

第十五章 同步发电机的并联运行

15-1 概述

15-2 并联合闸的条件与方法

15-3 同步发电机并联运行的理论基础

15-4 有功功率的调节和静态稳定

15-5 并联运行时无功功率的调节—V形曲线

小结

第十五章 同步发电机的并联运行

■基本要求:

- 1.掌握同步发电机并联合闸的条件
- 2.掌握同步发电机的功角特性和静态稳定的概念
- 3.掌握有功功率和无功功率的调节方法
- 4.理解V形曲线的物理意义

15-1 概述

1.同步发电机并联运行的优点

- (1) 提高了供电的经济性和灵活性。
- (2) 增加了供电的可靠性。
- (3) 提高了供电的质量。
- (4) 负载更均匀，提高了发电设备的利用率。
- (5) 发电厂布局更合理。

2.同步发电机并联到电网运行的运行条件

$$U_g = U_s \quad f_g = f_s$$

15-2 并联合闸的条件与方法

一、并联合闸的条件

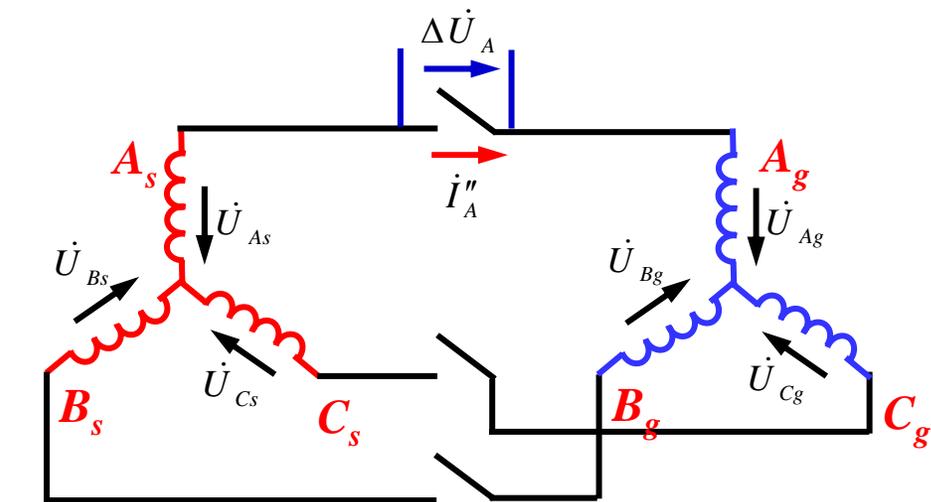
$$u_s = \sqrt{2}U_s \sin(\omega_s t + \theta_s)$$

$$= \sqrt{2}U_s \sin(2\pi f_s t + \theta_s)$$

$$u_g = \sqrt{2}U_g \sin(\omega_g t + \theta_g)$$

$$= \sqrt{2}U_g \sin(2\pi f_g t + \theta_g)$$

$$\Delta \dot{U}_A = \dot{U}_{As} - \dot{U}_{Ag}$$



等值于电网的发电机 将要并入的发电机

$$i''_A = \frac{\Delta \dot{U}_A}{Z''_s + Z''_g} = 0 \Rightarrow u_{As} = u_{Ag}$$

1.理想并联合闸的条件

- (1) 发电机的频率等于电网的频率；
- (2) 发电机的电压幅值等于电网电压的幅值，且波形一致；
- (3) 发电机的电压相序与电网的电压相序相同；
- (4) 在合闸时，发电机的电压相位与电网电压的相位一样。

2.投入并联的准备工作

- (1) **检查投入并联的条件：**通常用电压表测量电网电压，并调节发电机的励磁电流使得发电机的输出电压 $U_g=U_s$ 。
- (2) **确定合闸时刻：**借助同步指示器检查并调整频率和相位以确定合闸时刻。

二、准确同步法

准确同步法：将发电机调整到完全符合并联条件后才进行合闸并网操作的整步方法。

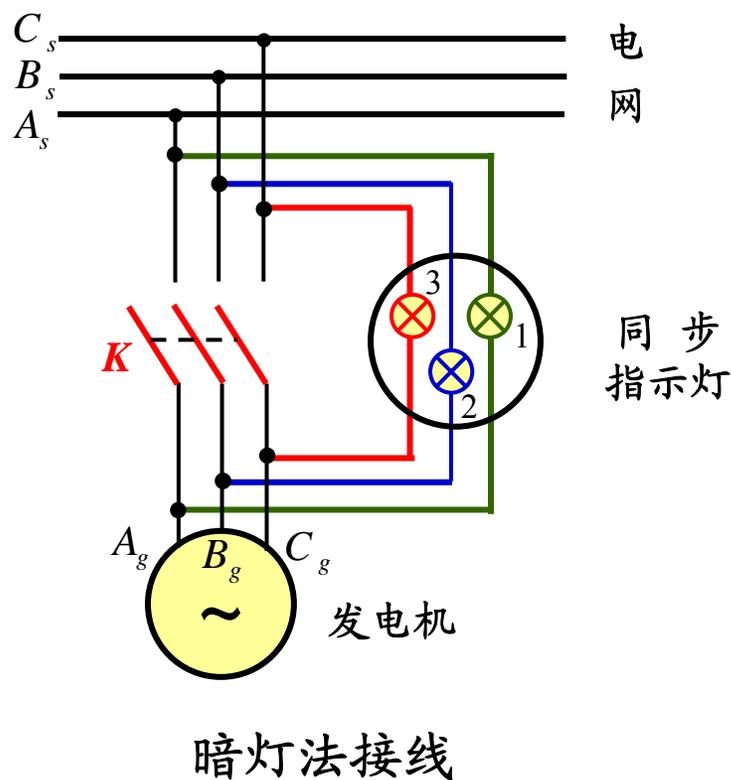
1.暗灯法

■ **接线特点：**在发电机和电网间对应相之间接入相灯。

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{A_s} - \dot{U}_{A_g}$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{B_s} - \dot{U}_{B_g}$$

$$\Delta \dot{U}_3 = \dot{U}_{C_s} - \dot{U}_{C_g}$$



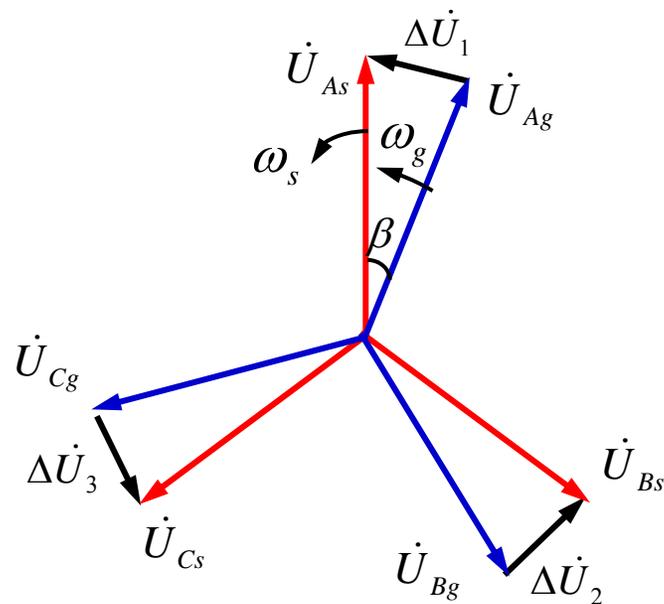
1) 并联条件不满足时的现象

① 频率不等

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{As} - \dot{U}_{Ag}$$

$$\beta = 0^\circ \sim 360^\circ$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = (0 \sim 2)U_s$$



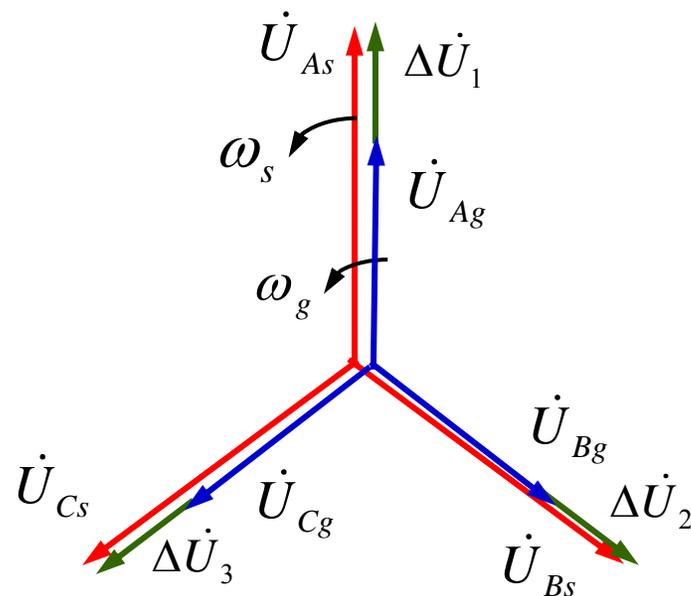
- 三个相灯将呈现同时暗、同时亮的交替变化现象。
- 通过调节原动机的转速可以改变发电机的频率。

② 电压不等

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{As} - \dot{U}_{Ag}$$

$$\Rightarrow \Delta U_1 = |U_{As} - U_{Ag}|$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = |U_s - U_g|$$



• 三个相灯在最亮和最暗范围内发光。

• 通过调节励磁电流可以改变发电机的端电压，使 $U_g = U_s$ 。

③相序不同

错接为： $A_s \sim A_g$ ； $B_s \sim C_g$ ； $C_s \sim B_g$

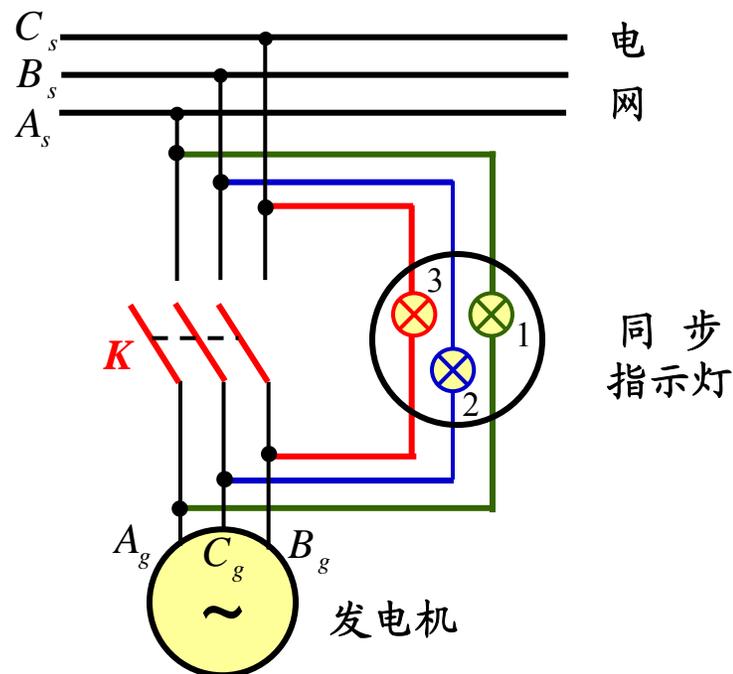
相灯承受的电压为：

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{As} - \dot{U}_{Ag}$$

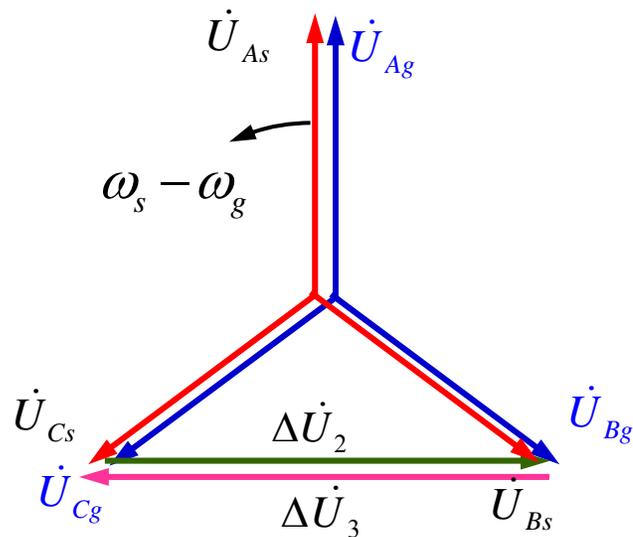
$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{Bs} - \dot{U}_{Cg}$$

$$\Delta \dot{U}_3 = \dot{U}_{Cs} - \dot{U}_{Bg}$$

相序不同时，三个相灯亮度不同。



相序不同时的暗灯法接线



如果 $U_s = U_g$, 但 $f_g < f_s$,

$$\beta = 0^\circ: \Delta U_1 = 0$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_3 = \sqrt{3}U_s$$

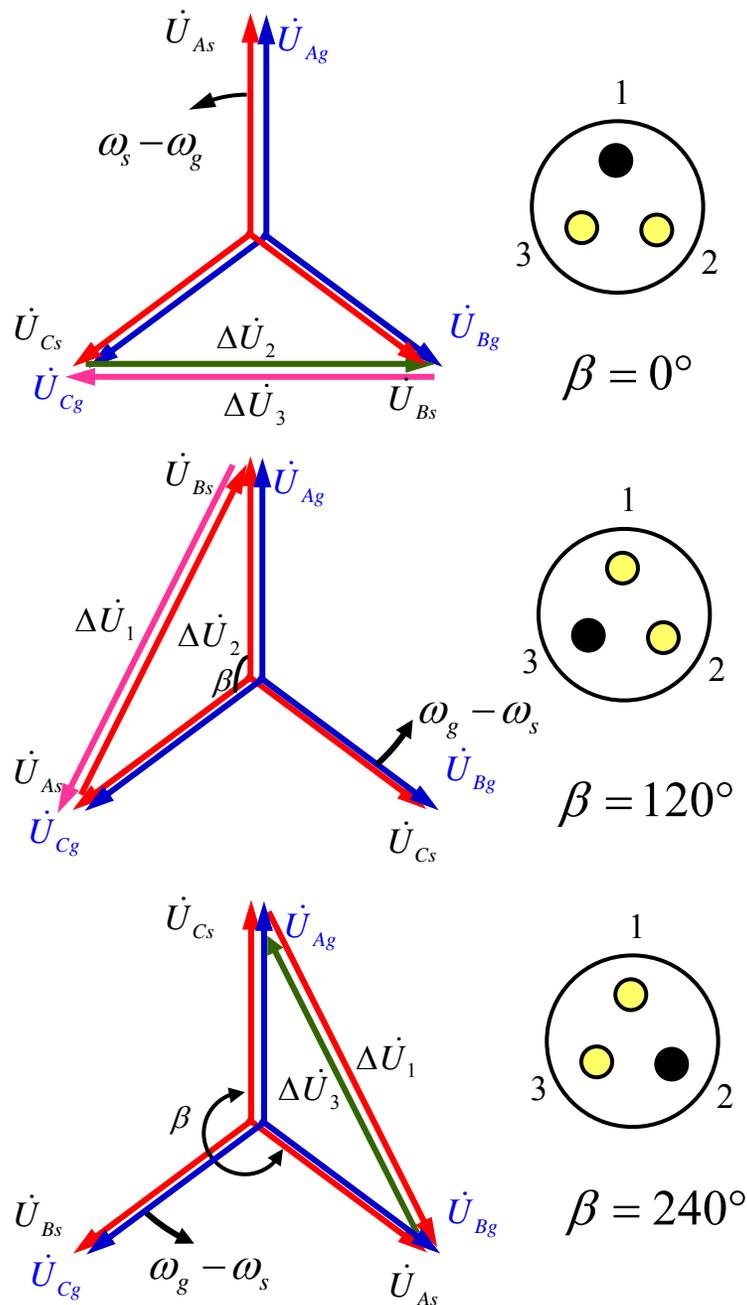
$$\beta = 120^\circ: \Delta U_3 = 0$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \sqrt{3}U_s$$

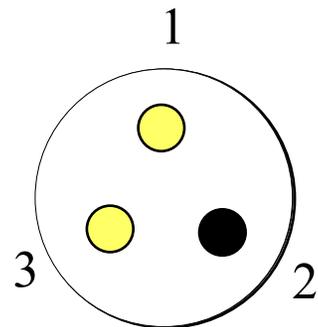
$$\beta = 240^\circ: \Delta U_2 = 0$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_3 = \sqrt{3}U_s$$

则灯光出现旋转现象, 当相灯沿圆周按顺时针方向均匀分布时, 灯光沿逆时针方向旋转。



如果 $U_s=U_g$ ，但 $f_g>f_s$ ，则灯光也会出现旋转现象，当相灯沿圆周按顺时针方向分布时，灯光沿顺时针方向旋转。

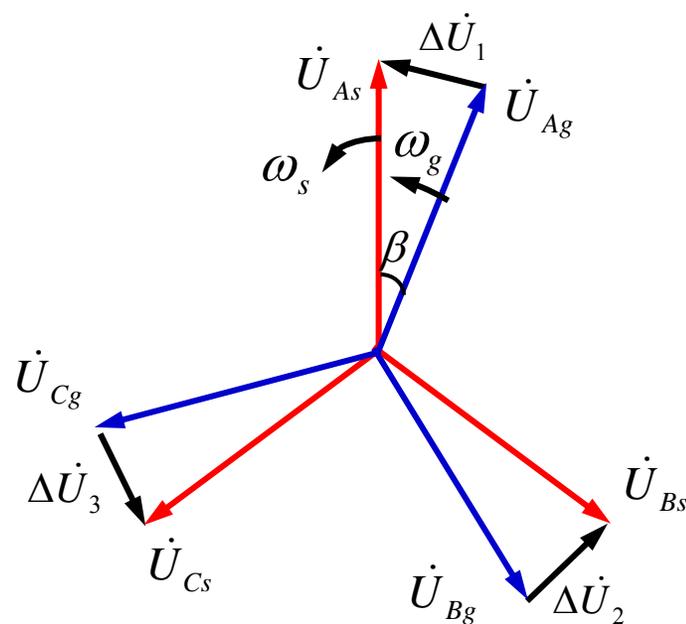


采用暗灯法，若灯光出现旋转现象，则说明发电机的相序接错了，需把发电机接到并联开关的任意两根线对调一下。

④相位不等

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = 2U_s \sin \frac{\beta}{2}$$

相灯不会熄灭，也不会变化，不能合闸并网，需稍微调节一下发电机的转速。



2) 操作步骤

- ①将要并网的发电机拖动到接近同步速；
- ②加上励磁，调节发电机励磁电流的大小，使发电机的端电压与电网电压相等；
- ③此时，如果相序一致，则灯光表现为明暗交替，如果灯光出现旋转现象，则说明相序不一致，应对调发电机接至并联开关的任意两根接线，保证相序一致；
- ④调节发电机的转速使灯光亮、暗的频率很低，并在三个相灯全暗瞬间，迅速合闸，完成并网操作。

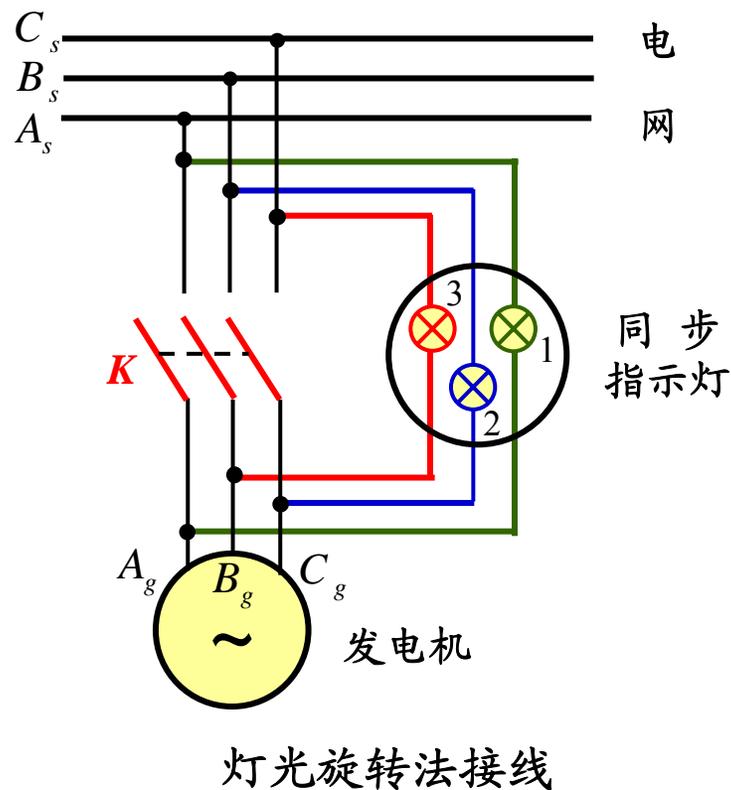
2. 灯光旋转法

■ **接线特点：** 一个相灯接于发电机和电网的对应相端点之间，另两个相灯接于发电机和电网的不同相端点之间。

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{A_s} - \dot{U}_{A_g}$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{B_s} - \dot{U}_{C_g}$$

$$\Delta \dot{U}_3 = \dot{U}_{C_s} - \dot{U}_{B_g}$$



1) 并联条件不满足时的现象

① 频率不等

如果 $U_s = U_g$, 但 $f_g \neq f_s$, 则灯光出现旋转现象。

② 相序不同

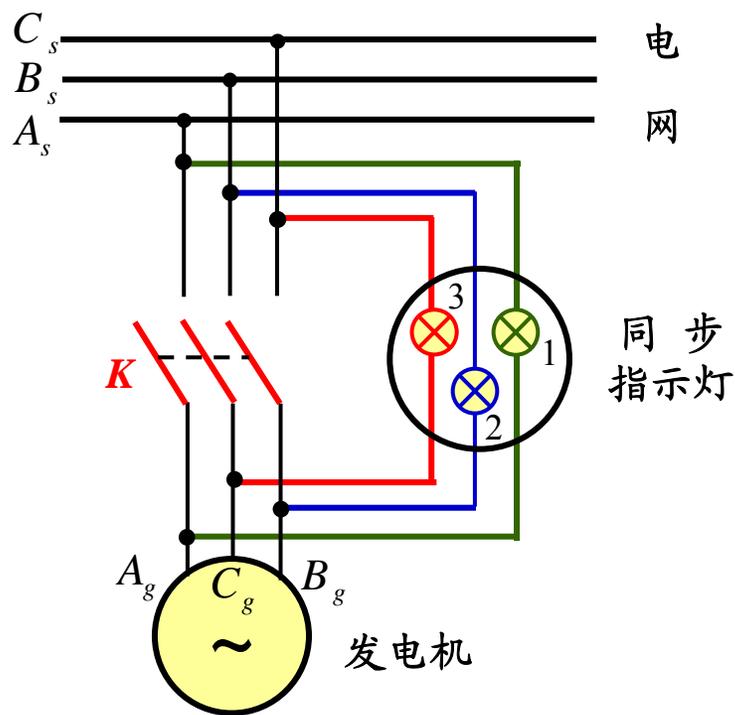
错接为: $A_s \sim A_g$; $B_s \sim C_g$; $C_s \sim B_g$

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_{A_s} - \dot{U}_{A_g}$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{B_s} - \dot{U}_{B_g}$$

$$\Delta \dot{U}_3 = \dot{U}_{C_s} - \dot{U}_{C_g}$$

三个相灯同时暗、同时亮交替变化。



相序不同时的灯光旋转法接线

2) 操作步骤

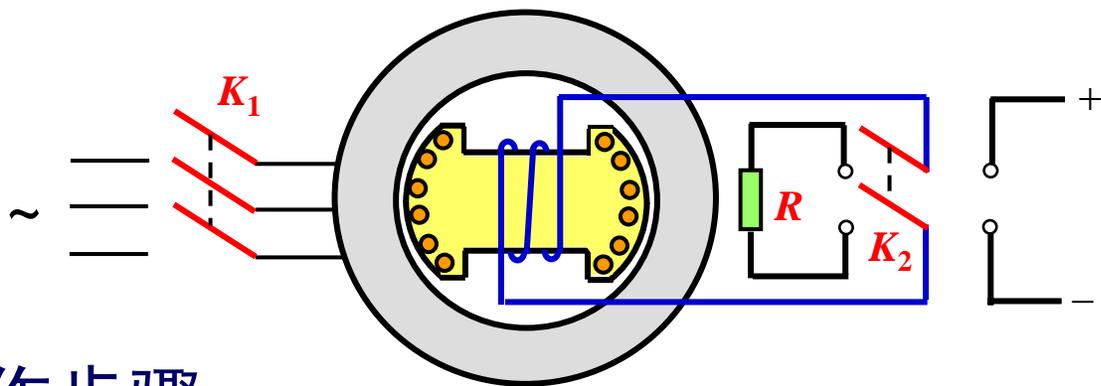
- ①将要并网的发电机拖动到接近同步速；
- ②加上励磁，调节发电机励磁电流的大小，使发电机的端电压与电网电压相等；
- ③此时，如果相序相同，则灯光旋转，如灯光同步则说明相序不同，应对调发电机或电网的任意两根接线；
- ④根据灯光旋转方向，调节发电机转速，使灯光旋转速度逐渐变慢，最后在相灯1熄灭、相灯2和相灯3亮度相同时迅速合闸，完成并网操作。

3) 准确同步法的特点

优点：合闸时没有明显的冲击电流；

缺点：操作复杂，比较费时间。

三、自同步法



1. 自同步法的操作步骤

- ① 事先校验好发电机的相序；
- ② 将发电机的励磁绕组经限流电阻短路；
- ③ 把发电机拖动到接近同步速（转差率小于5%）时，合上并网开关，并立即加入励磁，依靠定、转子之间的电磁力自动牵入同步。

2. 自同步法的特点

优点：操作简单，方便快捷，不需要复杂的并联设备。

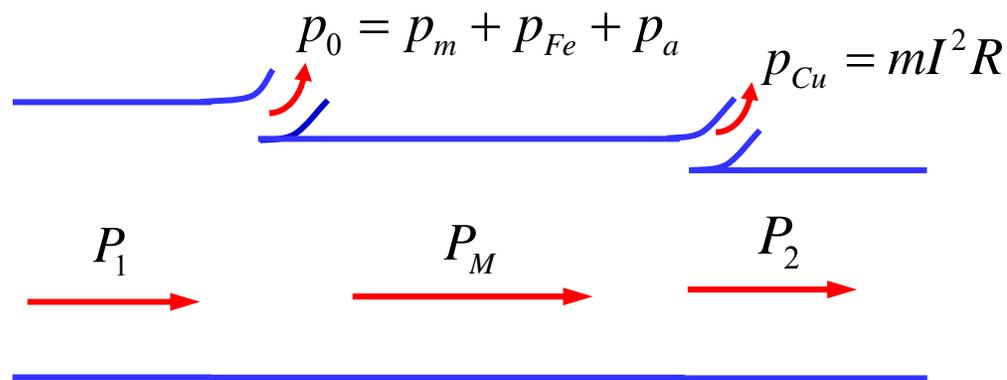
缺点：合闸时有较大的冲击电流。

15-3 同步发电机并联运行的理论基础

1.同步发电机的功率平衡方程式

$$\begin{cases} P_M = P_1 - (p_m + p_{Fe} + p_a) = P_1 - p_0 \\ P_2 = P_M - p_{cu} = P_M - mI^2R \end{cases}$$

$$P_1 = P_2 + p_{cu} + p_m + p_{Fe} + p_a$$



同步发电机的功率
流程图

2.同步发电机的转矩平衡方程式

$$P_1 = P_M + p_0 \rightarrow \frac{P_1}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega} + \frac{p_0}{\Omega}$$

$$T_1 = T + T_0$$

式中， T_1 —原动机输入给发电机的驱动转矩；

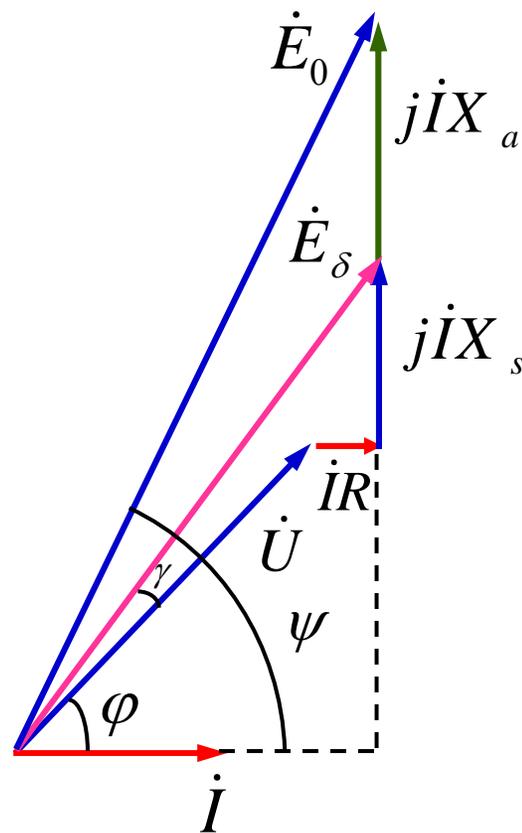
T —电磁转矩；

T_0 —机械摩擦及铁耗引起的空载转矩。

3.同步发电机的电磁功率

$$\begin{aligned}U \cos \varphi + IR &= E_{\delta} \cos(\varphi + \gamma) \\ &= E_0 \cos \psi\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_M &= P_2 + p_{cu} \\ &= mUI \cos \varphi + mI^2 R \\ &= mE_{\delta} I \cos(\varphi + \gamma) \\ &= mE_0 I \cos \psi\end{aligned}$$



同步发电机的电磁功率 P_M 是通过气隙合成磁场传递到定子的总的电功率。

15-4 有功功率的调节和静态稳定

■无限大电网： $U=C, f=C, Z_s=0$

■功角特性：同步发电机并联到大电网后，当电网电压和频率恒定、电机参数（ X_d 、 X_q 、 X_c ）为常数、励磁电流不变时， $P_M=f(\theta)$ 。

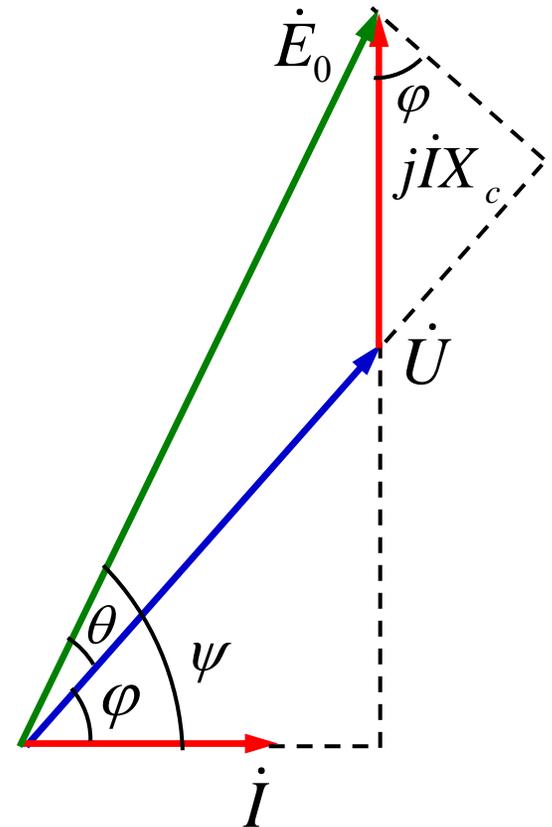
1. 同步发电机的功角特性

1) 隐极同步发电机

$$P_M = P_2 + p_{cu} \approx P_2 = mUI \cos \varphi$$

从简化相量图可以看出

$$IX_c \cos \varphi = E_0 \sin \theta$$



$$I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{X_c}$$

■ 功角特性表达式

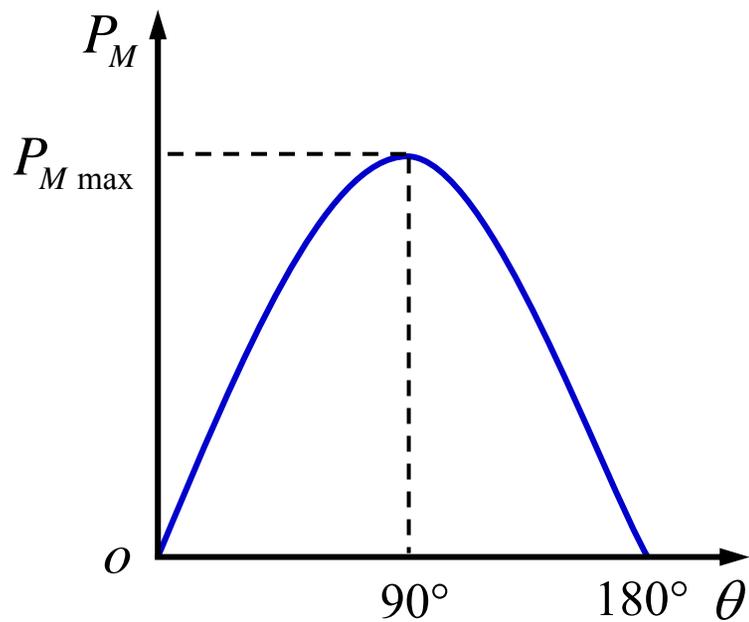
$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_C} \sin \theta$$

■ 最大电磁功率

当 $\theta=90^\circ$ 时，出现最大电磁功率，即

$$P_{M \max} = m \frac{E_0 U}{X_C}$$

功角特性是同步发电机调节有功功率输出的重要特性曲线。

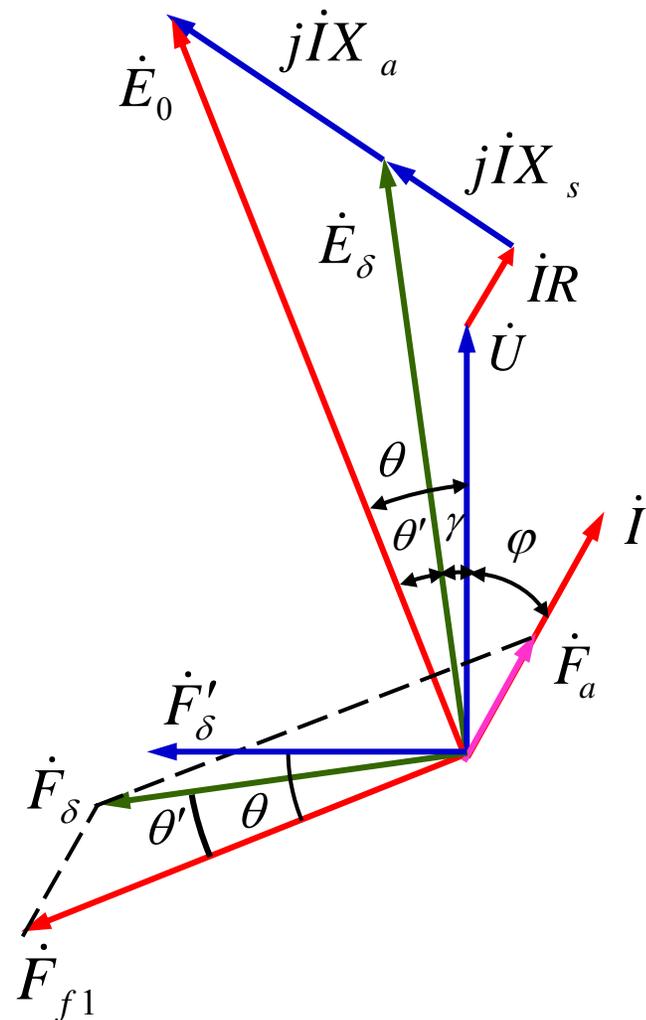
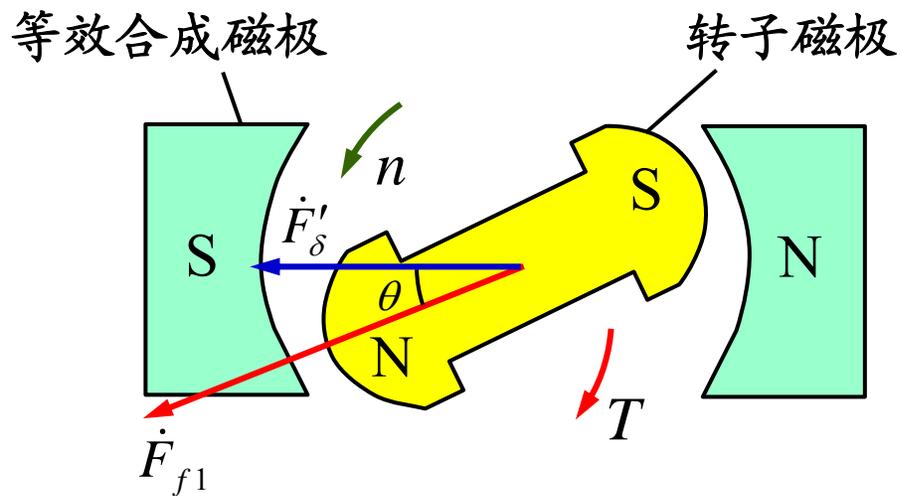


隐极同步发电机的功角特性

■功率角 θ 的双重物理意义

①时间相位角：励磁电动势 \dot{E}_0 和电压 \dot{U} 之间的夹角。

定义： \dot{E}_0 超前 \dot{U} 时， θ 为正。



②空间相位角：产生电动势 \dot{E}_0 的励磁磁动势 \dot{F}_{f1} 和产生电压 \dot{U} 的等效合成磁动势 \dot{F}'_{δ} 之间的夹角。

2) 凸极同步发电机

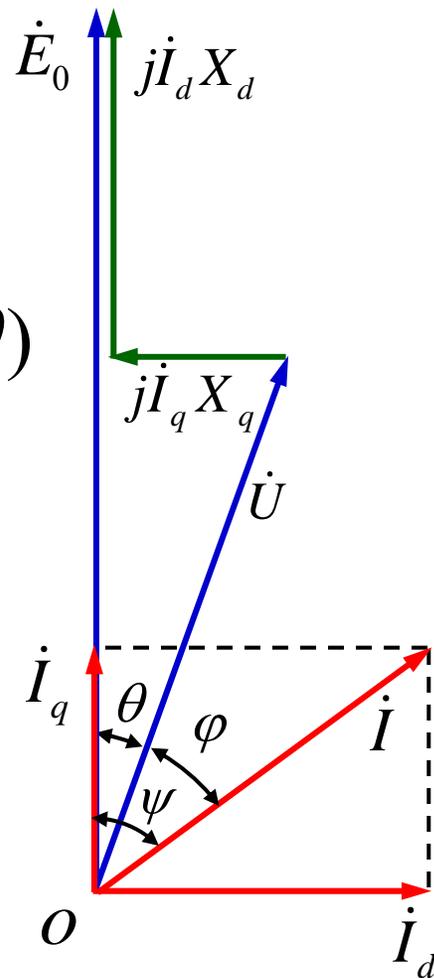
忽略电枢电阻，有

$$\begin{aligned}P_M &= P_2 = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi - \theta) \\&= mUI \cos \psi \cos \theta + mUI \sin \psi \sin \theta \\&= mUI_q \cos \theta + mUI_d \sin \theta\end{aligned}$$

从简化相量图可以看出

$$I_q X_q = U \sin \theta \quad \Rightarrow \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{X_q}$$

$$I_d X_d = E_0 - U \cos \theta \quad \Rightarrow \quad I_d = \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d}$$



所以

$$P_M = mU \frac{U \sin \theta}{X_q} \cos \theta + mU \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d} \sin \theta$$

■ 功角特性表达式

$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + mU^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\theta = P'_M + P''_M$$

式中, $P'_M = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta$ 为励磁电磁功率;

$P''_M = mU^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\theta$ 为凸极电磁功率。

$$\frac{dP_M}{d\theta} = 0 \Rightarrow \theta_m \Rightarrow P_{M \max}$$

$$45^\circ < \theta_m < 90^\circ$$

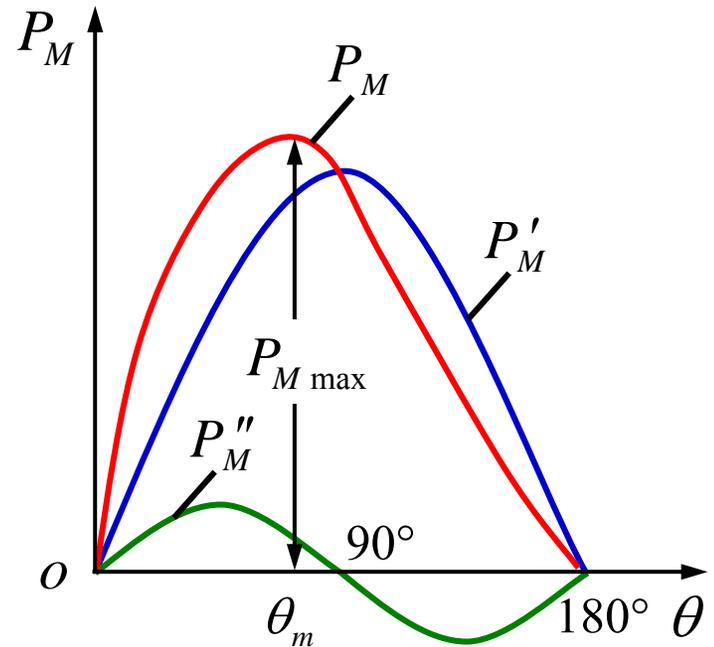
3) 同步发电机的转矩角度特性

■ 隐极同步发电机

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = m \frac{E_0 U}{\Omega X_c} \sin \theta$$

■ 凸极同步发电机

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = m \frac{E_0 U}{\Omega X_d} \sin \theta + \frac{m U^2}{\Omega} \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta = T' + T''$$



凸极同步发电机的功角特性

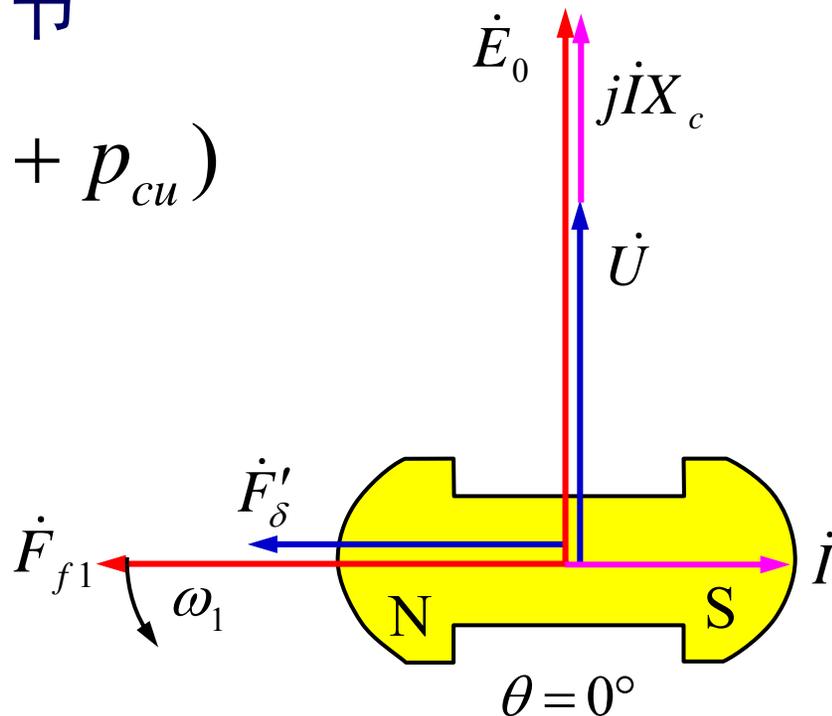
3. 并联运行时有功功率的调节

$$P_2 = P_1 - (p_m + p_{Fe} + p_a + p_{cu})$$

1) 空载时

$$P_M = P_2 = 0 \quad \theta = 0^\circ$$

$$P_1 = P_M + p_0 = p_0$$

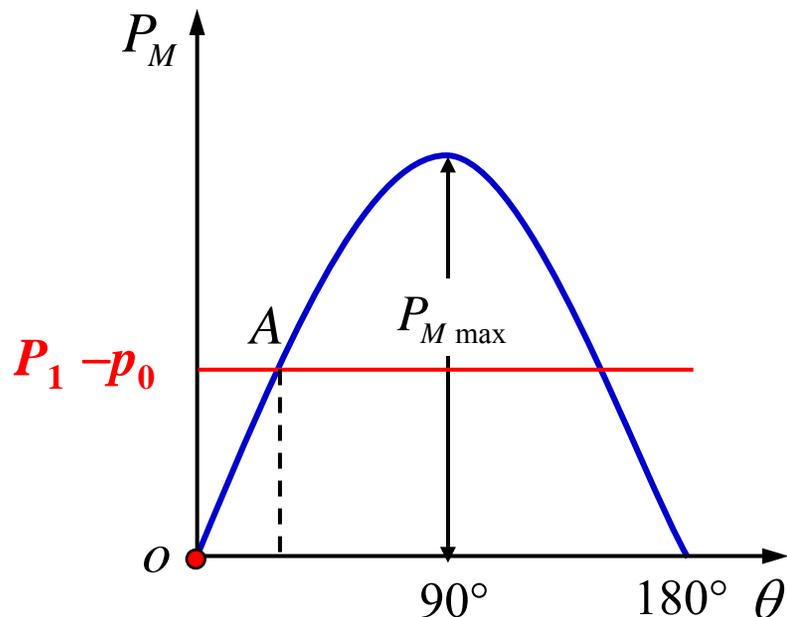
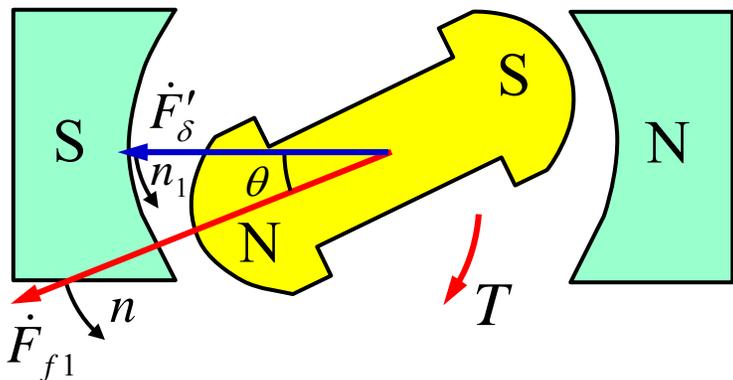


$$i_f \uparrow \Rightarrow \dot{F}_{f1} \uparrow \Rightarrow \dot{E}_0 \uparrow \Rightarrow \dot{I} \text{ 滞后 } \dot{U} 90^\circ, \theta = 0^\circ$$

$$\Rightarrow P_M = 0$$

改变励磁不能改变发电机输出的有功功率。

2) 增大原动机的输入功率 P_1



$$P_1 > p_0 \Rightarrow P_1 - p_0 > 0 \Rightarrow T_1 - T_0 > 0 \Rightarrow n \uparrow$$

$$\Rightarrow \theta \uparrow \Rightarrow P_2 = P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta \uparrow \Rightarrow T \uparrow$$

■ **结论：**要调节与无限大电网并联运行的同步发电机输出的有功功率，必须调节原动机的输入功率（输入转矩）。

4.同步发电机与电网并联运行时的静态稳定

1) 静态稳定的定义

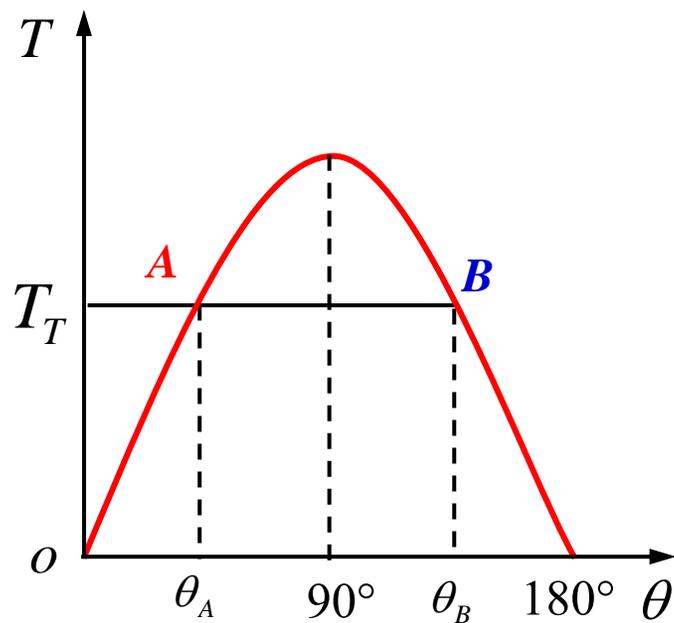
并联在电网上的同步发电机，当电网或原动机偶然发生微小扰动时，若扰动消失后，发电机能恢复到原来的状态稳定运行，就认为发电机的运行是静态稳定的。否则是不稳定的。

2) 静态稳定分析

$$T_1 = T + T_0$$

原动机的有效输入转矩为

$$T_T = T_1 - T_0$$



•**A点**：微小扰动使 θ 增大 $\Delta\theta$ 时，电磁转矩 T 也增加一个 ΔT ，扰动消失后，

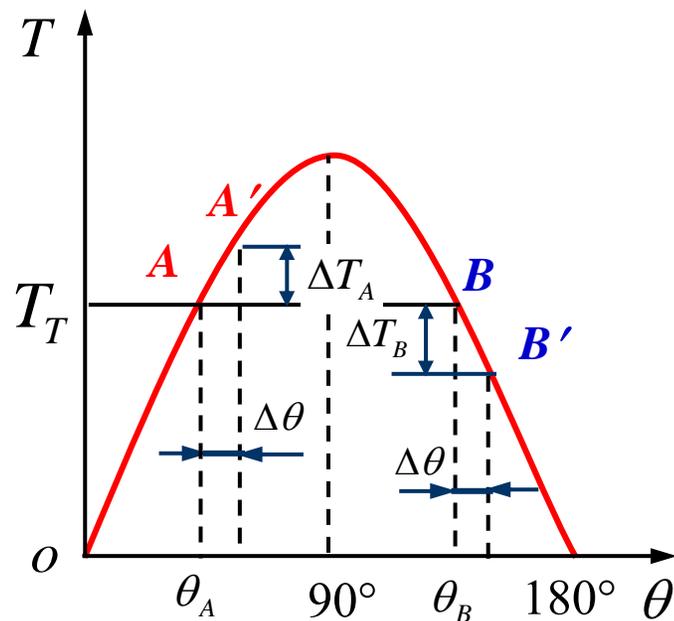
$$T_T < T \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow \theta \downarrow$$

电机自动回到A点运行，稳定。

•**B点**：微小扰动使 θ 增大 $\Delta\theta$ 时，电磁转矩 T 减小一个 ΔT ，扰动消失后，

$$T_T > T \Rightarrow n \uparrow \Rightarrow \theta \uparrow$$

失步，不稳定。



■同步发电机静态稳定的判据： $\frac{dT}{d\theta} > 0$

当 $\frac{dT}{d\theta} = 0$ 时，为同步发电机的静态稳定极限，此时

$$T = T_{\max} \quad \theta = \theta_m$$

同步发电机的稳定运行区：

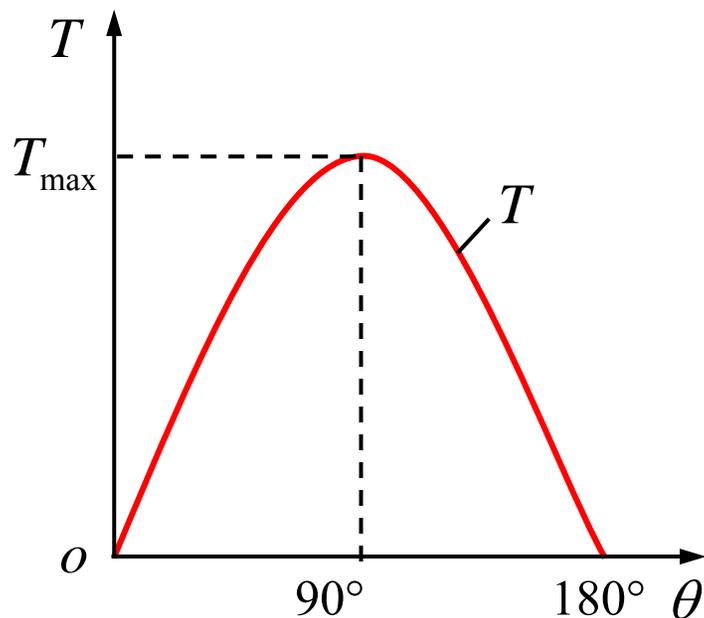
$$0^\circ \leq \theta < \theta_m$$

隐极同步发电机的静态稳定极限：

$$\theta = 90^\circ$$

隐极同步发电机的最大电磁转矩：

$$T_{\max} = m \frac{E_0 U}{\Omega X_C}$$



3) 整步转矩系数

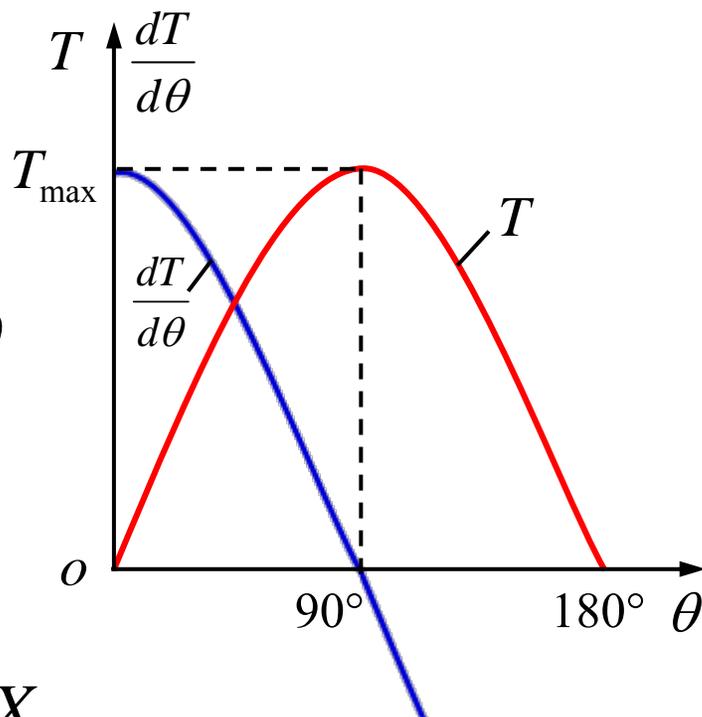
$\frac{dT}{d\theta}$ 的大小反映了同步发电机保持稳定运行的能力，称为整步转矩系数。

■ 隐极同步发电机

$$\frac{dT}{d\theta} = m \frac{E_0 U}{\Omega X_c} \cos \theta = T_{\max} \cos \theta$$

■ 凸极同步发电机

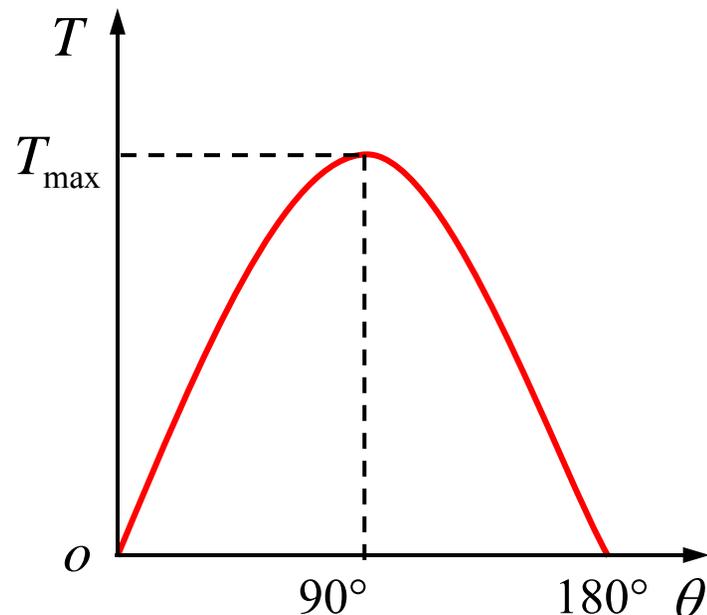
$$\frac{dT}{d\theta} = m \frac{E_0 U}{\Omega X_d} \cos \theta + \frac{m U^2}{\Omega} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\theta$$



4) 过载能力

■ **过载能力**：同步发电机的最大电磁转矩 T_{\max} 与额定电磁转矩 T_N 之比，用 k_m 表示，即

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{P_{M \max}}{P_{MN}}$$



■ 隐极同步发电机

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{P_{M \max}}{P_{MN}} = \frac{1}{\sin \theta_N}$$

隐极同步发电机，一般过载能力 $k_m = 1.5 \sim 2.0$ ，即 $\theta \approx 30^\circ \sim 40^\circ$ 。

15-5 并联运行时无功功率的调节—V形曲线

1.无功功率的调节

假设：在调节无功功率时，发电机输出的有功功率不变，并忽略定子电阻和磁饱和影响。则有

$$P_2 = mUI \cos \varphi = C$$

$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta = C$$

由于 m 、 U 、 X_c 都是常数，所以有

$$I \cos \varphi = C$$

$$E_0 \sin \theta = C$$

$$I \cos \varphi = C \quad E_0 \sin \theta = C$$

1) 正常励磁

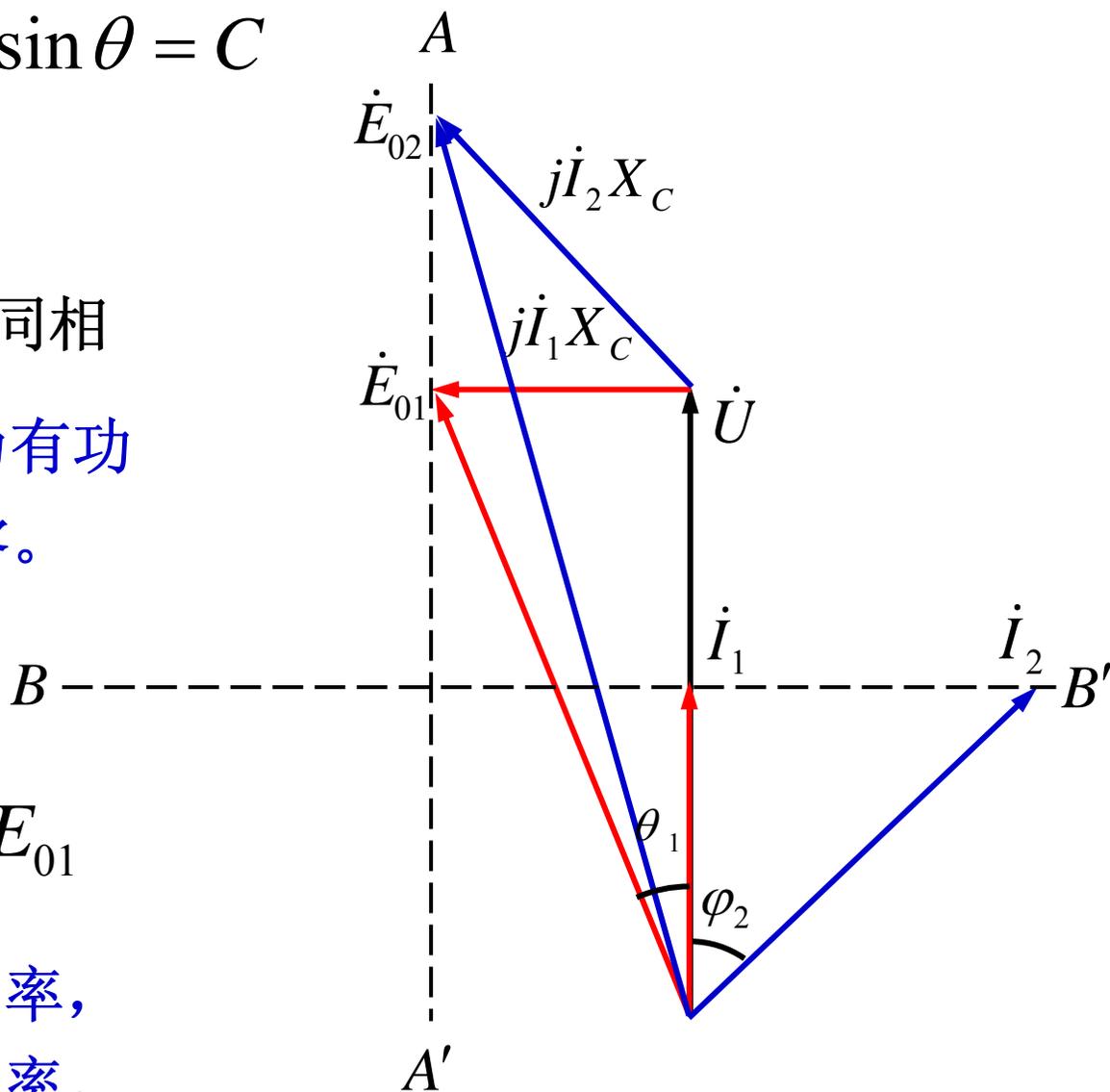
$\cos \varphi_1 = 1$ \dot{I}_1 与 \dot{U} 同相

发电机输出的全部为有功功率，无功功率为零。

2) 过励

$i_{f2} > i_{f1}$ $E_{02} > E_{01}$

发电机除输出有功功率，还输出滞后的无功功率。



3) 欠励

$$i_{f3} < i_{f1} \quad E_{03} < E_{01}$$

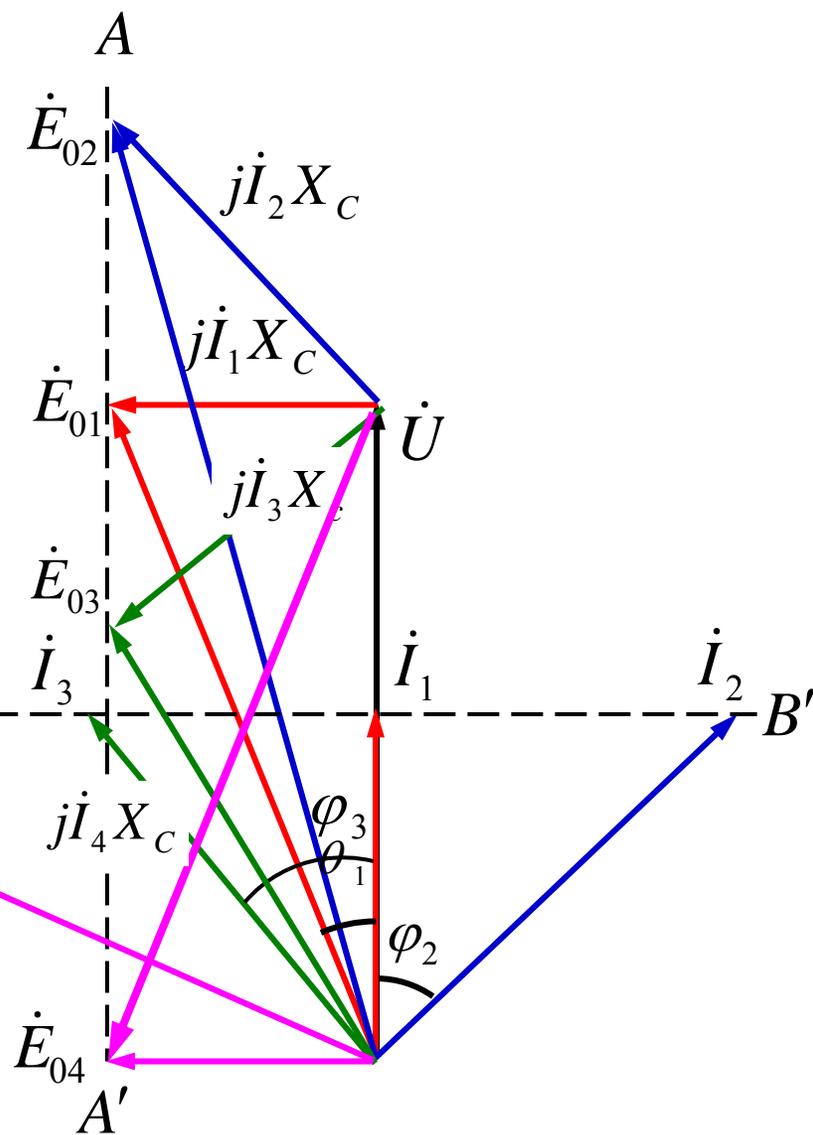
发电机除输出有功功率，
还输出超前的无功功率。

4) 静态稳定极限

$$i_f = i_{f4}$$

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_{04} \quad \theta = 90^\circ$$

进一步减小励磁电流，发
电机将不能稳定运行。



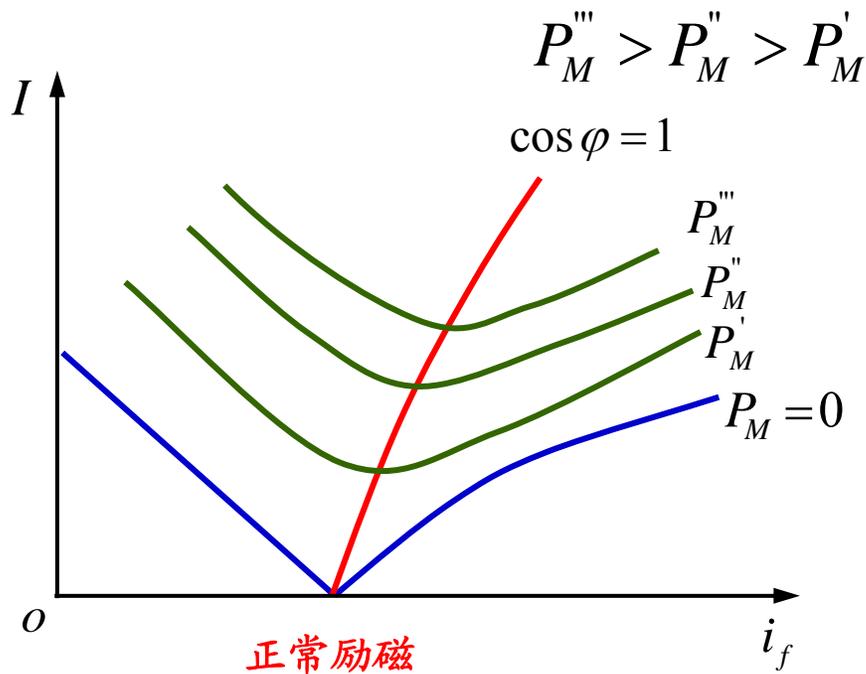
2.V形曲线

■**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，表示电枢电流 I 和励磁电流 i_f 的关系曲线 $I=f(i_f)$ 。

■**V形曲线的特点**：

(1) 有功功率越大，V形曲线越高。

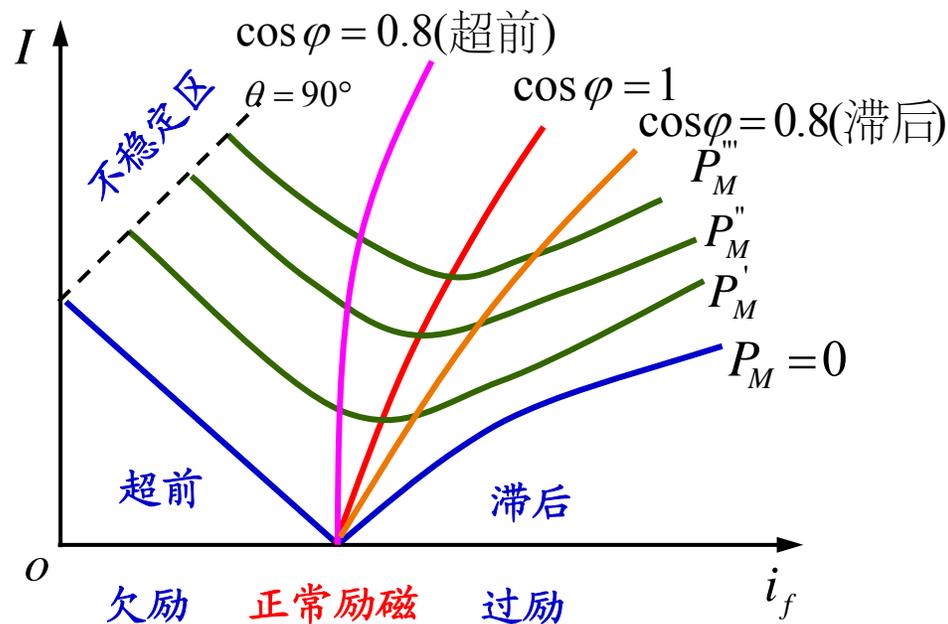
(2) 每条V形曲线的最低点为正常励磁点，即 $\cos\varphi=1$ ； $\cos\varphi=1$ 的连线为一条略微向右倾斜的曲线。



- (3) $\cos\varphi=1$ 曲线的左边为欠励状态，功率因数超前；
 $\cos\varphi=1$ 右边为过励状态，功率因数滞后。

$$P_M''' > P_M'' > P_M'$$

- (4) V形曲线左侧有一个不稳定区。



例15-1 一台三相汽轮发电机， $\cos\varphi_N=0.8$ （滞后），同步电抗 $\underline{X}_c=1$ ，并联在无限大电网上运行，试求：

- 1) 供给90%额定电流时，发电机输出的有功功率和无功功率（额定功率因数），空载电动势 E_0 和功率角 θ ；
- 2) 调节原动机输入的机械功率，使输出有功功率达到额定的110%，如励磁保持不变，则功率角 θ 和无功功率如何变化？
- 3) 如需无功保持不变，如何调节励磁电流，求此时的空载电动势 E_0 和功率角 θ 。

解：1) 取 $\underline{\dot{U}} = 1\angle 0^\circ$ ，因为 $\underline{I} = 0.9$ ， $\cos\varphi = 0.8$ (滞后)

电枢电流 $\underline{\dot{I}} = I\angle -\varphi = 0.9 \times (0.8 - j0.6) = 0.72 - j0.54$

有功功率 $\underline{P}_2 = \underline{U} \underline{I} \cos \varphi = \underline{I} \cos \varphi = 0.72$

电磁功率 $\underline{P}_M = \underline{P}_2 = 0.72$

$$\underline{I} = 0.72 - j0.54$$

无功功率 $\underline{Q}_2 = \underline{U} \underline{I} \sin \varphi = 0.54$

空载电动势

$$\begin{aligned} \underline{\dot{E}}_0 &= \underline{\dot{U}} + j \underline{\dot{I}} \underline{X}_c = 1 + j(0.72 - j0.54) \times 1 = 1.54 + j0.72 \\ &= 1.70 \angle 25.1^\circ \end{aligned}$$

$$\underline{E}_0 = 1.7 \quad \theta = 25.1^\circ$$

2) 励磁保持不变, 则空载电动势 E_0 不变, $\underline{E}'_0 = 1.7$

有功功率为额定的110%, 则由 $\underline{P}'_M = \frac{E'_0 \underline{U}}{\underline{X}_c} \sin \theta'$

可知有
$$\frac{\underline{P}'_M}{\underline{P}_M} = \frac{\sin \theta'}{\sin \theta}$$

$$\sin \theta' = \frac{\underline{P}'_M}{\underline{P}_M} \sin \theta = \frac{1.1}{0.9} \sin 25.1^\circ = 0.518$$

$$\theta' = \arcsin 0.518 = 31.2^\circ$$

$$\begin{aligned} \underline{I}' \underline{X}_c &= \sqrt{\underline{E}'_0{}^2 + \underline{U}^2 - 2\underline{E}'_0 \underline{U} \cos \theta'} = \sqrt{1.7^2 + 1^2 - 2 \times 1.7 \times 1 \times \cos 31.2^\circ} \\ &= 0.991 \end{aligned}$$

$$\underline{I}' = \frac{\underline{I}' \underline{X}_c}{\underline{X}_c} = \frac{0.991}{1} = 0.991$$

$$\cos \varphi' = \frac{P_2'}{\underline{U} \underline{I}'} = \frac{1.1 \times 0.8}{1 \times 0.991} = 0.888$$

无功功率

$$\underline{Q}_2' = \underline{U} \underline{I}' \sin \varphi' = 1 \times 0.991 \times \sqrt{1 - 0.888^2} = 0.456$$

$$\underline{Q}_2' < \underline{Q}_2$$

[解法2] 由电动势方程式，得

$$j \underline{I}' \underline{X}_c = \underline{E}'_0 - \underline{U} = 1.7 \angle 31.2^\circ - 1 \angle 0^\circ = 0.454 + j0.88$$

$$\underline{I}' = \frac{j \underline{I}' \underline{X}_c}{j \underline{X}_c} = 0.88 - j0.454$$

无功功率 $\underline{Q}'_2 = \underline{U} \underline{I}' \sin \varphi' = 1 \times 0.454 = 0.454$

$$\underline{Q}'_2 < \underline{Q}_2$$

3) 保持无功不变, 即 $\underline{I}'' \sin \varphi'' = 0.54$

$$\underline{I}'' = 0.88 - j0.54$$

空载电动势

$$\underline{E}''_0 = \underline{U} + j \underline{I}'' \underline{X}_c = 1 + j(0.88 - j0.54) \times 1 = 1.77 \angle 29.7^\circ$$

$$\underline{E}''_0 = 1.77 \quad \theta'' = 29.7^\circ$$

需要增大励磁电流。

小 结

1.同步发电机与无限大电网并联时的运行条件

$$U = U_s = C \quad f = f_s = C$$

2.同步发电机与电网并联的条件

- (1) 发电机的频率等于电网的频率；
- (2) 发电机的电压幅值等于电网电压的幅值，且波形一致；
- (3) 发电机的电压相序与电网的电压相序相同；
- (4) 在合闸时，发电机的电压相位与电网电压的相位一样。

3.同步发电机并联合闸的方法

- (1) 准确同步法：暗灯法和灯光旋转法；
- (2) 自同步法

4.同步发电机的功角特性

功角特性的定义：同步发电机并入电网后，当电网电压和频率恒定、电机参数（ X_d 、 X_q 、 X_c ）为常数、空载电动势 E_0 保持不变时， $P_M=f(\theta)$ 。

凸极同步发电机

$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + m U^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta = P'_M + P''_M$$

隐极同步发电机

$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$$

5.同步发电机与电网并联运行时的静态稳定

静态稳定的定义： 并联在电网上的同步发电机，当电网或原动机偶然发生微小扰动时，若在扰动消失后，发电机能恢复到原来的状态稳定运行，就认为发电机的运行是静态稳定的。否则是不稳定的。

同步发电机静态稳定的判据： $\frac{dT}{d\theta} > 0$

过载能力： 同步发电机的最大电磁转矩 T_{\max} 与额定电磁转矩 T_N 之比称为过载能力，用 k_m 表示，即

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{P_{M \max}}{P_{M N}}$$

隐极同步发电机的过载能力

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{P_{M\max}}{P_{MN}} = \frac{1}{\sin \theta_N}$$

6.同步发电机与电网并联运行时有功功率的调节

并联于电网运行的同步发电机，调节原动机输入的机械功率，将改变功率角 θ 的大小，从而改变发电机输出的有功功率。

7.同步发电机与电网并联运行时无功功率的调节

(1) 调节同步发电机的励磁电流，可以改变发电机输出的无功功率，但有功功率不会发生变化。

(2) 同步发电机正常励磁时，输出的全部为有功功率，无功功率为零；处于过励状态时，发电机除输出有功功率，还向电网输出滞后的无功功率；欠励时，发电机向电网输出超前的无功功率。

(3) 并联于无穷大电网的同步发电机，在有功功率不变时，电枢电流 I 随励磁电流 i_f 的变化的曲线 $I = f(i_f)$ 称为发电机的V形曲线。

调节有功功率时发电机输出无功功率的变化

• 并联在电网上的同步发电机，保持励磁电流 i_f 不变，调节发电机输出的有功功率时，励磁电动势相量 \dot{E}_0 的轨迹是一个圆，电枢电流相量 \dot{I} 的轨迹也是一个圆，把它们称为同步电机的圆图。

• 当发电机的励磁电流不变时，改变发电机输出的有功功率时，无功功率也会发生变化。当有功功率增大时，滞后的无功功率会减小。

