

# 第三篇 同步电机

## 第十章

### 同步发电机的基本电磁关系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 本章基本要求

- 掌握电枢绕组磁动势对气隙磁场的影响
- 掌握隐极和凸极式同步发电机的基本电磁关系、电动势方程式、等值电路和相量图

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### § 10.1 同步发电机的空载运行

#### 一、同步发电机空载运行的电磁过程

**空载运行：**同步发电机转子被原动机拖到同步转速，转子绕组通入直流励磁电流而电枢绕组开路。

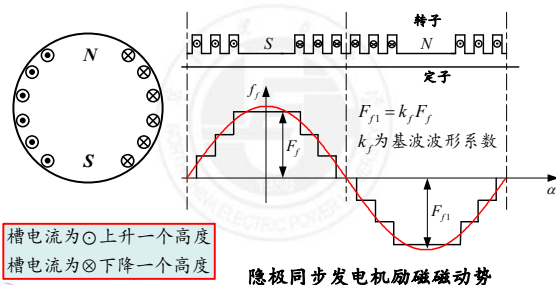
#### ■ 空载磁场建立过程



**问题：**发电机空载磁场由谁建立？ 同步发电机的空载磁路

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

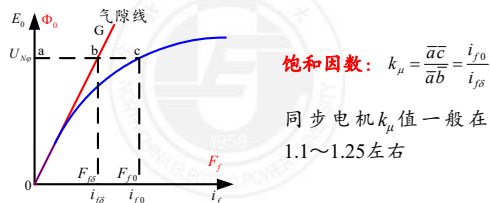
### 二、同步发电机空载运行分析



## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

**空载特性：**空载电动势 $E_0$ 与励磁电流 $i_f$ 之间的关系 $E_0=f(i_f)$ 。

空载特性是同步发电机的基本特性之一。

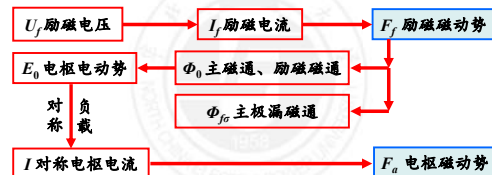


由于 $E_0 \propto \Phi_0$ ,  $i_f \propto F_f$ , 空载曲线反映了电机的磁化曲线。

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### § 10.2 对称负载时的电枢反应

#### 一、电机内主磁场的形成过程



#### ■ 电机内部的两个磁动势：

- 1) 励磁磁动势 $F_f$ ;
- 2) 电枢磁动势 $F_a$ 。

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### ■ 励磁磁动势和电枢磁动势的区别

	基波波形	大小	位置	转速
励磁磁动势 $F_f$	正弦波	由励磁电流决定	由转子位置决定	由原动机的转速决定
电枢磁动势 $F_a$	正弦波	由电枢电流决定	由电流瞬时值决定	由电流的 $f$ 和 $p$ 决定

### 二、电枢反应的定义

定义：负载时电枢磁动势基波对主极磁场基波的影响。

因此，电枢磁动势又称为**电枢反应磁动势**。



-7-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 三、研究电枢反应须了解的三个角&四个轴

- 1) 内功率因数角  $\psi$ :  $\dot{E}_0$  与  $i$  的时间相位角，与电机内部阻抗及负载有关；
- 2) 功率因数角  $\varphi$ :  $\dot{U}$  与  $i$  的时间相位角，与负载有关；
- 3) 功率角  $\delta$ :  $\dot{E}_0$  与  $\dot{U}$  的时间相位角。

三者关系:  $\psi = \varphi + \delta$

- 1) 直轴(纵轴,  $d$ 轴): 转子磁极轴线；
- 2) 交轴(横轴,  $q$ 轴): 与直轴成  $90^\circ$  电角度位置(相邻两磁极的中心线)。
- 3) 相轴: 每相绕组的轴线位置。
- 4) 时轴: 时间相量在其上的投影可得瞬时值。



-8-

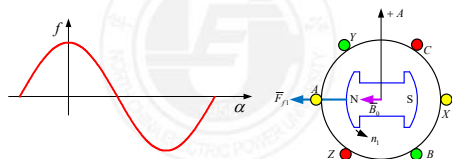
电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 四、电枢反应的分析方法——时空相失图

#### (1) 空间矢量

沿空间按正弦分布的量。



举例：励磁磁动势  $\bar{F}_{f1}$ ；磁通密度  $\bar{B}_0$ ；电枢磁动势  $\bar{F}_a$ 。

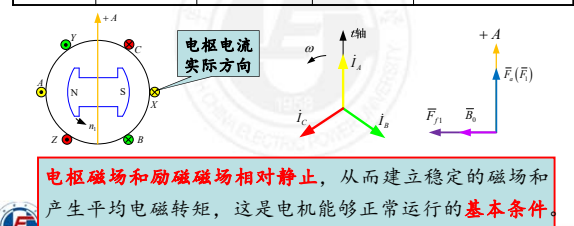


-9-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

	位置	方向	大小	转速
$\bar{F}_{f1}$ $\bar{B}_0$	磁极轴线(直轴)	N极指向	励磁电流大小有关	随转子同步旋转( $n$ )
$\bar{F}_a$ ( $\bar{F}_1$ )	三相电流瞬时值有关	电流瞬时方向成右手关系	电枢相电流大小有关	电枢电流频率 $f$ 和电机极对数 $p$ 有关( $n_1$ )



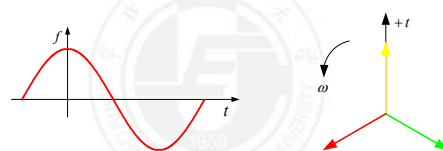
-10-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

#### (2) 时间相量

随时间按正弦规律变化的量。



举例：空载电动势  $\dot{E}_0$ 、电枢电流  $\dot{i}$ 、磁通量  $\Phi$ 。

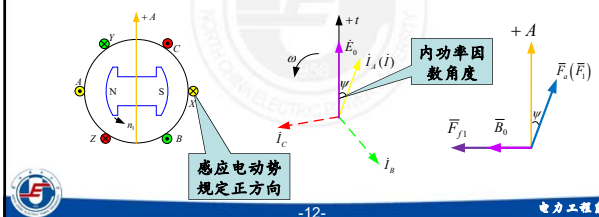


-11-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

	大小	相位	频率
$\dot{E}_0$ (A相)	由基波磁通量和转子的转速决定	由转子的位置和转子的极性确定	由电机的极对数与转子的转速决定
$\dot{i}$ (A相)	由感应电动势大小和一相绕组的阻抗决定	由感应电动势相位和阻抗角决定	由感应电动势的频率决定

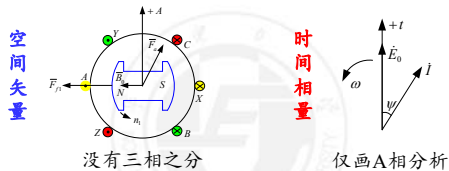


-12-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (3) 空间矢量与时间矢量的关系



	空间矢量 ( $F_{f1}, B_0, F_a$ )	时间矢量 ( $E_0, I, U, \Phi$ )
角速度	$\omega_{el} = 2\pi f$ ( $f = pn_1/60$ , $f = pn/60$ )	
两者关系	空间矢量与时间矢量旋转速度相同	



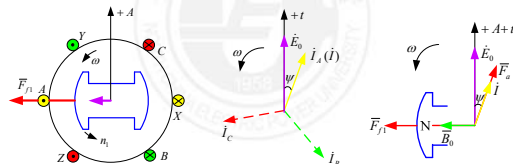
-13-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (4) 时空相失图

由于空间矢量和时间相量旋转的角速度都是 $\omega$ ，把空间轴线+A与时间轴线+t重合在一起，空间矢量和时间相量就画在同一张图里。



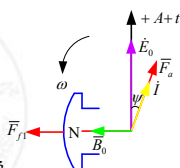
-14-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### ■ 时空相失图中各量有如下特点：

- 1)  $\dot{E}_0$ 总是落后于 $\vec{F}_{f1}$ 以90度；
- 2)  $i$ 与 $\dot{E}_0$ 之间相位差随着负载的性质不同而改变；
- 3)  $\vec{F}_a$ 总是与 $i$ 重合；
- 4)  $\vec{F}_a$ 与 $\vec{F}_{f1}$ 之间相对位置取决于 $\psi$ 角



电枢反应的性质是由 $\psi$ 角决定的，也就是说单机运行时电枢反应的性质是由负载的性质决定的。



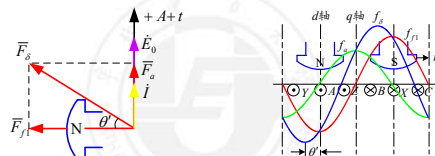
-15-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### ■ 不同 $\psi$ 角时的电枢反应

#### 1. $\psi = 0^\circ$ 时的电枢反应 (交轴电枢反应)



#### 交轴电枢反应的作用：

- 1) 交轴电枢反应磁动势使合成磁动势 $\vec{F}_s$ 较 $\vec{F}_{f1}$ 扭斜了 $\theta$ 角，幅值也有所增加。
- 2) 交轴电枢反应是实现机、电能量转换的必要条件。

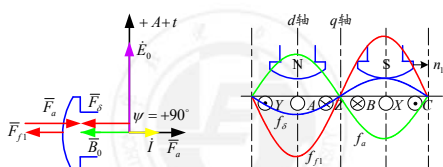


-16-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 2. $\psi = 90^\circ$ 时的电枢反应 (直轴电枢反应)



#### 直轴电枢反应的作用：

- 1) 直轴电枢反应磁动势起去磁作用，使气隙合成磁场减小。
- 2) 直轴电枢反应磁场与励磁磁场正对，不产生切向力和电磁转矩，不能进行机电能量转换。

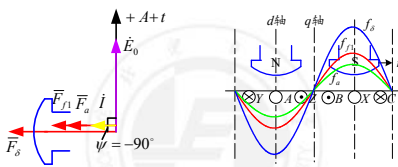


-17-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 3. $\psi = -90^\circ$ 时的电枢反应 (直轴电枢反应)



#### 直轴电枢反应的作用：

- 1) 直轴电枢反应磁动势起加磁作用，使气隙合成磁场增强。
- 2) 合成磁动势没有扭斜现象，所以不产生电磁转矩，不能进行机电能量转换。



-18-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 4. 一般情况下的电枢反应

$$\vec{F}_a = \vec{F}_{ad} + \vec{F}_{aq}$$

$$F_{ad} = F_a \sin \psi \quad \text{直轴电枢反应磁动势}$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi \quad \text{交轴电枢反应磁动势}$$

$$F_\delta = \sqrt{(F_{f1} \pm F_{ad})^2 + F_{aq}^2}$$

$$0^\circ < \psi < 90^\circ$$

- 1)  $F_{aq}$  使气隙磁场扭斜, 实现机电能量转换。
- 2)  $F_{ad}$  对励磁磁动势起去磁或加磁作用。

把电流  $\vec{I}$  也分解成  $\vec{I}_d$  和  $\vec{I}_q$  两个分量:

$$\vec{I} = \vec{I}_d + \vec{I}_q \quad I_d = I \sin \psi \quad I_q = I \cos \psi$$



-19-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### § 10.3 隐极同步发电机的电动势方程式、同步电抗和相量图

#### 一、不考虑饱和时的电动势方程式、同步电抗和相量图

##### (1) 电磁关系

$$i_f \text{ 励磁电流} \rightarrow \vec{F}_{f1} \rightarrow \vec{\Phi}_0 \rightarrow \vec{E}_0$$

$$\vec{I} \text{ 定子三相电流} \rightarrow \vec{F}_a \rightarrow \vec{\Phi}_a \rightarrow \vec{E}_a$$

$$\vec{I} \text{ 定子三相电流} \rightarrow \vec{\Phi}_\sigma \rightarrow \vec{E}_\sigma$$

$$\vec{E}_\delta = \vec{E}_0 + \vec{E}_a$$

$$\vec{E}_\delta \text{ 与 } \vec{U} + \vec{I}r_a \text{ 平衡}$$

**问题:** 励磁电流除了产生主磁通之外还产生漏磁通, 为何没有出现在电磁关系中?



-20-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (2) 电枢反应电抗

$$\vec{E}_a = -j4.44 f N_1 k_{w1} \vec{\Phi}_a$$

$$E_a \propto \Phi_a \propto F_a \propto I$$

$$\vec{E}_a \text{ 落后 } \vec{\Phi}_a 90^\circ, \vec{\Phi}_a \text{ 与 } \vec{I} \text{ 同相位} \rightarrow \vec{E}_a \text{ 落后 } \vec{I} 90^\circ \quad \left. \begin{array}{l} \vec{E}_a = -j\vec{I}x_a \end{array} \right\}$$

**定义:**  $x_a$  为电枢反应电抗。理解为三相对称电流系统联合产生的电枢反应磁场所感应于一相中的电动势与相电流的比值, 是一个等效电抗。

### (3) 漏电抗

$$\vec{E}_\sigma = -j\vec{I}x_\sigma$$

**定义:**  $x_\sigma$  为漏电抗。



-21-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (4) 电动势平衡方程式

$$\vec{E}_0 + \vec{E}_a + \vec{E}_\sigma = \vec{U} + \vec{I}r_a$$

$$\vec{E}_0 = \vec{U} + \vec{I}r_a + j\vec{I}x_a + j\vec{I}x_\sigma = \vec{U} + \vec{I}[r_a + j(x_a + x_\sigma)] = \vec{U} + \vec{I}(r_a + jx_s)$$

**定义:**  $x_s = x_a + x_\sigma$  为同步电机的同步电抗。

**同步电抗** 是表征对称稳态运行时电枢反应磁场和电枢漏磁场的一个综合参数, 即 **三相对称电枢电流所产生的全部磁通在某一相中所感应的总电动势与相电流之间的比例常数**。同步电抗是同步电机的基本参数之一。

$$\text{气隙电动势: } \vec{E}_\delta = \vec{E}_0 + \vec{E}_a = \vec{U} + \vec{I}r_a + j\vec{I}x_\sigma$$



-22-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### ■ 有关电抗的进一步说明

- ① **电枢反应电抗与漏电抗均为等效参数**。应理解为: 三相对称电流共同建立的电枢反应磁场/漏磁场, 在 不计铁心饱和 的情况下, 对一相绕组产生的影响。
- ② **同步电抗为综合参数**。应理解为: 隐极同步电机对称稳态运行且 不计铁心饱和 时的电枢反应磁场以及漏磁场, 对一相绕组产生的综合影响。
- ③ 当频率一定时, 电抗大小与一相绕组有效匝数平方成正比, 且与磁路几何尺寸及材料磁导率有关。
- ④ 上述 **电抗均为一相的参数**, 并且可由实验方法测出。

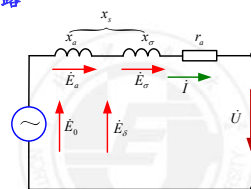


-23-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (5) 等效电路



$$\vec{E}_0 + \vec{E}_a + \vec{E}_\sigma = \vec{U} + \vec{I}r_a$$

$$\vec{E}_0 = \vec{U} + \vec{I}r_a + j\vec{I}x_a + j\vec{I}x_\sigma = \vec{U} + \vec{I}r_a + j\vec{I}x_s$$

$$\vec{E}_\delta = \vec{E}_0 + \vec{E}_a = \vec{U} + \vec{I}r_a + j\vec{I}x_\sigma$$



-24-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

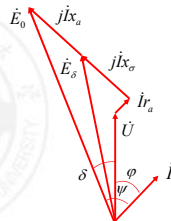
### (6) 相量图

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}r_a$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_a + j\dot{I}x_\sigma$$

$$= \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_s$$

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_\sigma$$



回顾：各角度的物理意义是什么？



-25-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

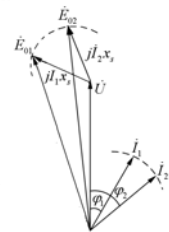
例：一台隐极同步发电机，分别在 $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi_1$ (滞后)与 $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi_2$ (滞后)两种情况下运行。其中 $U$ 和 $I$ 保持不变，而 $\cos\varphi_1 > \cos\varphi_2$ ，问哪一种情况下所需的励磁电流大？为什么？

解：忽略电枢电阻 $r_a$

定量分析：由相量图可知： $I_1 x_s = I_2 x_s$

因此， $E_{02} > E_{01} \Rightarrow i_{f2} > i_{f1}$

定性分析：由于在滞后的功率因数时，愈小，电枢反应去磁作用愈强，为了获得一样的端电压，必须增大励磁。



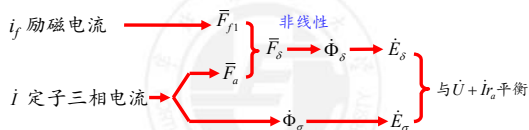
-26-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 二、考虑饱和时的磁动势—电动势相失图

#### (1) 电磁关系



定义： $\bar{F}_\delta = \bar{F}_{f1} + \bar{F}_a$  为气隙基波合成磁动势。

#### (2) 电动势平衡方程式

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_\sigma$$



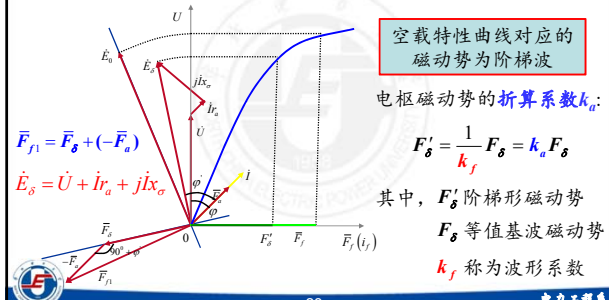
-27-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (3) 磁动势—电动势相失图\*

已知 $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi$ 、 $r_a$ 和 $x_\sigma$ 以及空载特性，以感性负载为例。



空载特性曲线对应的磁动势为阶梯波

电枢磁动势的折算系数 $k_a$ :

$$F'_\delta = \frac{1}{k_f} F_\delta = k_a F_\delta$$

其中， $F'_\delta$  阶梯磁动势  
 $F_\delta$  等值基波磁动势  
 $k_f$  称为波形系数



-28-

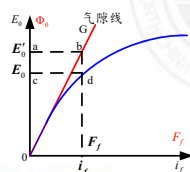
电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (4) 同步发电机单机运行时的电压调整率\*

定义：同步发电机单机运行，保持发电机额定运行时的励磁电流不变，甩掉全部负荷后的端电压增量与额定电压之比，称为同步发电机的电压调整率，即：

$$\Delta U = \frac{E_0|_{I_f=I_{fN}} - U_{N\varphi}}{U_{N\varphi}} \times 100\%$$



显然：若不考虑饱和，励磁电动势采用气隙线上的值，电压调整率与实际相差甚远。



-29-

电力工程系

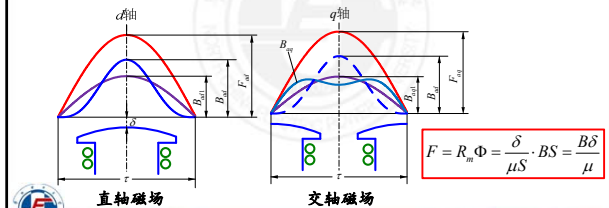
## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### § 10.4 凸极同步发电机的双反应理论

#### 一、同步发电机空载运行的电磁过程

思考：1) 凸极同步发电机的气隙特点是什么？

2) 这样的气隙对电机磁场有什么影响？



$$F = R_m \Phi = \frac{\delta}{\mu S} \cdot BS = \frac{B\delta}{\mu}$$

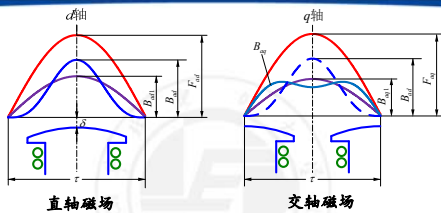


-30-

电力工程系



## 第十章 同步发电机的基本电磁关系



**结论：**相同的电枢磁势置于不同位置时，形成不同的电枢反应磁通。

发电机运行过程中  $\vec{F}_a$  相对于转子的位置 ( $90^\circ + \psi$ ) 无法确定，面对不确定的气隙长度，磁场计算困难，如何解决？

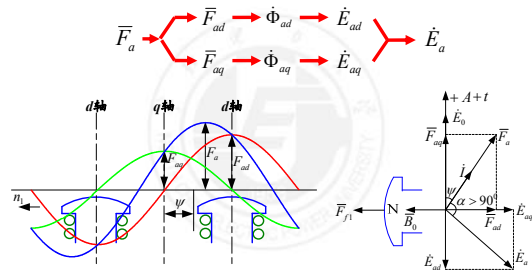


-31-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### 二、双反应理论



**应用前提：**不考虑饱和。



-32-

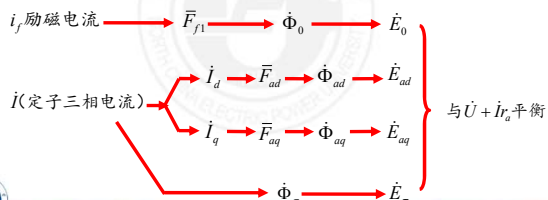
电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### § 10.5 凸极同步发电机的电动势方程式、同步电抗和相量图

#### 一、不考虑饱和时

##### (1) 电磁关系



-33-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (2) 电动势方程式

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}r_a$$

由于:  $E_{ad} \propto \Phi_{ad} \propto F_{ad} \propto I_d$       $E_{aq} \propto \Phi_{aq} \propto F_{aq} \propto I_q$

**定义:**  $\dot{E}_{ad} = -jI_d x_{ad}$       $\dot{E}_{aq} = -jI_q x_{aq}$

$x_{ad}$ 、 $x_{aq}$  分别为直轴电枢反应电抗和交轴电枢反应电抗。

电抗大小:  $x_{ad} \propto N^2 \Lambda_{ad}$       $x_{aq} \propto N^2 \Lambda_{aq}$

1) 凸极电机:  $\because \Lambda_{ad} > \Lambda_{aq} \therefore x_{ad} > x_{aq}$

2) 隐极电机:  $\because \Lambda_{ad} = \Lambda_{aq} \therefore x_{ad} = x_{aq} = x_a$



-34-

电力工程系

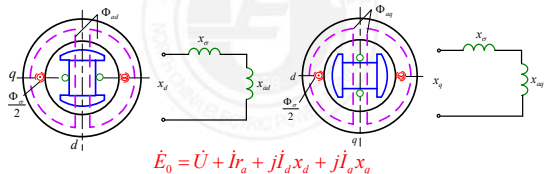
## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

电动势方程式可以进一步写成:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_\sigma + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d (x_{ad} + x_\sigma) + j\dot{I}_q (x_{aq} + x_\sigma)$$

**定义:**  $x_d = x_{ad} + x_\sigma$  为凸极同步发电机的直轴同步电抗;

$x_q = x_{aq} + x_\sigma$  为凸极同步发电机的交轴同步电抗。



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q$$



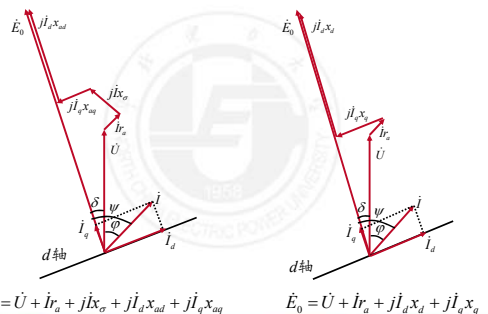
**比较:**  $x_d$ 、 $x_q$  哪个大?

-35-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (3) 相量图



-36-

电力工程系

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

■ 问题：绘制相量图时 $d$ 、 $q$ 轴未知，无法得到 $I_d$ 和 $I_q$ 分量？

如：已知 $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi$ 、 $r_a$ 、 $x_{ad}$ 、 $x_{aq}$ 和 $x_\sigma$ ，感性负载，

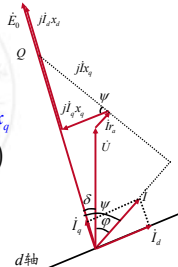
转子位置未知（ $\psi$ 未知）。

解决办法：

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q \\ &= \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + j\dot{I}_d x_q - j\dot{I}_d x_q \\ &= \dot{U} + \dot{I}r_a + j(\dot{I}_d + \dot{I}_q)x_q + j\dot{I}_d(x_d - x_q) \\ &= \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_q + j\dot{I}_d(x_d - x_q)\end{aligned}$$

$$\text{令：}\dot{E}_Q = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_q$$

$$\text{则：}\dot{E}_0 = \dot{E}_Q + j\dot{I}_d(x_d - x_q)$$



-37-

电力工程

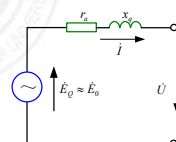
## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_q + j\dot{I}_d(x_d - x_q) = \dot{E}_Q + j\dot{I}_d(x_d - x_q)$$

由图可求得：

$$\psi = \tan^{-1} \frac{I x_q + U \sin \varphi}{I r_a + U \cos \varphi}$$

近似等效电路：



-38-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

### (4) 利用相量图求解实际问题的举例

例1：一台凸极同步发电机直轴同步电抗 $x_d^* = 1.0$ 、交轴同步电抗 $x_q^* = 0.6$ ，电枢电阻略去不计。试计算发电机发出额定电压、额定功率 $\cos\varphi = 0.8$ （滞后）时的励磁电动势（不计饱和）。

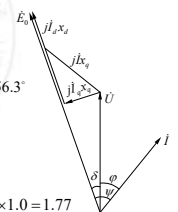
解：  $\varphi = \cos^{-1} 0.8 = 36.8^\circ$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{I^* x_q^* + U^* \sin \varphi}{U^* \cos \varphi} = \tan^{-1} \frac{1 \times 0.6 + 1 \times 0.6}{1 \times 0.8} = 56.3^\circ$$

$$\delta = \psi - \varphi = 56.3^\circ - 36.8^\circ = 19.5^\circ$$

$$I_d^* = I^* \sin \psi = 1 \times \sin 56.3^\circ = 0.832$$

$$E_0^* = U^* \cos \delta + I_d^* x_d^* = 1.0 \times \cos 19.5^\circ + 0.832 \times 1.0 = 1.77$$



-39-

电力工程

## 第十章 同步发电机的基本电磁关系

例2：已知 $U^* = 1$ 、 $E_0^* = 1.5$ 、 $\delta = 30^\circ$ 、 $x_d^* = 1$ 、 $x_q^* = 0.8$ 、 $r_a^* = 0$ ，试求：

电枢电流的标幺值及其有功、无功分量（不计饱和）

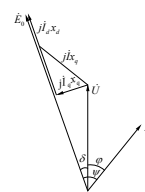
解：方法是定性做出相量图，然后找几何关系求解

$$I_q^* x_q^* = U^* \sin \delta \Rightarrow I_q^* = \frac{U^* \sin \delta}{x_q^*}$$

$$I_d^* x_d^* = E_0^* - U^* \cos \delta \Rightarrow I_d^* = \frac{E_0^* - U^* \cos \delta}{x_d^*}$$

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}} \quad \psi = \tan^{-1} \frac{I_d^*}{I_q^*} \quad \varphi = \psi - \delta$$

$$I_{有功}^* = I^* \cos \varphi \quad I_{无功}^* = I^* \sin \varphi$$



-40-

电力工程

注意：不要混淆电流的 $d$ - $q$ 分解与电流的有功、无功分解