



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

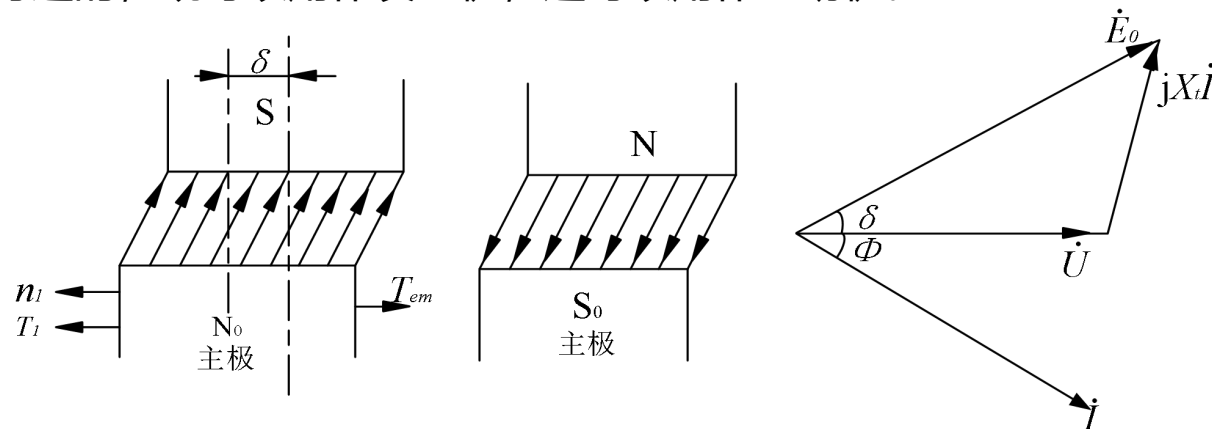
6.7 同步电动机的电力拖动

一、同步电机的可逆原理

同步电机的运行是可逆的，既可以用作发电机，还可以用作电动机。

(1) 同步电机运行于发电机状态时

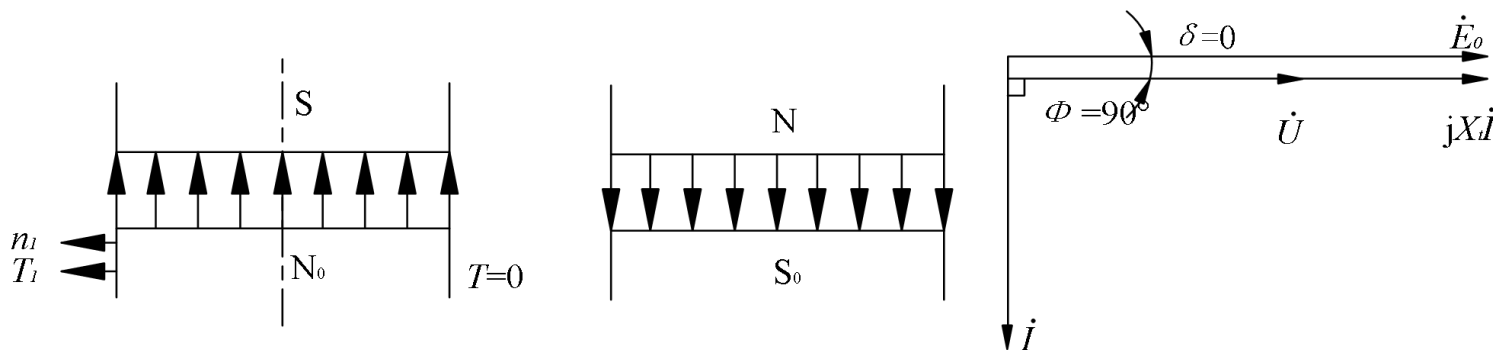
- 转子主磁极轴线超前于气隙合成磁场的等效磁极轴线一个功角 δ ； n_1 、 T_1
- T_{em} 与 T_1 平衡，机械功率转变为电功率输送给电网；
- P_{em} 和功角 δ 均为正；
- 励磁电动势 E_0 超前于电网电压 U 一个 δ 角。



(a) 发电机状态

(2) 逐步减小发电机的输入功率

- 转子将瞬时减速， δ 角减小， P_{em} 也减小；
- 当 δ 减小到零时， $P_{em}=0$ ，发电机的输入功率只能抵偿空载损耗；
- 空载运行，不向电网输送功率。



(b) 瞬态



一、同步电机的可逆原理

(3) 继续减小发电机的输入功率

- δ 和 P_{em} 变为负值;
- 从电网吸收功率+原动机一起克服空载制动转矩, 供给空载损耗;

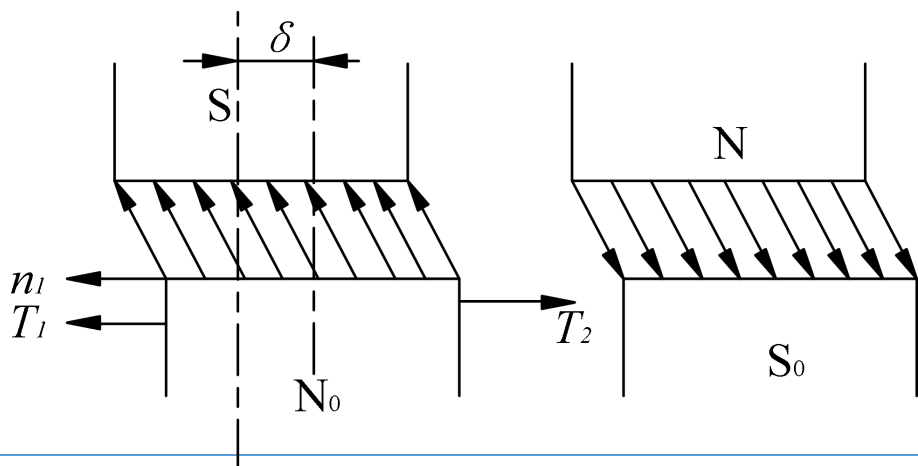
➤ 转子受到一个驱动性质的电磁转矩作用。机电过程由此发生逆变。

(4) 再卸掉原动机

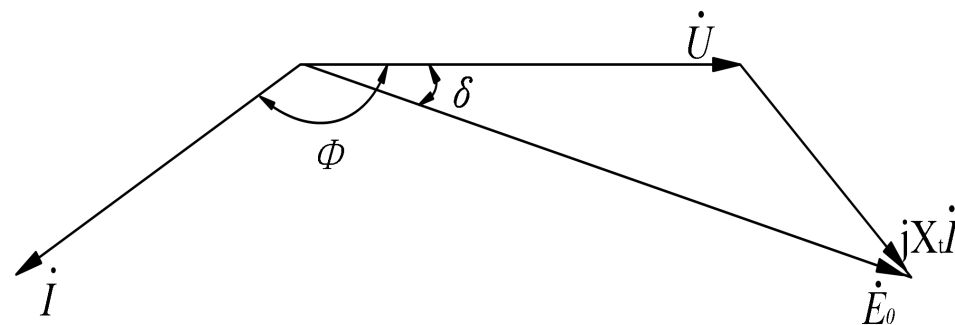
- 变成了空转的电动机;
- 空载损耗全部由电网输入的电功率来供给;

(5) 在电机轴上再加上机械负载

- 负的 δ 将增大;
- 电网输入的电功率和相应的电磁功率也将增大, 以平衡电动机的输出功率;
- E_0 滞后于 U , 主极磁场落后于气隙合成磁场



(c) 电动机状态



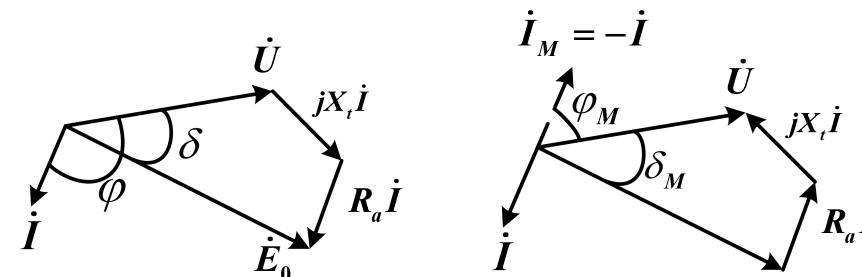
二、同步电动机的基本方程

➤ 按照发电机惯例，同步电动机可以看成是一台输出负的有功功率的发电机，其电动势方程与发电机的方程相同，以隐极机为例。 $\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_t$

按照电动机惯例，把输出负电流看成输入正电流即可，其**电动势方程**：

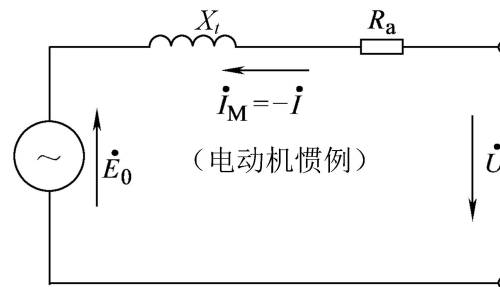
隐极机： $\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_M X_t$

凸极机： $\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_{Md} X_d + j\dot{I}_{Mq} X_q$



(a) 发电机惯例

(b) 电动机惯例



(c) 等效电路



二、同步电动机的基本方程

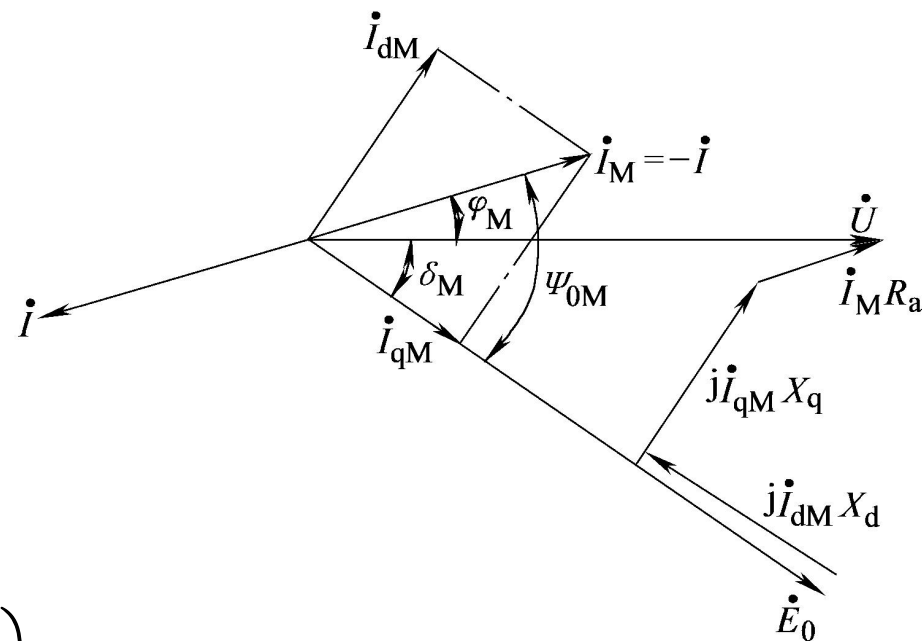
按照电动机惯例，凸极式同步电机的**功角特性**：

$$\begin{aligned} P_{em} &\approx P_2 = mUI \cos \varphi_M = mUI \cos(\psi_M - \delta_M) \\ &= mUI(\cos \psi_M \cos \delta_M + \sin \psi_M \sin \delta_M) \\ &= mI_{Mq}U \cos \delta_M + mI_{Md}U \sin \delta_M \end{aligned}$$

$$\text{又: } \begin{cases} I_{Mq} = \frac{U \sin \delta_M}{X_q} \\ I_{Md} = \frac{E_0 - U \cos \delta_M}{X_d} \end{cases} \quad \text{则: } P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

功角特性两边除以同步角速度 Ω_1 ，则凸极式同步电机的**矩角特性**：

$$T_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d \Omega_1} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2 \Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$



凸极同步电动机的相量图

同步电动机的功角特性和矩角特性按照电动机惯例，其表达式与同步发电机相同。



二、同步电动机的基本方程

同步电动机功率关系是同步发电机的逆过程，其**功率方程**为：

$$\begin{cases} P_1 = P_{Cu1} + P_{em} \\ P_{em} = P_2 + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} = P_2 + P_0 \\ P_0 = P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} \end{cases}$$

其**转矩方程**为：

$$\frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{P_2 + P_0}{\Omega_1} \rightarrow T_{em} = T_2 + T_0$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \rightarrow \text{电磁转矩}$$

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega_1} \rightarrow \text{输出转矩}$$

$$T_0 = \frac{P_0}{\Omega_1} \rightarrow \text{空载转矩}$$



三、同步电动机的V形曲线

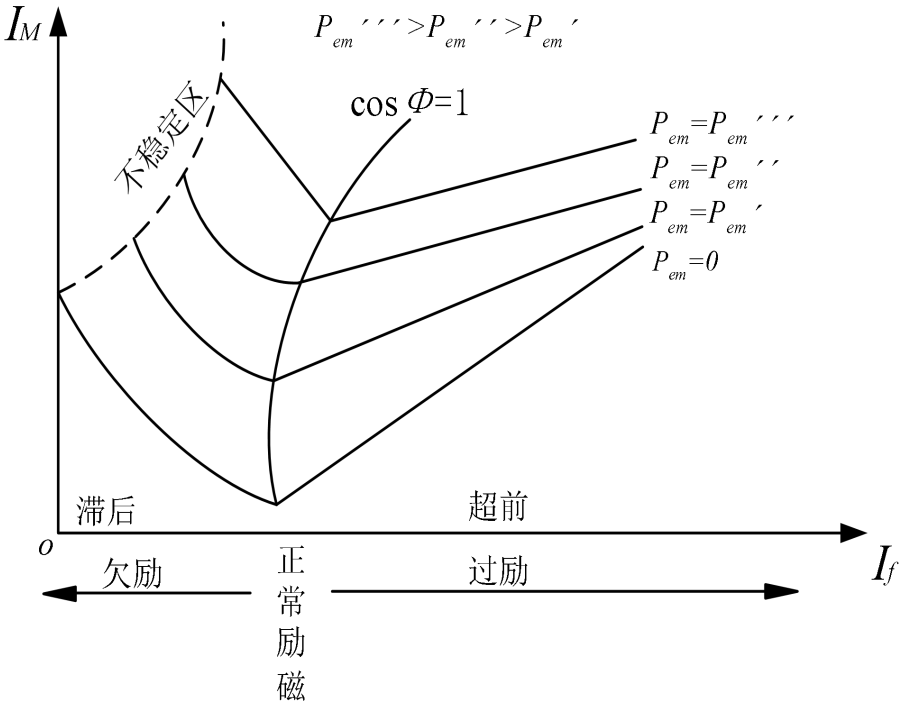
➤ 与同步发电机相似，当同步电动机的输入有功功率恒定而调节励磁电流时,也有三种励磁状态。

状态	说明
正常励磁	电动机没有无功功率输出
过励	电动机从电网吸收容性无功（或发出感性无功）
欠励	电动机从电网吸收感性无功（或发出容性无功）

调节励磁电流可以调节同步电动机的无功功率和功率因数，这是同步电动最可贵的特点。

由于同步电动机的**平均起动转矩为零**，所以**不能自行起动**，必须借用其它方法。

常用的起动方法有：辅助电动机起动法、变频起动法和异步起动法。其中异步起动法应用最广泛。



【例】某工程电源电压为6000V，厂中使用了多台异步电动机，设其总输出功率为1500kW，平均效率为70%，功率因数为0.7（滞后），由于生产需要由增添一台同步电动机。设该同步电动机的功率因数为0.8（超前），已将全厂的功率因数调整到1，求此同步电动机承担多少视在功率和有功功率。

解：异步电动机总的视在功率 S 为

$$S = \frac{P_2}{\eta \cos \varphi} = \frac{1500}{0.7 \times 0.7} \text{ kV} \cdot \text{A} = 3060 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

由 $\cos \varphi = 0.7$ ，得 $\sin \varphi = 0.713$

故这些异步电动机总得无功功率 Q 为

$$Q = S \sin \varphi = 3060 \times 0.713 \text{ k var} = 2185 \text{ k var}$$

同步电动机运行后， $\cos \varphi = 1$ ，故全厂得感性无功

功率全由该同步电动机提供，即有：

$$Q' = Q = 2185 \text{ k var}$$

$$\cos \varphi' = 0.8, \sin \varphi' = 0.6$$

故同步电动机的视在功率为

$$S' = \frac{Q'}{\sin \varphi'} = \frac{2185}{0.6} \text{ kV} \cdot \text{A} = 3640 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

有功功率为

$$P' = S' \cos \varphi' = 3640 \times 0.8 \text{ kW} = 2910 \text{ kW}$$



同步调相机是专门发送无功功率的同步电机，**实质上是一台空载运行的同步电动机。**

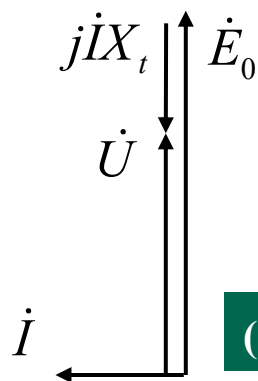
在电网的受电端接上同步调相机，是提高电网功率因数的重要方法之一。

一、同步调相机的励磁

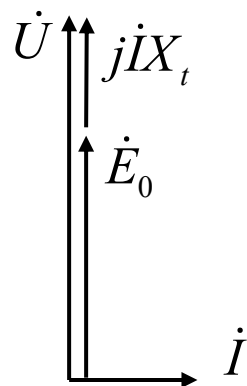
1. 正常励磁 $\dot{E}_0 = \dot{U}$, $\varphi = 0^\circ$, $I = 0$, $Q = 0$

2. 过励磁 $\dot{E}_0 > \dot{U}$, $\varphi = -90^\circ$, 发出感性无功 Q_L , 或者吸收容性无功 Q_C

3. 欠励磁 $\dot{E}_0 < \dot{U}$, $\varphi = 90^\circ$, 发出容性无功 Q_C , 或者吸收感性无功 Q_L



(a) 过励



(b) 欠励



二、同步调相机的特点

1. 过励状态下运行

- 由于电力系统大多数情况下带感性无功功率，调相机的额定容量指的是在过励状态下的额定视在功率。

2. 转轴

- 由于转轴上不带机械负载，所以调相机的转轴比同容量的电动机转轴细，没有过载能力的要求。

3. 通风冷却要求较高

- 为了提高调相机提供感性无功的能力，励磁线圈导线截面较大，但励磁损耗仍然很大，对通风冷却要求较高。

4. 起动方法

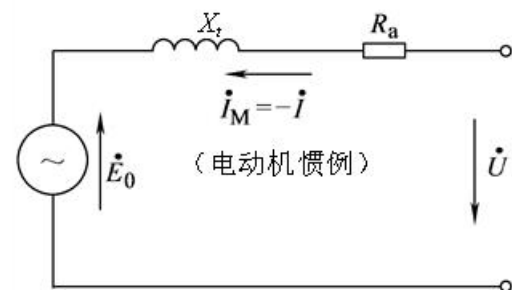
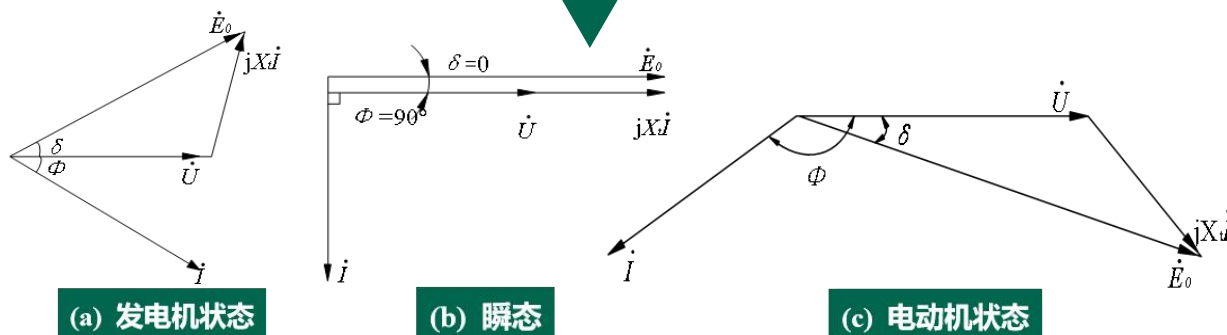
- 一般采用异步起动法或辅助电动机法。选择起动方法时，首先考虑限制起动电流，然后考虑满足起动转矩的要求。



小结

同步电动机

可逆原理



基本方程

电动势方程

$$\text{隐极机: } \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_M X_t$$

$$\text{凸极机: } \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_{Md} X_d + j\dot{I}_{Mq} X_q$$

功角特性

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

矩角特性

$$T_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d \Omega_1} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

功率平衡方程

$$\begin{cases} P_1 = P_{Cu1} + P_{em} \\ P_{em} = P_2 + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} = P_2 + P_0 \\ P_0 = P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} \end{cases}$$

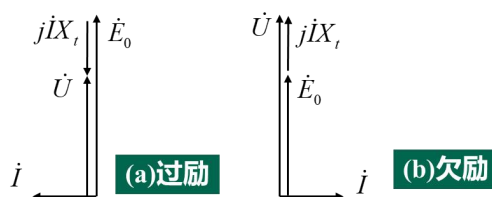
$$\text{转矩平衡方程 } \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{P_2 + P_0}{\Omega_1} \rightarrow T_{em} = T_2 + T_0$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \rightarrow \text{电磁转矩}$$

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega_1} \rightarrow \text{输出转矩}$$

$$T_0 = \frac{P_0}{\Omega_1} \rightarrow \text{空载转矩}$$

同步调相机



1. 正常励磁

$$\dot{E}_0 = \dot{U}, \varphi = 0^\circ, I = 0, Q = 0$$

2. 过励磁

$$\dot{E}_0 > \dot{U}, \varphi = -90^\circ, \text{发出感性无功 } Q_L, \text{或者吸收容性无功 } Q_C$$

3. 欠励磁

$$\dot{E}_0 < \dot{U}, \varphi = 90^\circ, \text{发出容性无功 } Q_C, \text{或者吸收感性无功 } Q_L$$

同步调相机是专门发送无功功率的同步电机，实质上是一台空载运行的同步电动机。