syn} 是衡量同步发电机稳定运行能力的一个系数，称为**比整步功率**。

对于隐极机：
$$P_{\text{syn}} = \frac{dP_{em}}{d\delta} = m \frac{E_0 U}{X_d} \cos \delta$$

表明，在稳定区域内， δ 越小， P_{syn} 越大。

对于凸极机：
$$P_{\text{syn}} = \frac{dP_{em}}{d\delta} = m \frac{E_0 U}{X_d} \cos \delta + m U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta$$



七、过载能力

➤ 最大电磁功率与额定功率的比值称为**过载能力**，用 λ 表示。

$$\lambda = \frac{P_{em\ max}}{P_N}$$

汽轮发电机的过载能力

$$\lambda = \frac{P_{em\ max}}{P_N} = \frac{m \frac{E_0 U}{x_t}}{m \frac{E_0 U}{x_t} \sin \delta_N} = \frac{1}{\sin \delta_N}$$

一般要求 $\lambda > 1.7$ ，通常在1.7~3之间，与此时对应的发电机额定运行时的功角 δ_N 在 25° ~ 35°

过载能力越大，电机的稳定性越好。过载能力是表达静态稳定的能力，不是发电机可以过载的倍数。

过载能力设计得高一点，是从提高稳定性的角度考虑的。



一、无功功率功角特性

➤ 并联于无穷大电网的同步发电机当电网电压和频率恒定、参数 (x_d 、 x_q 、 x_t) 为常数、空载电势 E_0 不变 (即 I_f 不变) 时, $Q=f(\delta)$ 为无功功率功角特性。

水轮发电机无功功率的功角特性

$$Q = mUI \sin \varphi = m \frac{E_0 U}{x_d} \cos \delta - m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta$$

汽轮发电机无功功率的功角特性

$$Q = mUI \sin \varphi = m \frac{E_0 U}{x_t} \cos \delta - m \frac{U^2}{x_t}$$

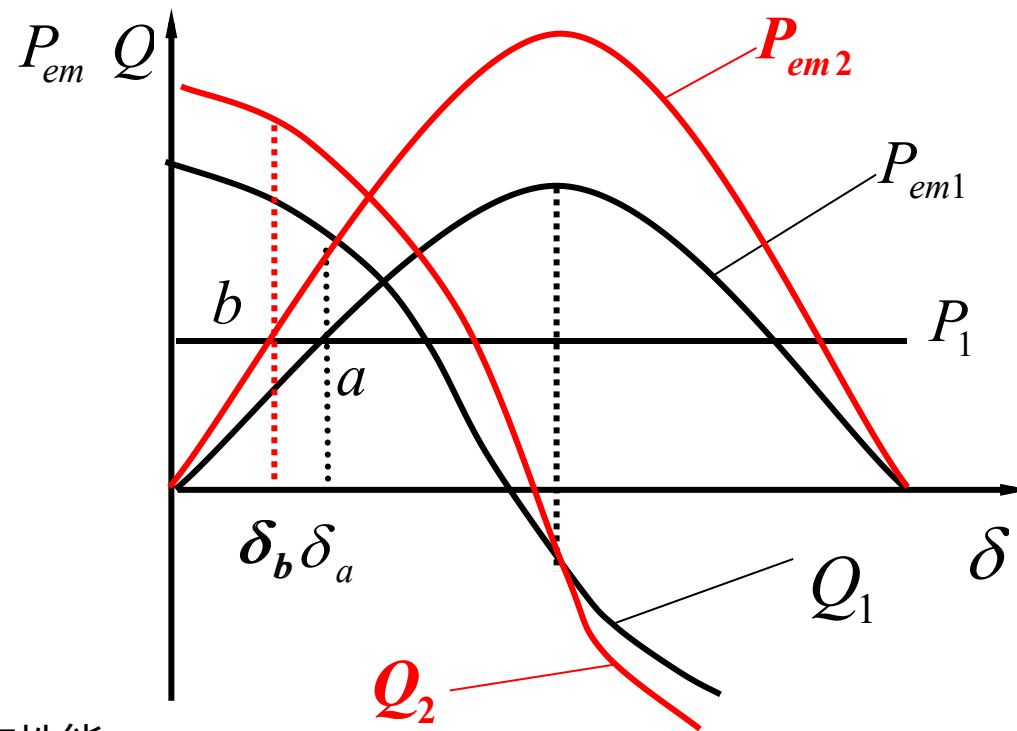


一、无功功率功角特性

➤ 从能量守恒观点看，并网运行的同步发电机调节无功功率，不需调节原动机来的输入功率，只需改变励磁电流。

调节 I_f 前， $P_{em}=P_{ema}$ ， $Q=Q_a$ 。

调节 I_f 后， $P_{em}=P_{emb}=P_{ema}$ ， $Q=Q_b$ 。



- 调节 I_f 不影响发电机的有功功率输出，但影响电机的稳定性能。
- 调节无功时不影响有功功率的输出，但是调节有功时影响无功功率输出。



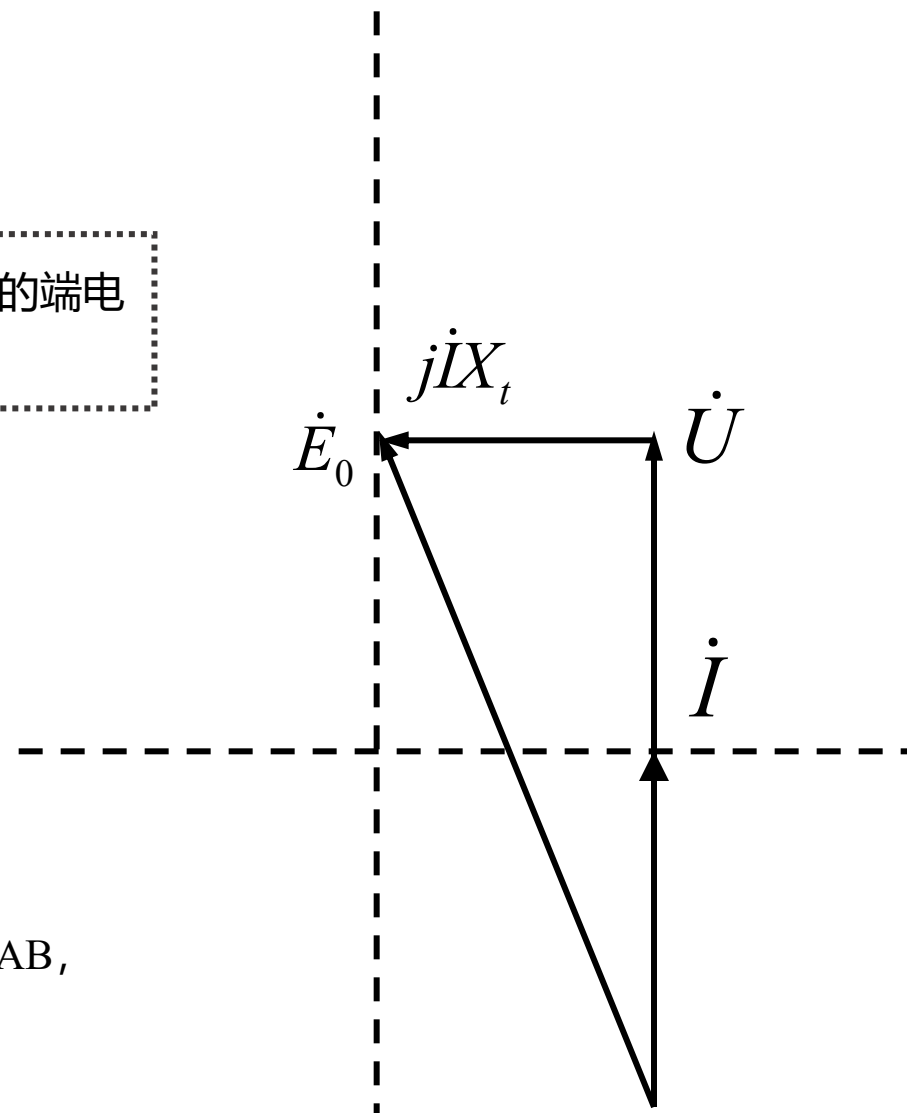
二、相量分析

以隐极式同步发电机为例，不计磁路饱和的影响，且忽略电枢电阻。当发电机的端电压恒定，在保持发电机输出的有功功率不变时，有

$$P_{em} = \frac{mE_0U}{X_t} \sin \delta = \text{常数} \quad \text{即: } E_0 \sin \delta = \text{常数}$$

$$\text{又: } P_2 = mUI \cos \varphi = \text{常数} \quad \text{即: } I \cos \varphi = \text{常数}$$

在输出恒定的有功功率时，若调节励磁电流，电动势相量 \dot{E}_0 端点的轨迹为直线AB，
电流相量 \dot{I} 端点的轨迹为直线CD。图中



二、相量分析

(1) 正常励磁情况下

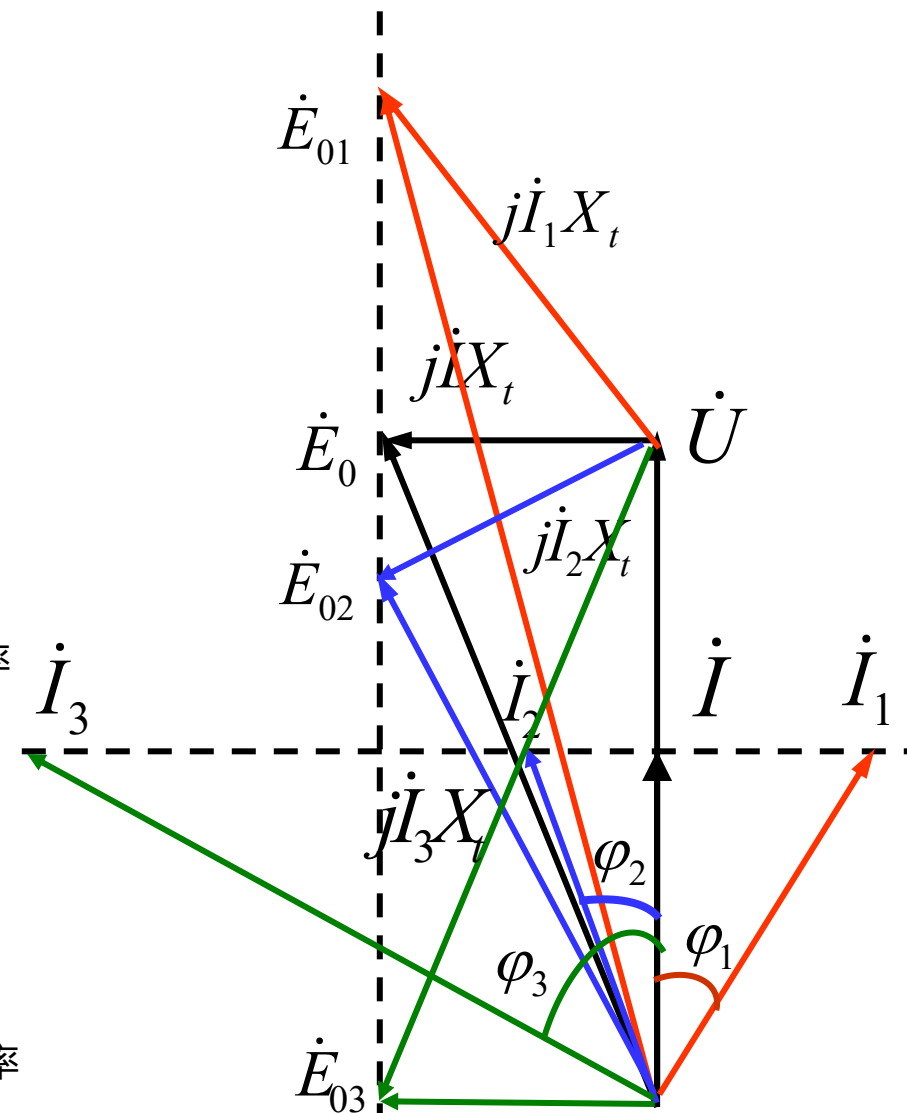
- $I_f = I_{fN}$
- \dot{E}_0 是功率因数为1 ($\varphi=0$) 时的空载电动势
- 此时电枢电流 i 全部为有功分量

(2) 过励磁条件下

- $I_f > I_{fN}$
- 此时励磁电动势 $\dot{E}_{01} > \dot{E}_0$
- 电枢电流 i_1 全除了有功电流 i 外, 还存在一个滞后的无功分量 i_r , 输出感应无功功率

(3) 欠励磁条件下

- $I_f < I_{fN}$
- 此时励磁电动势 $\dot{E}_{02} < \dot{E}_0$
- 电枢电流 i_2 全除了有功电流 i 外, 还存在一个超前的无功分量 i_{2r} , 输出容性无功功率



进一步减小励磁电流, \dot{E}_0 将更小, 功角将增大, 当 $\delta=90^\circ$ 时, 达到运行的极限。若再减小励磁电流, 发电机将失去同步。



三、V形曲线

➤ 并联于无穷大电网的同步发电机，保持有功功率不变时，电枢电流 I 和励磁电流 I_f 的关系曲线 $I = f(I_f)$ 称为“V”形曲线。

➤ 1. 每条曲线的最低点， $\cos\varphi=1$ ，定子电流最小，且全为有功电流，这些点的连线向右倾斜；

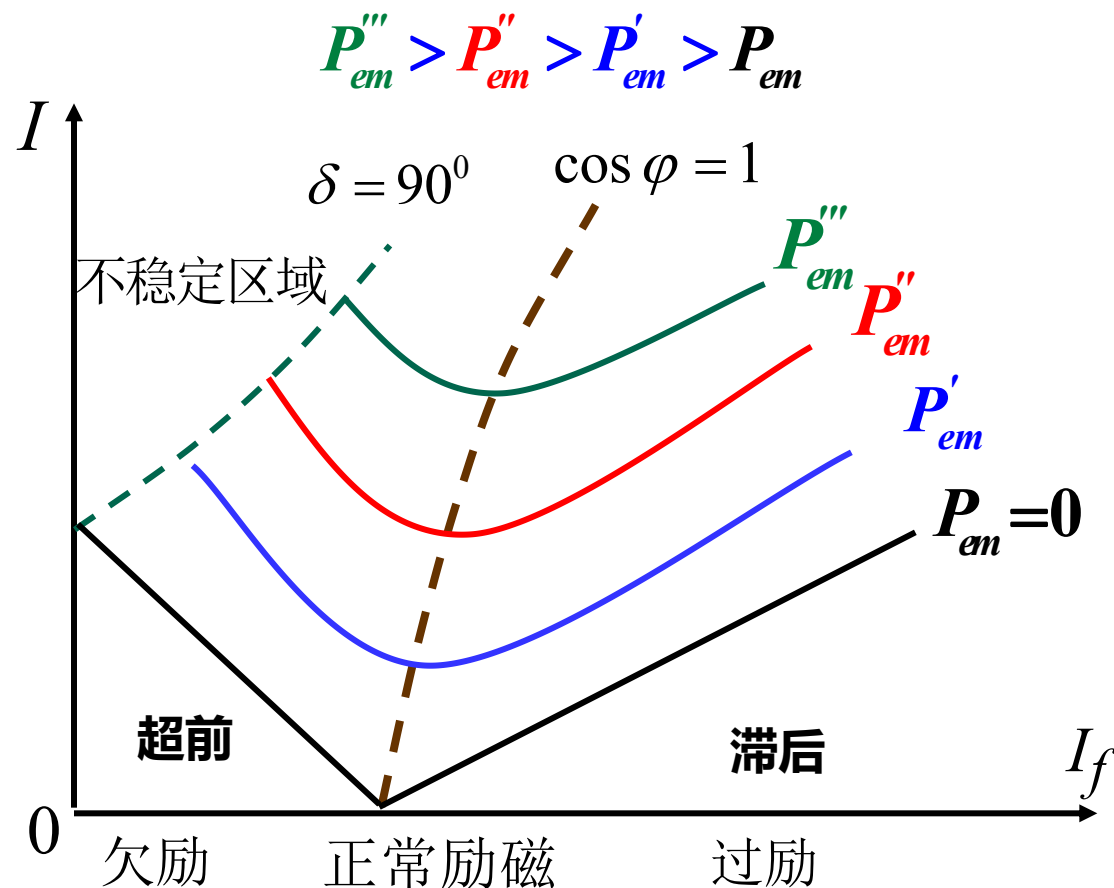
表明要输出纯有功功率，必须相应增加一些励磁电流。

➤ 2. 不稳定区域边缘： $\delta=90^\circ$ ，连线向右倾斜；

表明输出有功功率越多，维持稳定所需的励磁电流也越大。

➤ 3. 每条曲线上的电流变化量 ΔI 为无功分量；

➤ 4. 励磁电流从零开始增大时，定子电枢电流先减小后增大。



【例】 一台三相隐极同步发电机与无穷大电网并联运行，电网电压为380V，发电机定子绕组为Y联结，每相同步电抗 $X_t=1.2\Omega$ ，此发电机向电网输出线电流 $I=69.5\text{A}$ ，空载相电动势 $E_0=270\text{V}$ ， $\cos\varphi=0.8$ (滞后)。若减小励磁电流使相电动势 $E_0=250\text{V}$ ，保持原动机输入功率不变，设不计定子电阻，试求：(1) 改变励磁电流前发电机输出的有功功率和无功功率；(2) 改变励磁电流后发电机输出的有功功率、无功功率、功率因数及定子电流。

解：(1) 改变励磁电流前，输出的有功功率为 $P_2=3UI\cos\varphi=3\times 220\times 69.5\times 0.8\text{W}=36700\text{W}$

输出的无功功率为 $Q_2=3UI\sin\varphi=3\times 220\times 69.5\times 0.6\text{var}=27500\text{ var}$

(2) 改变励磁电流后因不计电阻，所以 $P_2=P_{\text{em}}=\frac{3E_0U}{X_t}\sin\delta$

$$\sin\delta=\frac{P_2X_t}{3E_0U}=\frac{36700\times 1.2}{3\times 250\times 220}=0.267 \quad \text{所以 } \delta=15.5^\circ$$



$$\psi = \arctan \frac{E_0 - U \cos \delta}{U \sin \delta} = \arctan \frac{250 - 220 \cos 15.5^\circ}{220 \times 0.267} = 33.6^\circ$$

$$\varphi' = \psi - \delta = 33.6^\circ - 15.4^\circ = 18.2^\circ$$

$$\cos \varphi' = \cos 18.2^\circ = 0.95$$

因为有功功率不变，即 $I \cos \varphi = I' \cos \varphi' = \text{常数}$ ，故改变励磁电流后，定子电流为

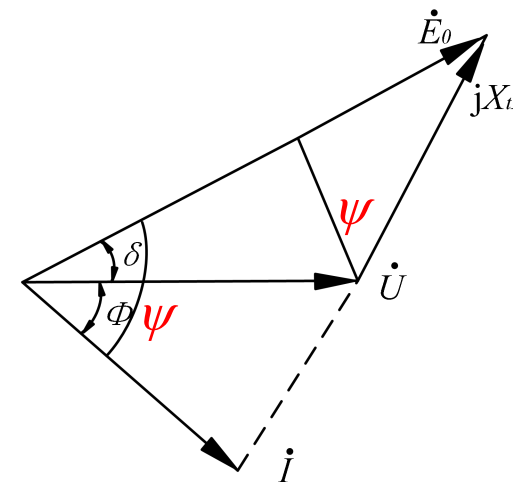
$$I' = \frac{I \cos \varphi}{\cos \varphi'} = \frac{69.5 \times 0.8}{0.95} \text{ A} = 58.5 \text{ A}$$

有功功率不变

$$P_2 = 36700 \text{ W}$$

向电网输出的无功功率为

$$Q = 3UI' \sin \varphi' = 3 \times 220 \times 58.3 \times \sin 18.2^\circ = 12000 \text{ W}$$



小结

同步电机 并联运行

1、并联运行的条件

(1)电压大小、相位要相同 $\dot{U}_g = \dot{U}_s$

(2)电压频率相同 $f_g = f_s$

(3)电压波形相同，均为正弦波

(4)相序相同

不满足任一条件的并列称为非同期

2、并联运行的方法

准同期法：直接接法（又称灯光熄灭法）和交叉接法（又称灯光旋转法）

自同期法：借助于合闸后电机的自整步作用拉入同步

3、有功功率特性及有功功率调节

功率和转矩平衡 $P_{em} = P_1 - (P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}) = P_1 - P_0$

$$T_1 = T_{em} + T_0$$

功角特性 $P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_t} \sin \delta$ 矩角特性 $T_{em} = m \frac{E_0 U}{\Omega_1 X_t} \sin \delta$

功率角的含义

4、无功功率特性及V形曲线

无功功率功角特性 $Q = mUI \sin \varphi = m \frac{E_0 U}{x_t} \cos \delta - m \frac{U^2}{x_t}$

V形曲线：电枢电流和励磁电流的关系

