

第三篇 同步电机

第十二章 同步发电机的并联运行

第十二章 同步发电机的并联运行

本章基本要求

- 掌握同步发电机并联投入的条件和方法
- 掌握同步发电机功率、转矩平衡方程式及功角特性
- 掌握并联发电机的有功和无功的调节方法
- 掌握并联发电机静态稳定的概念与判别

第十二章 同步发电机的并联运行

§ 12.1 概述

一、并联运行的必要性

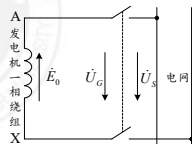
并网：把发电机投入到电网所进行的操作过程称为并网（并列、并车或整步）。（反之称为解列）

并联运行的优点：

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

二、无穷大电网

- 1) $S \rightarrow \infty$ ；
- 2) $U_S = C$ ；
- 3) $f_S = C$ ；
- 4) $Z_S \rightarrow 0$



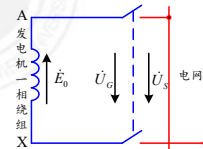
第十二章 同步发电机的并联运行

§ 12.2 同步发电机并联投入的条件和方法

一、并联投入条件（理想并联条件）

为了避免并联合闸时引起电流、功率以及由此引起的发电机内部的机械应力的冲击，将要投入电网的发电机应满足下列条件：

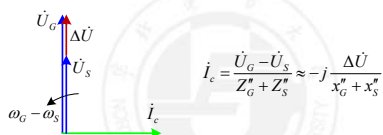
- 1、电压大小相同，波形一致；
- 2、电压相位相同 $\dot{U}_G = \dot{U}_S$ ；
- 3、频率相同 $f_G = f_S$ ；
- 4、相序一致。



第十二章 同步发电机的并联运行

二、不满足条件的并网分析

(1) 频率相等，相序一致，电压幅值或相位不等



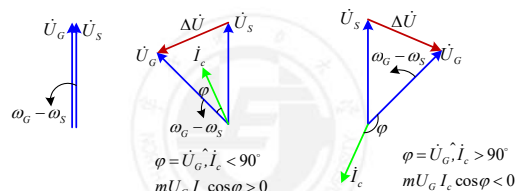
$$I_c = \frac{\dot{U}_G - \dot{U}_S}{Z_G' + Z_S'} \approx -j \frac{\Delta \dot{U}}{X_G' + X_S'}$$

结果：较小的电压差也会产生较大的电流，造成对发电机和电网的冲击

解决方法：①电压大小可调节励磁电流；
②电压相位可调节原动机的转速。

第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 电压、相位相等，相序一致，频率不等



结果：发电机与电网之间产生严重的功率振荡，并且伴生较大的暂态电流。

解决方法：改变频率可调节原动机的转速

第十二章 同步发电机的并联运行

(3) 电压相等，频率相等，相序不同

此时若一相电压相等，另外两相电压差为线电压，引起很大的冲击环流，**发电机绝对不能并网**。

■ 条件不满足时并网对电机的影响

- 1) 电机和电网之间有电位差，**形成环流**，定子绕组端部受力变形，危害电机安全运行。
- 2) 产生拍振电流和电压，引起电机内**功率振荡**。
- 3) 电机和电网之间有高频谐波环流，增加损耗，温度升高，效率降低。



-7-

电力工程系

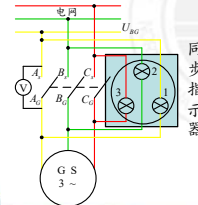
第十二章 同步发电机的并联运行

三、并联投入方法

(1) 准整步法

把发电机调整到**完全条件**再并联投入电网。

a) 暗灯法



相灯现象：

- 电压相同、频率不同，灯光闪烁，同明同灭；
- 电压不同、频率相同，灯光长明，亮度相同；
- 电压、频率都不同，灯光闪烁，同明同暗。

并网时刻：灯光长时间同时熄灭。

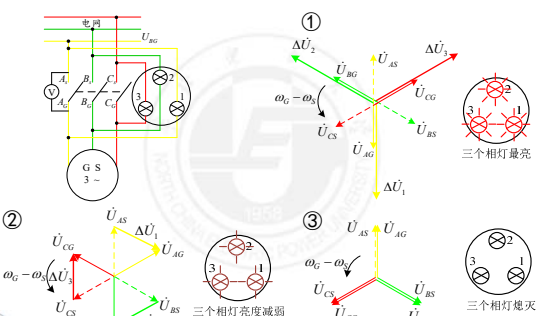


-8-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

■ 保证相序相同、电压相同，但频率不等时的灯光变化

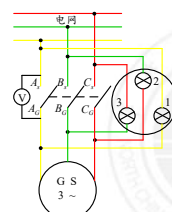


-9-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

b) 旋转灯光法



相灯现象：

- 电压相同、频率不同，灯光交替明灭（旋转）
- 电压不同、频率相同，灯光有明有暗。
- 电压不同、频率不同，灯光交替明暗（旋转）；

并网操作：调节发电机电压，使电压相等，调节发电机转速，使灯光旋转缓慢，说明频率已接近，等到**不交叉的相灯1熄灭时**，说明电压相等而且同相位，即可把发电机投入电网。

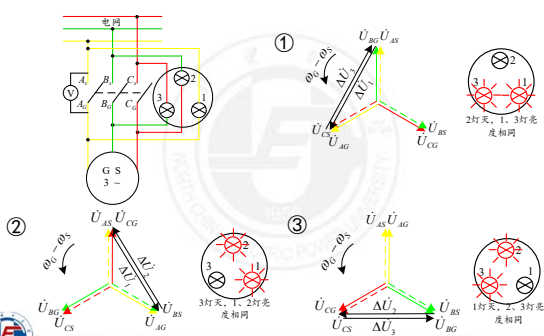


-10-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

■ 保证相序相同、电压相同，但频率不等时的灯光变化



-11-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 自整步法

方法：按照**定子旋转磁场的转向**把发电机拖动到接近同步速，把励磁绕组**通过一灭磁电阻短路**，然后把发电机投入电网，并立即加上励磁，依靠定、转子间形成的**电磁力矩**把转子拉入同步。

缺点：投网时冲击电流稍大。



-12-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

§ 12.3 同步发电机的功率和转矩平衡方程式

一、功率流程图

P_1 —原动机输入的机械功率

P_2 —发电机输出的电功率

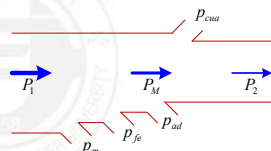
p_m —机械损耗

p_{fe} —铁心损耗

p_{ad} —附加损耗

p_{cua} —定子绕组铜损耗

P_M —通过气隙磁场的媒介作用，由转子侧传递到定子侧的电磁功率



-13-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

二、功率平衡方程式

$$P_1 = (p_m + p_{fe} + p_{ad}) + P_M$$

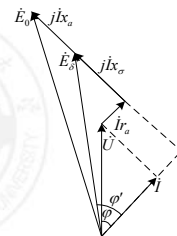
$$P_M = P_2 + p_{cua}$$

$$U \cos \varphi + I r_a = E_\delta \cos \varphi'$$

$$mUI \cos \varphi + mI^2 r_a = mE_\delta I \cos \varphi'$$

$$P_M = mE_\delta I \cos \varphi'$$

电磁功率是电枢电流与气隙合成磁场相互作用的结果



-14-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

三、转矩方程式

$$P_1 = (p_m + p_{fe} + p_{ad}) + P_M = p_0 + P_M$$

方程两边同除以 $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$ 称为同步角速度。

得：

$$\frac{P_1}{\Omega_1} = \frac{P_M}{\Omega_1} + \frac{p_m + p_{fe} + p_{ad}}{\Omega_1}$$

为原动机的驱动转矩 (T_1)

为制动性质的电磁转矩 (T_M)

为空载制动转矩 (T_0)

即：

$$T_1 = T_0 + T_M$$



-15-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

§ 12.4 同步发电机的功角特性

一、功角特性的定义与意义

(1) 定义

功率角 (功角)：指励磁电动势 \dot{E}_0 和电网电压 \dot{U} 这两个向量之间的夹角。

功角特性：同步电机接在网网上对称稳态运行时，电机电磁功率 P_M 与功率角 δ 之间的关系 ($P=f(\delta)$)。

(2) 意义

通过功角特性可以确定稳态运行时发电机所能发出的最大电磁功率，还可以用它来分析静态稳定等问题。



-16-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

二、有功功率的功角特性

(1) 隐极式同步发电机的功角特性

$$P_M \approx P_2 = mUI \cos \varphi = mUI \cos (\psi - \delta)$$

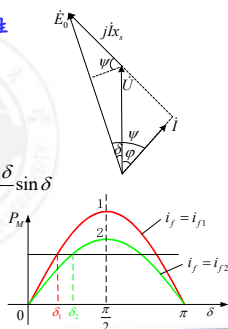
$$= mUI (\cos \psi \cos \delta + \sin \psi \sin \delta)$$

$$\cos \psi = \frac{U \sin \delta}{I x_s} \quad \sin \psi = \frac{E_0 - U \cos \delta}{I x_s}$$

$$P_M = mUI \frac{U \sin \delta}{I x_s} \cos \delta + mUI \frac{E_0 - U \cos \delta}{I x_s} \sin \delta$$

$$P_M = \frac{mUE_0}{x_s} \sin \delta \Rightarrow \text{功角特性}$$

问题：发电机如何增加有功？



-17-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 凸极式同步发电机的功角特性

$$P_M = mUI \cos \varphi = mUI \cos (\psi - \delta)$$

$$= mUI (\cos \psi \cos \delta + \sin \psi \sin \delta)$$

$$= mUI_q \cos \delta + mUI_d \sin \delta$$

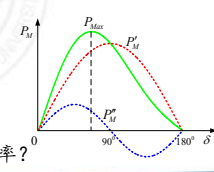
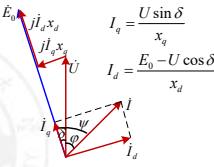
$$P_M = m \frac{UE_0}{x_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta$$

$$= P'_M + P''_M$$

$$P'_M = m \frac{UE_0}{x_d} \sin \delta \quad \text{基本电磁功率}$$

$$P''_M = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad \text{附加电磁功率}$$

问题：什么原因引起了附加电磁功率？



-18-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(3) 同步电机的矩角特性

1) 隐极同步电机

$$T_M = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{mUE_0}{x_s \Omega_1} \sin \delta$$

2) 凸极同步电机

$$T_M = \frac{P_M}{\Omega_1} = m \frac{UE_0}{x_d \Omega_1} \sin \delta + m \frac{U^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta = T'_M + T''_M$$

$$T'_M = m \frac{UE_0}{x_d \Omega_1} \sin \delta \text{ 为基本电磁转矩}$$

$$T''_M = m \frac{U^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \text{ 为附加电磁转矩或凸极电磁转矩}$$



-19-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

三、无功功率的功角特性

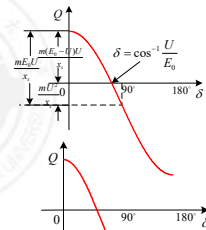
定义：无功功率与功率角之间的关系 ($Q=f(\delta)$)。

1) 隐极同步电机

$$Q = m \frac{UE_0}{x_s} \cos \delta - m \frac{U^2}{x_s}$$

2) 凸极同步电机

$$Q = m \frac{UE_0}{x_d} \cos \delta - m \frac{U^2}{2} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta + \frac{mU^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta$$



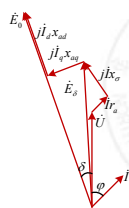
-20-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

四、功率角 δ 的物理意义

(1) 时间意义



功率角是 \dot{E}_0 和 \dot{U} 之间的时间相位差角，对发电机而言， δ 角是励磁电动势 \dot{E}_0 超前于端电压 \dot{U} 的时间角。

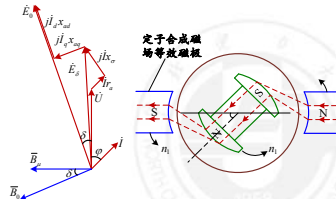


-21-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 空间意义



功率角是主磁场与电枢等效合成磁场之间的空间角。
 δ 角也可看作转子磁极轴线与电枢等效合成磁极轴线之间的空间角。

总之：功率角实际上反映了定子合成磁场扭斜的角度，它愈大产生的电磁功率和电磁转矩也愈大。而形成功角的原因是由于有交轴电枢反应磁动势 F_{aq} (或 I_q)。因此，交轴电枢反应磁动势是产生电磁转矩、进行机电能量转换的必要条件。



-22-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

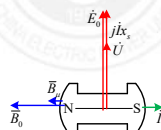
§ 12.5 同步发电机与无限大电网并联运行时 有功功率的调节和静态稳定

分析前提：忽略饱和和电枢电阻， $U=C$ ， $f=C$ ， $E_0=C$ 。

一、有功功率的调节

(1) 不发出有功时

$$P_1 = p_m + p_{fe} + p_{ad} \rightarrow P_2 = P_M = 0 \rightarrow \delta = 0^\circ$$



-23-

电力工程系

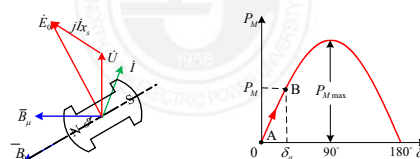
第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 增加原动机输入功率时

$$P_1 > p_m + p_{fe} + p_{ad} \rightarrow T_1 > T_0 \rightarrow \text{转子加速} \rightarrow \bar{B}_0 \text{ 超前 } \bar{B}_\mu$$

$$\rightarrow \dot{E}_0 \text{ 超前 } \dot{U} \rightarrow \delta > 0^\circ \rightarrow P_M > 0, \text{ 产生电磁转矩 } T_M$$

$$\rightarrow T_M = T_1 - T_0 \rightarrow \delta \text{ 角稳定运行} \rightarrow P_2 \text{ 增加}$$



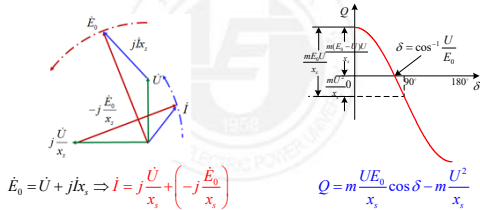
-24-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(3) 仅调节原动机输入功率时的无功变化分析

励磁不变仅调节原动机输入转矩时的**励磁电动势**和**电枢电流**相量末端变化轨迹:



结论: 发电机输出有功增加的同时, 输出无功将相应减少。

-25-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

二、静态稳定

(1) 静态稳定定义

并网同步发电机对称稳态运行时经外界**微小扰动**, 若扰动消失后, 发电机能够回到原来的运行状态, 则称发电机是“**静态稳定**”的, 反之, 则是不稳定的。

微小扰动 { 原动机输入转矩的微小波动
发电机励磁电流的微小变化
电网的电压出现微小的波动
电网的频率出现微小的波动 }

这些扰动都会改变并网同步发电机的运行点。

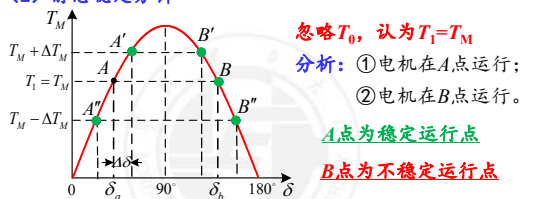


-26-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(2) 静态稳定分析



A 点: { $\delta \uparrow \rightarrow T_M \uparrow \rightarrow T_M > T_1 \rightarrow n \downarrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow T_M \downarrow \rightarrow A$
 $\delta \downarrow \rightarrow T_M \downarrow \rightarrow T_M < T_1 \rightarrow n \uparrow \rightarrow \delta \uparrow \rightarrow T_M \uparrow \rightarrow A$

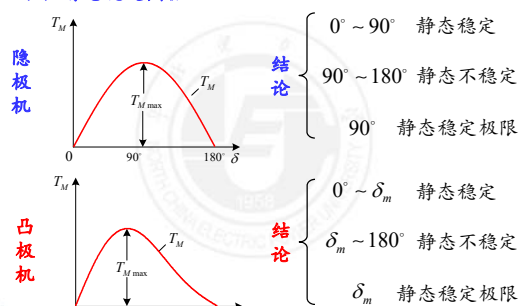
B 点: { $\delta \uparrow \rightarrow T_M \downarrow \rightarrow T_M < T_1 \rightarrow n \uparrow \rightarrow \delta \uparrow \rightarrow T_M \downarrow \rightarrow$ 失步
 $\delta \downarrow \rightarrow T_M \uparrow \rightarrow T_M > T_1 \rightarrow n \downarrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow T_M \uparrow \rightarrow A$

-27-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(3) 静态稳定判据



-28-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

同步电机静态稳定性与任一点切线斜率 $\frac{dT_M}{d\delta}$ 有关

判据 { $\frac{dT_M}{d\delta} > 0$ 则同步发电机是静态稳定
 $\frac{dT_M}{d\delta} < 0$ 则同步发电机是静态不稳定
 $\frac{dT_M}{d\delta} = 0$ 为静态稳定极限

定义: $\frac{dT_M}{d\delta}$ 称为同步电机的**同步转矩系数**。



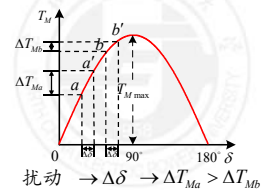
-29-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

(4) 静态稳定能力

发电机在扰动消失后回到原来稳定运行点所需时间的长短。



结论: 扰动后, 电磁转矩的差值越大, 回到原稳定运行点的时间也就越短。**(运行点功角越小越稳定)**



-30-

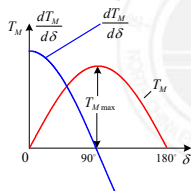
电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

1) 同步转系数 $\frac{dT_M}{d\delta}$

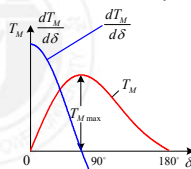
① 隐极同步电机

$$\frac{dT_M}{d\delta} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{UE_0}{x_s} \cos \delta$$



② 凸极同步电机

$$\frac{dT_M}{d\delta} = \frac{m}{\Omega_1} \left[\frac{UE_0}{x_d} \cos \delta + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta \right]$$



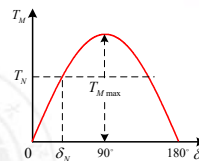
同步电机的同步转系数愈大，静态稳定的能力愈强。

第十二章 同步发电机的并联运行

2) 过载能力 k_m

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

不指允许过负荷能力的强弱



隐极发电机的过载能力：

$$k_m = \frac{T_{M \max}}{T_N} = \frac{P_{M \max}}{P_N} = \frac{\frac{m}{2} \frac{E_0 U}{x_s}}{\frac{m}{2} \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta_N} = \frac{1}{\sin \delta_N} (1.5 \sim 2)$$

① 隐极式汽轮发电机额定运行点 $\delta_N = 30^\circ \sim 40^\circ$ ；

② 凸极发电机额定运行点 $\delta_N = 20^\circ \sim 30^\circ$ ；

过载能力越大，额定运行点的功角越小，静态稳定性越高

第十二章 同步发电机的并联运行

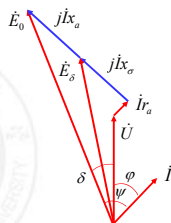
3) 短路比 K_c

$$K_c = k_\mu \frac{1}{x_s^*} \quad (\text{或 } k_\mu \frac{1}{x_d^*})$$

$$k_m = \frac{P_{M \max}}{P_N} \uparrow \Rightarrow P_{M \max} = m \frac{E_0 U}{x_s} \uparrow$$

$$\Rightarrow x_s \downarrow (\text{或 } x_d \downarrow) \Rightarrow K_c \uparrow$$

或由相量图，同步电抗标么值越小，功角越小。



同步电机的短路比愈大，静态稳定的能力愈强。

第十二章 同步发电机的并联运行

§ 12.6 无功功率的调节和V形曲线

一、调节无功功率的必要性

无功生产者		无功消费者		无功调节者
同步电机	异步电机	变压器	其他设备	无功补偿装置
100%	70%	20%	10%	未知

问题：电网每台发电机究竟负担多少无功功率，怎样调节一台发电机发出的无功功率呢？

二、分析前提

同步发电机并联于无穷大电网，电网电压和频率恒定，参数 (x_d, x_q, x_s) 为常数。

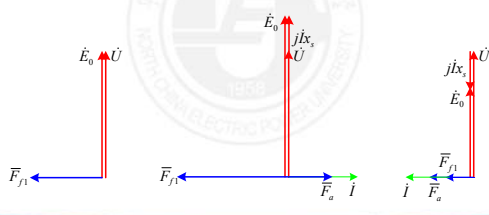
第十二章 同步发电机的并联运行

三、发电机空载情况下无功功率的调节

(1) 正常励磁：发电机既不发有功功率，也不发无功功率。

(2) 过励磁：发电机发出感性无功功率。

(3) 欠励磁：发电机发出容性无功功率。



第十二章 同步发电机的并联运行

四、发电机负载情况下无功功率的调节

保持输出有功功率不变，用电势相量图分析发电机电枢电流 I 和励磁电流 I_f 的关系。

$$P_M = \frac{mE_0 U}{x_s} \sin \delta = \text{常数}$$

$$E_0 \sin \delta = \text{常数}$$

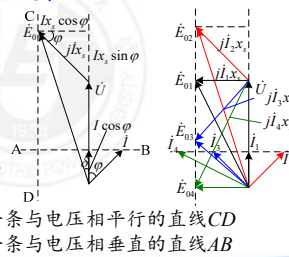
$$P_2 = mUI \cos \varphi = \text{常数}$$

$$I \cos \varphi = \text{常数}$$

$$P_M = P_2 \Rightarrow \frac{E_0 \sin \delta}{x_s} = I \cos \varphi$$

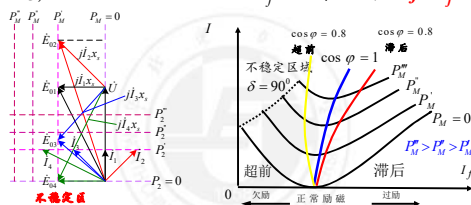
• \dot{E}_0 末端变化轨迹是一条与电压相平行的直线 CD

• \dot{I} 末端变化轨迹是一条与电压相垂直的直线 AB



第十二章 同步发电机的并联运行

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，电枢电流 I 和励磁电流 I_f 的关系曲线 $I=f(I_f)$



- 特点：**
- 1、每条曲线的最低点： $\cos\varphi=1$ ，连线向右倾斜；
 - 2、不稳定区域边缘： $\delta=90^\circ$ ，连线向右上倾斜；
 - 3、励磁电流增大时，电枢电流先减小后增大；
 - 4、每条曲线上的电流变化量 ΔI 为无功分量。



-37-

电力工程系

第十二章 同步发电机的并联运行

关于有功调节和无功调节的综合性结论

- (1) 调节并网同步发电机的励磁，可以改变其发出无功的大小及性质，并影响同步发电机的稳定性。
 - 过励磁发出感性无功，稳定性有所提高。
 - 欠励磁发出容性无功，稳定性有所降低。
- (2) 仅调节励磁时，无功改变的同时有功保持不变。
- (3) 仅调节原动机时，有功改变的同时无功随之改变。
- (4) 调节有功的同时若需保持无功不变，须相应调节励磁。
- (5) 有功调节受电枢绕组容量及静态稳定性的限制。
- (6) 无功调节时，过励受电枢绕组容量及励磁绕组容量限制；欠励受电枢绕组容量及静态稳定性限制。



-38-

电力工程系