



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

#### 一、凸极同步发电机的电动势方程

同步发电机负载运行时，气隙中存在着两种**旋转磁场**

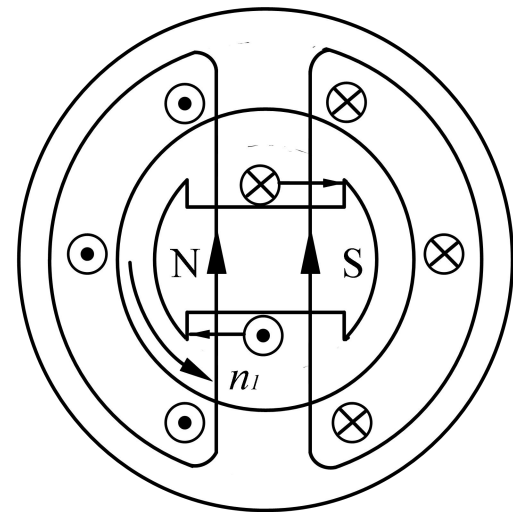
电枢旋转磁场

励磁旋转磁场

在**不计饱和**的情况下，空载特性是一个线性函数，因此可以应用**叠加原理**进行分析。即，把电枢磁场和励磁磁场作为相互独立的磁场叠加于同一磁路中，这些磁场各自在定子绕组中感应电动势。



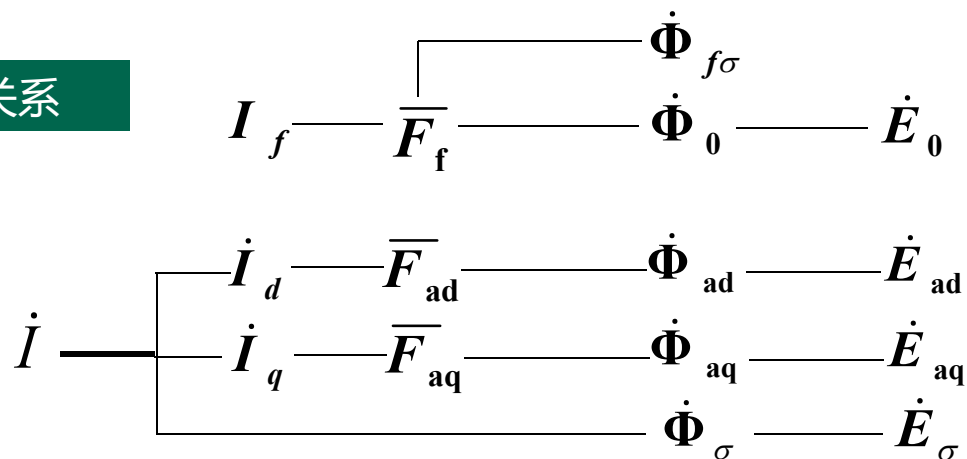
由于凸极式结构使得**电机定、转子之间的**气隙**不均匀**，同一电枢磁动势作用在直轴和交轴时得到的磁通量不同。为此，需要利用**双反应理论**进行分析。



## 一、凸极同步发电机的电动势方程

**双反应理论：**在一般情况下，可以把 $F_a$ 分解成直轴分量 $F_{ad}$ 和交轴分量 $F_{aq}$ ，分别求出直轴和交轴磁动势的电枢反应，然后把它们的效果叠加起来。

## 电磁关系

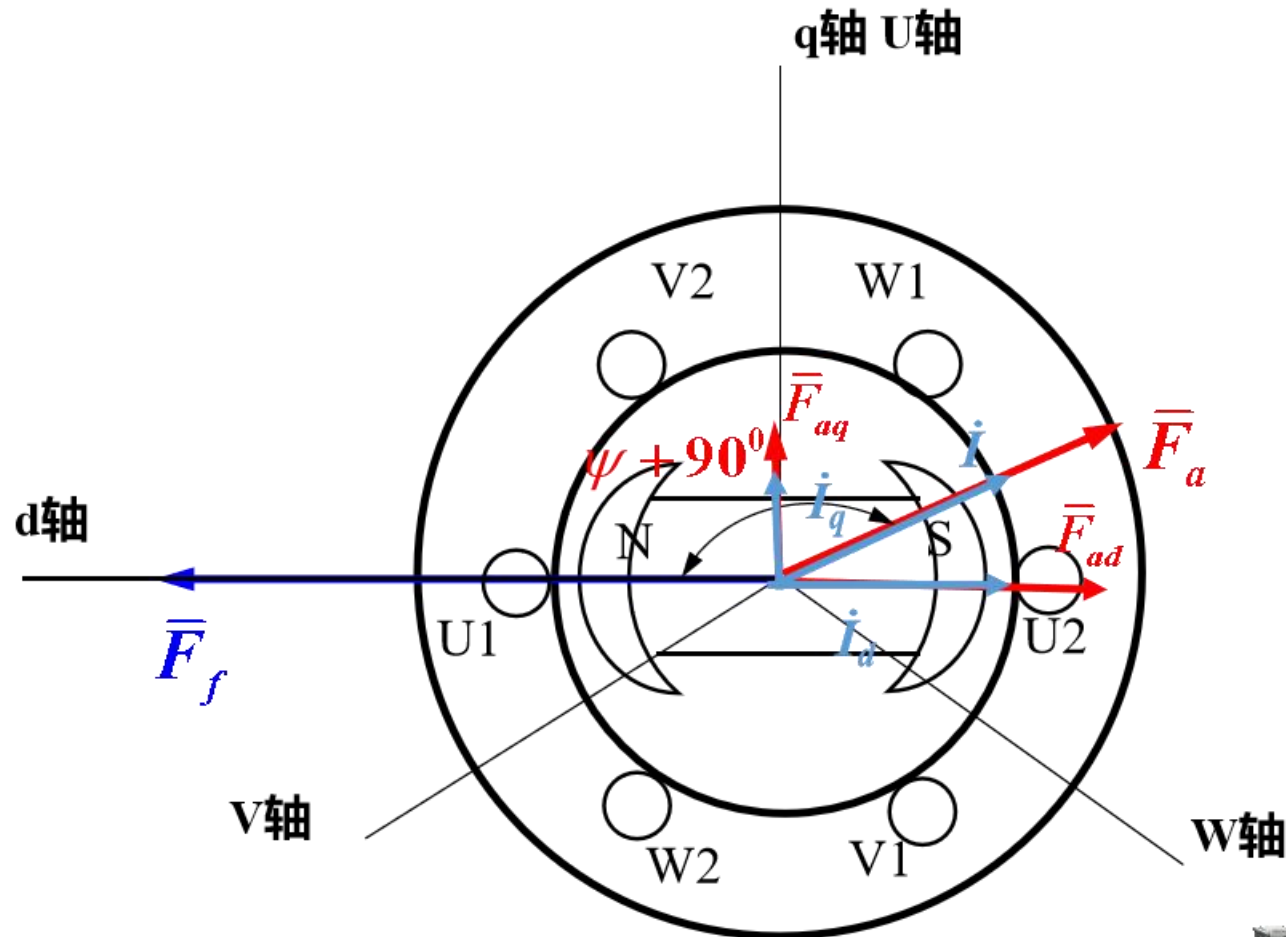


## 不计磁路饱和时有下列关系

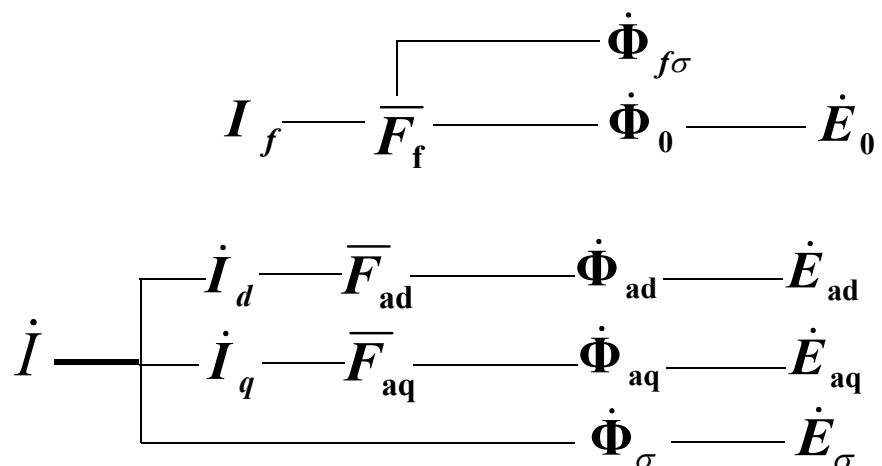
$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}$$

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$$

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I} X_\sigma$$



## 一、凸极同步发电机的电动势方程



$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}$$

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$$

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I} X_\sigma$$

## 电动势平衡方程

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

$$\dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_{ad} - j\dot{I}_q X_{aq} - j\dot{I} X_\sigma = \dot{U} + \dot{I} R_a$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} + j\dot{I} X_\sigma$$

由于  $\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$

且令  $X_d = X_{ad} + X_\sigma$   $X_d$  --直轴同步电抗  
 $X_q = X_{aq} + X_\sigma$   $X_q$  --交轴同步电抗

$X_d$ 、 $X_q$ 分别表征在对称负载下，单位直轴或交轴三相电流产生的总电枢磁场在电枢每一相绕组中感应的电动势。

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + R_a \dot{I} + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q$$



## 二、凸极同步发电机的相量图

同步发电机带有感性负载，已知端电压 $U$ ，负载电流 $I$ ，内功率因数角 $\psi$ ，功率因数 $\cos\varphi$ ，以及参数 $R_a$ ， $X_d$ ， $X_q$ 。画出凸极同步发电机电枢回路电动势关系的相量图。

(1)根据已知条件绘出 $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 。

(2)确定内功率因数角 $\psi$ 。 ①定义电动势 $\dot{E}_Q$ 。  $\dot{E}_Q = \dot{U} + R_a \dot{I} + jX_q \dot{I}$

作相量 $\overrightarrow{OQ} = \dot{E}_Q = \dot{U} + R_a \dot{I} + jX_q \dot{I}$  图中 $\overrightarrow{MQ} = jX_q \dot{I}$

$\dot{E}_Q$ 是为确定内功率因数角 $\psi$ 而虚构的一个电动势，没有物理意义。

②根据式  $\dot{E}_0 = \dot{U} + R_a \dot{I} + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q$  可得  $\dot{E}_0 - \dot{E}_Q = j(X_d - X_q)\dot{I}_d$

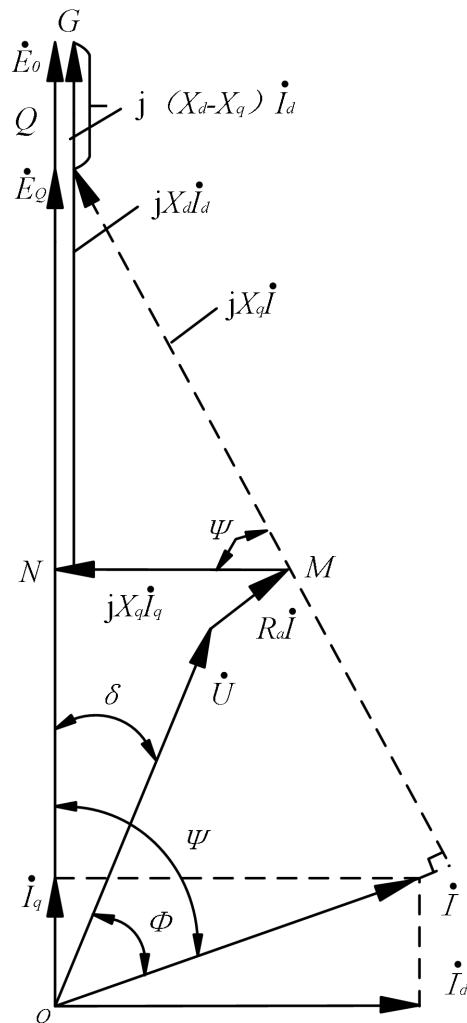
$\dot{E}_Q$ 与 $\dot{I}$ 的夹角及 $\dot{E}_0$ 与 $\dot{I}$ 的夹角 $\angle\psi$ 。

③由图上M点作垂直于OQ的相量于N点，则在 $\triangle MNQ$ 中， $\angle QMN = \angle\psi$ ；

$$\overrightarrow{MN} = X_q I_q \quad \overrightarrow{MQ} = \frac{\overrightarrow{MN}}{\cos\psi} = X_q I \quad \Psi = \arctan\left(\frac{X_q I + U \sin\varphi}{R_a I + U \cos\varphi}\right)$$

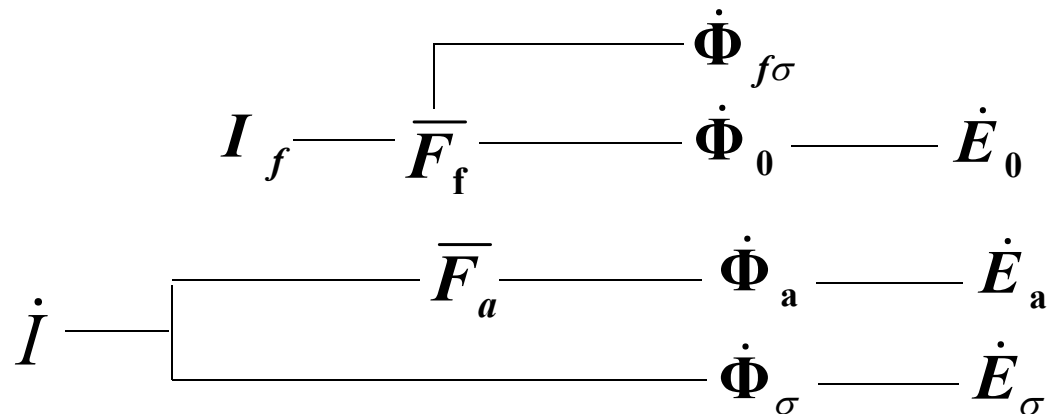
(3)根据 $\angle\psi$ 将 $I$ 正交分解，作出 $I_q$ 、 $I_d$ 。

(4)由 $\dot{E}_0 = j(X_d - X_q)\dot{I}_d + \dot{E}_Q$ ，延长OQ至G。  $\overrightarrow{QG} = j(X_d - X_q)\dot{I}_d$  OG即为 $\dot{E}_0$ 。



## 一、电动势方程

电磁关系：



隐极式同步发电机气隙均匀，其直轴和交轴磁阻相等，令 $X_d=X_q=X_t$ ，可以直接从凸极同步发电机的电动势方程式得到隐极同步发电机的电动势方程式：

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_t$$

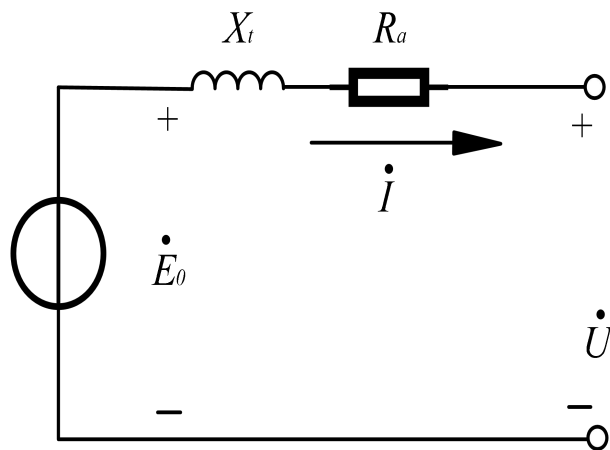
$$X_t = X_a + X_\sigma$$

$X_t$  --同步电抗

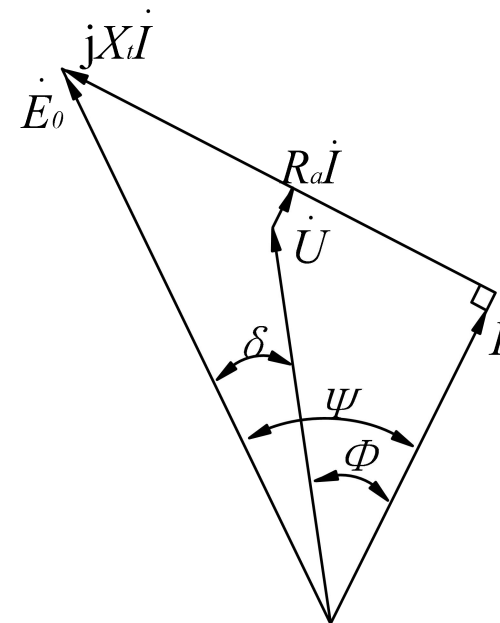
➤  $X_t$  表征在对称负载下，单位三相电流产生的电枢总磁场在电枢每一相绕组中感应的电动势。



### 二、等效电路和相量图



等效电路



相量图

根据相量图可求出

$$E_0 = \sqrt{(U \cos \varphi + R_a I)^2 + (U \sin \varphi + X_t I)^2}$$

$$\psi = \arctan \frac{X_t I + U \sin \varphi}{R_a I + U \cos \varphi}$$





**例：**一凸极同步发电机的直轴和交轴同步电抗分别为 $X_d^*=1.0$ ， $X_q^*=0.6$ ，电枢电阻忽略。试计算额定电压、额定电流且 $\cos\varphi=0.8$ （滞后）时的励磁电动势 $E_0^*$ 。

**解：**以发电机端电压 $\dot{U}$ 作为参考相量，即设 $\dot{U}^*=1.0\angle 0^\circ$ ，又 $\cos\varphi=0.8$ （滞后）则：

$$\dot{I}^*=1.0\angle -36.8^\circ$$

$$\text{电动势 } \dot{E}_Q^* \text{ 为: } \dot{E}_Q^* = \dot{U}^* + jX_q^* \dot{I}^* = 1.0\angle 0^\circ + j0.6 \times \angle -36.8^\circ = 1.44\angle 19.4^\circ$$

$$\text{所以: } \psi = 19.4^\circ + 36.8^\circ = 56.2^\circ$$

$$I_d^* = I^* \sin\psi = 1 \times \sin 56.2^\circ = 0.832$$

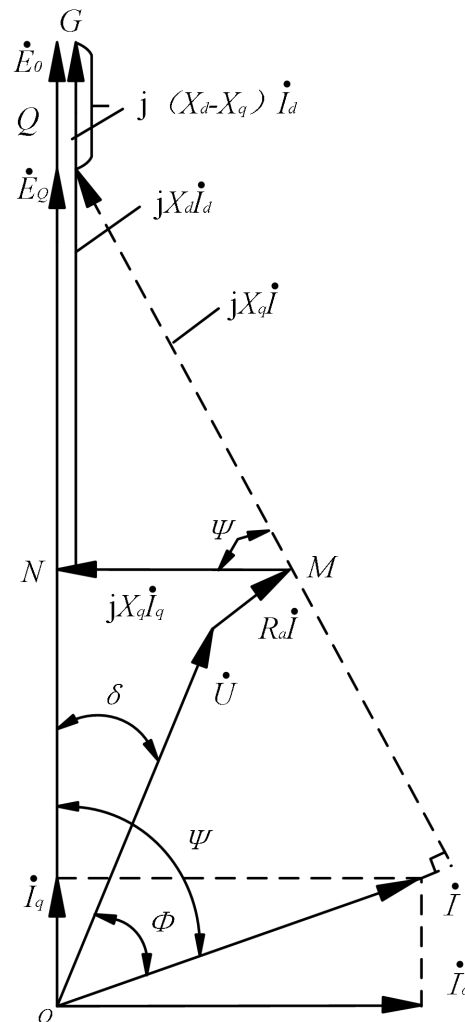
$$\dot{I}_d^* = 0.832\angle (19.4^\circ - 90^\circ) = 0.832\angle -70.6^\circ$$

$$I_q^* = I^* \cos\psi = 1 \times \cos 56.2^\circ = 0.555$$

$$\dot{I}_q^* = 0.555\angle 19.4^\circ$$

故励磁电动势为：

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + jX_d^* \dot{I}_d^* + jX_q^* \dot{I}_q^* = 1.0\angle 0^\circ + j1 \times 0.832\angle -70.6^\circ + j0.6 \times 0.555\angle 19.4^\circ = 1.77\angle 19.4^\circ$$



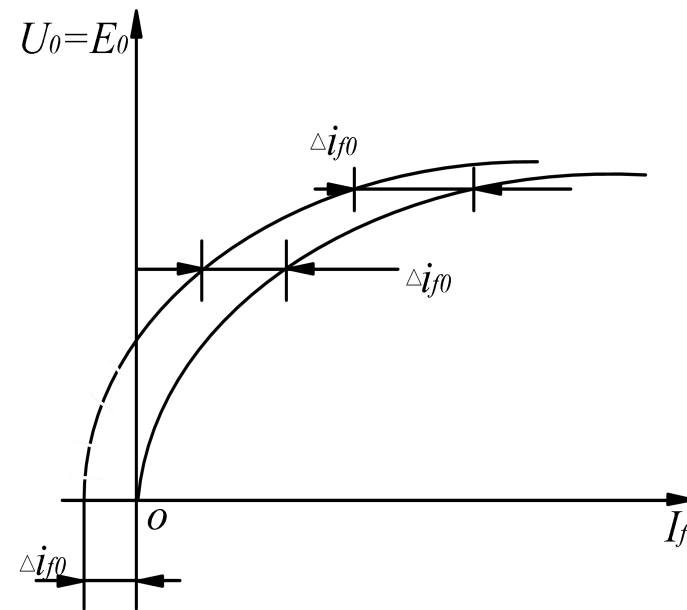
当同步发电机保持同步转速旋转， $\cos\varphi$ 不变，当发电机的端电压 $U$ ，电枢电流 $I$ 和励磁电流 $I_f$ 中保持其中一个量不变，其它两个量之间的关系：即空载特性、短路特性、外特性和调整特性。

## 一、空载特性

发电机转速为同步转速 $n_1$ ，电枢开路( $I=0$ )，空载电压 $U_0$ ( $U_0=E_0$ )与励磁电流 $I_f$ 的关系，称为空载特性，记为 $U_0=f(I_f)$ 。

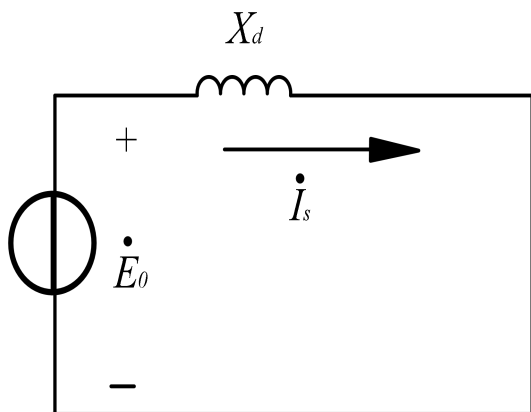
### 空载特性

- 一方面表征了磁路的饱和情况；
- 另一方面把它和短路特性、零功率因数负载特性配合，可确定电机的基本参数、额定励磁电流和电压变化率等。

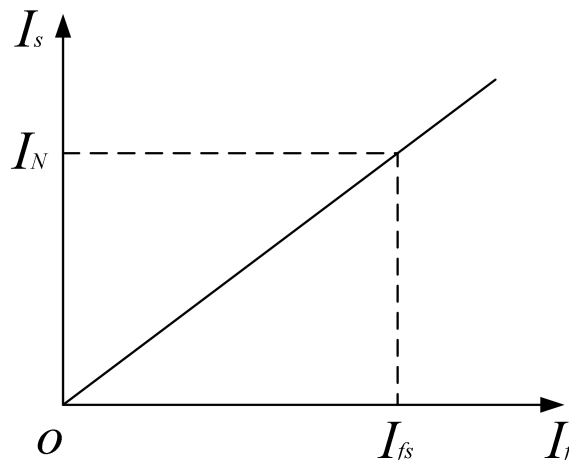


## 二、短路特性

发电机转速为同步转速 $n_1$ ,电枢绕组端点三相短接时,电枢短路电流与励磁电流的关系,称为**短路特性**,记为 $I_s=f(I_f)$ 。



短路时的等效电路



短路特性曲线

去磁作用,发电机中气隙合成磁动势数值很小,磁路处于不饱和状态,所以短路特性曲线为一直线,即

$$I_s = \frac{E_0}{X_d} \propto I_f$$

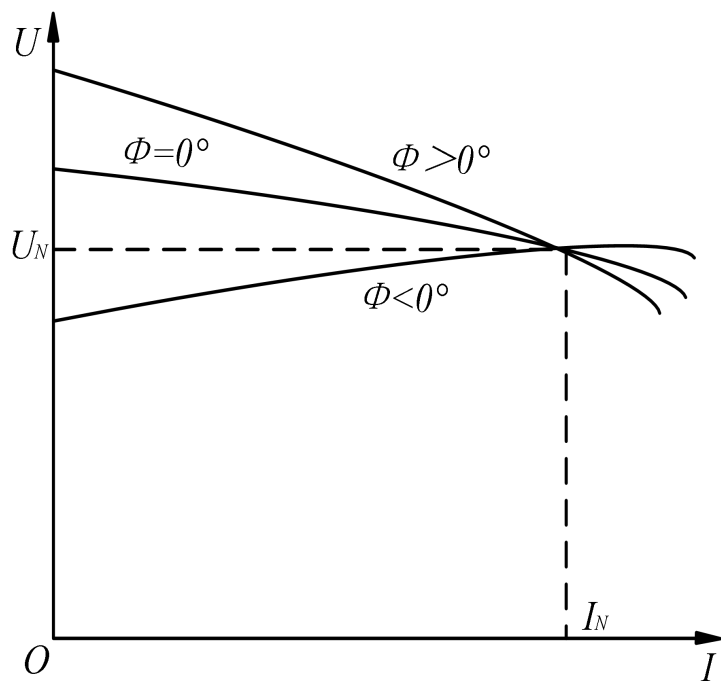
### 短路特性

- 限制短路电流的仅是发电机的内部阻抗;
- 电枢电阻远小于同步电抗,短路电流可认为是**纯感性的**;
- 电枢电流几乎全部为直轴电流;
- 电枢磁动势基本上是一个**纯去磁作用的直轴磁动势** $F_a=F_{ad}, F_{aq}=0$ 。



### 三、外特性

发电机转速为同步转速 $n_1$ ，励磁电流 $I_f$ 与负载功率因数 $\cos\varphi$ 不变时，端电压与负载电流的关系，称为**外特性**，记为 $U=f(I)$ 。



外特性曲线

➤ 当发电机带**阻性和感性负载**时，外特性是下降的，原因是电枢反应的去磁作用和电枢漏阻抗产生了电压降。

➤ 带**容性负载**时且（发电机负载的容抗大于同步电抗）时，外特性是上升的，原因是电枢反应的助磁作用和容性电流在漏抗上的压降。

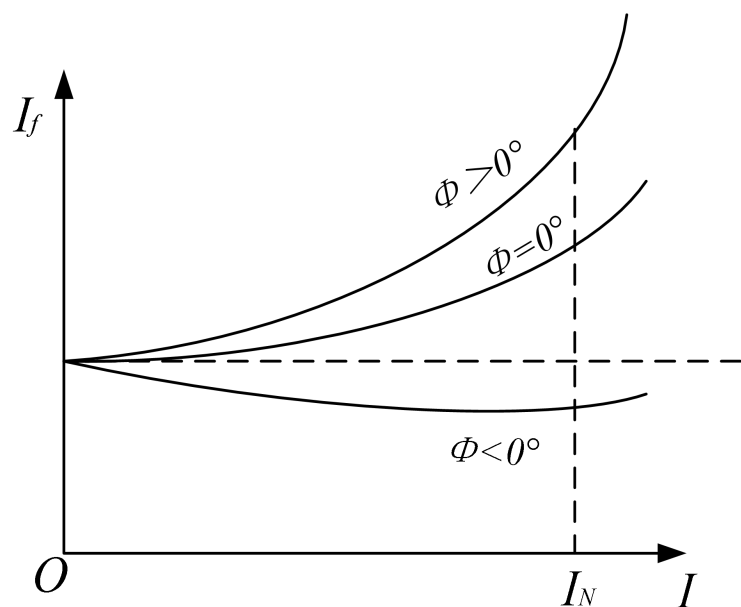
由外特性可以求出发电机的**电压调整率**  $\Delta U\% = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$

电压调整率是表征同步发电机运行性能的重要数据之一。



## 四、调整特性

发电机转速为同步转速 $n_1$ ，保持端电压 $U$ 与负载功率因数 $\cos\varphi$ 不变时，励磁电流与负载电流的关系，称为调整特性，记为，记为 $I_f=f(I)$ 。



调整特性曲线

### 感性和阻性负载时

- 随着负载电流的增加，必须增加励磁电流
- 补偿电枢反应的去磁作用和漏阻抗压降，保持端电压恒定

### 对容性负载

- 随着负载电流的增加，必须减小励磁电流

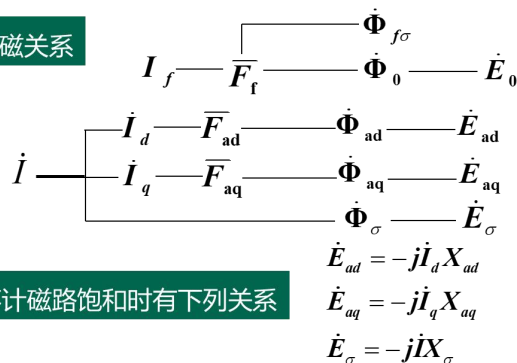
➤ 在功率因数一定情况下，根据调整特性曲线，可确定在负载变化范围内，维持电压不变所需的励磁电流的变化范围。



# 小结

凸极机

电磁关系



不计磁路饱和时有下列关系

$$\begin{aligned} E_{ad} &= -jI_d X_{ad} \\ E_{aq} &= -jI_q X_{aq} \\ E_{\sigma} &= -jIX_{\sigma} \end{aligned}$$

由于  $I = I_d + I_q$

且令  $X_d = X_{ad} + X_{\sigma}$   $X_q = X_{aq} + X_{\sigma}$   
 $X_d$  -- 直轴同步电抗  
 $X_q$  -- 交轴同步电抗

➤  $X_d$ 、 $X_q$  分别表征在对称负载下，单位直轴或交轴三相电流产生的总电枢磁场在电枢每一相绕组中感应的电动势。

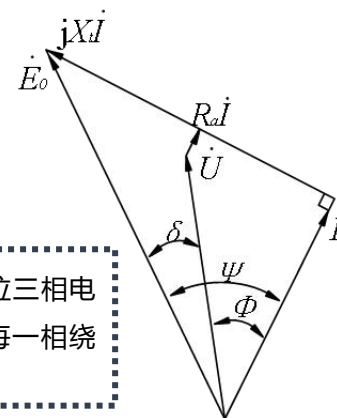
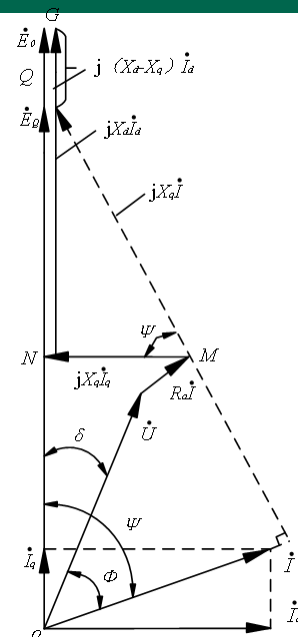
$$\dot{E}_0 = \dot{U} + R_a \dot{I} + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q$$

则电动势平衡方程

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

$$\dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_{ad} - j\dot{I}_q X_{aq} - j\dot{I}X_{\sigma} = \dot{U} + \dot{I}R_a$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} + j\dot{I}X_{\sigma}$$



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_t$$

$$X_t = X_d + X_q$$

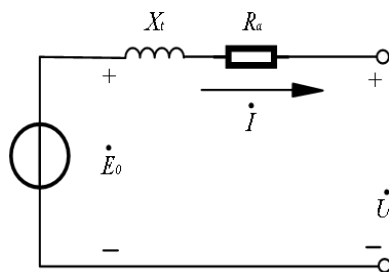
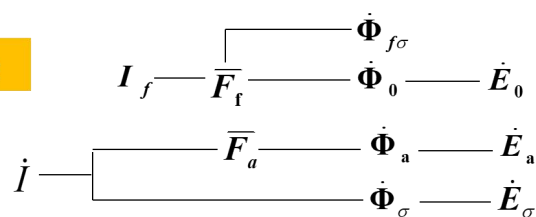
$X_t$  -- 同步电抗

➤  $X_t$  表征在对称负载下，单位三相电流产生的电枢总磁场在电枢每一相绕组中感应的电动势。

同步电机  
负载运行

隐极机

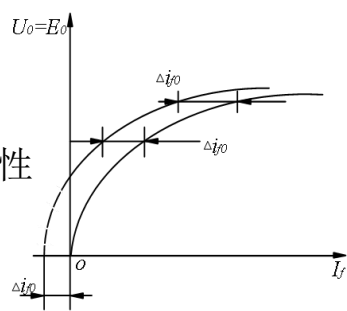
电磁关系:



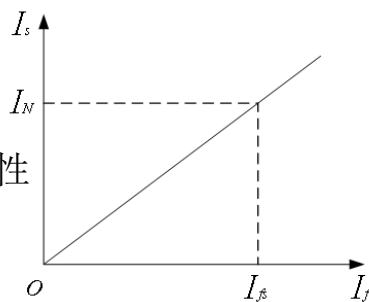
$$E_0 = \sqrt{(U \cos \varphi + R_a I)^2 + (U \sin \varphi + X_t I)^2} \quad \psi = \arctan \frac{X_t I + U \sin \varphi}{R_a I + U \cos \varphi}$$

同步发电  
机特性

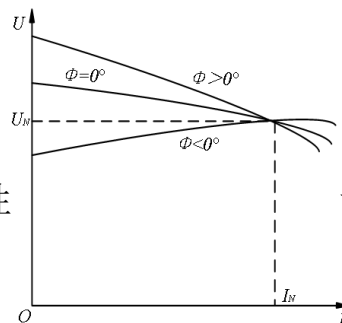
空载特性



短路特性



外特性



调整特性

