

第十六章 同步电动机

★基本要求:

- 1.了解同步电机的可逆性原理，掌握同步电机运行状态的判别依据
- 2.掌握同步电动机的起动方法

★作业:



P307 思考题16-1, 16-3

第十六章 同步电动机

16-1 概述

16-2 同步电动机的运行原理

16-3 同步电动机的起动

小结

16-1 概述

1.同步电动机的特点

1) 转速与负载大小无关, 始终保持为同步速, 即

$$n = \frac{60f_1}{p} = n_1$$

2) 功率因数可调;

3) 起动较困难。

2.同步电动机的用途

同步电动机用于驱动大功率恒速运转的机械负载。

3.同步补偿机

- 同步电动机空载运行时，可以作为同步补偿机使用。
- 同步补偿专门用于改善电网的功率因数，提高电网的电压质量。



16-2 同步电动机的运行原理

1.同步电机运行的可逆原理

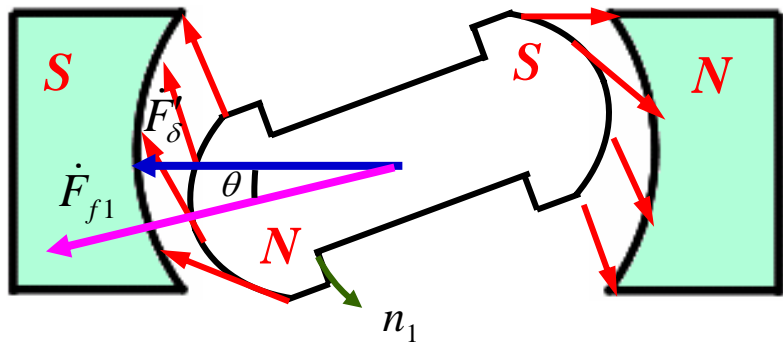
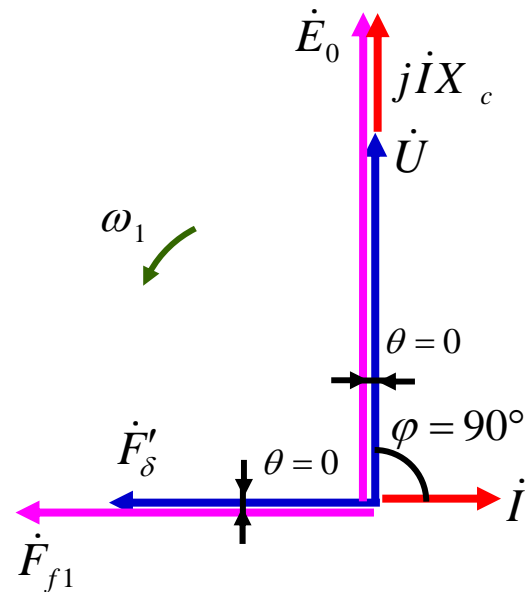
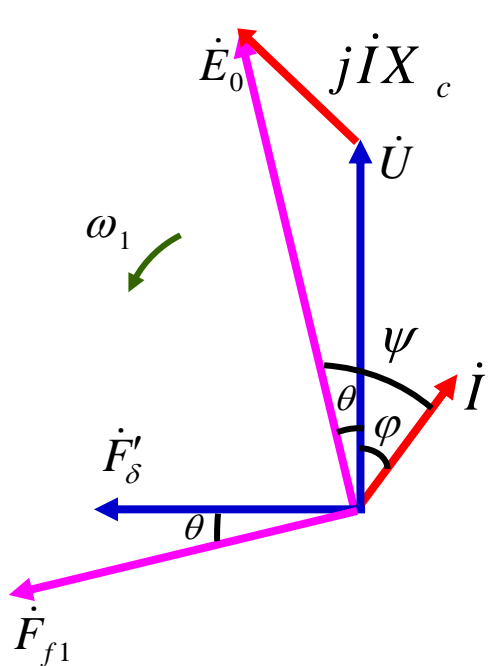
2.同步电动机的电压方程式和相量图

3.同步电动机的功率和转矩平衡关系

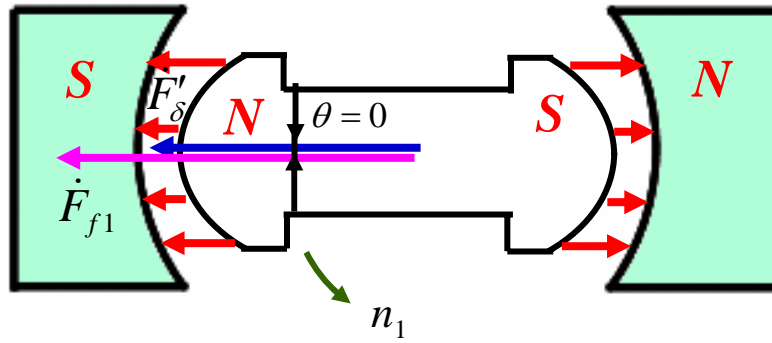
4.同步电动机的功角特性和静态稳定

5.同步电动机无功功率的调节和V形曲线

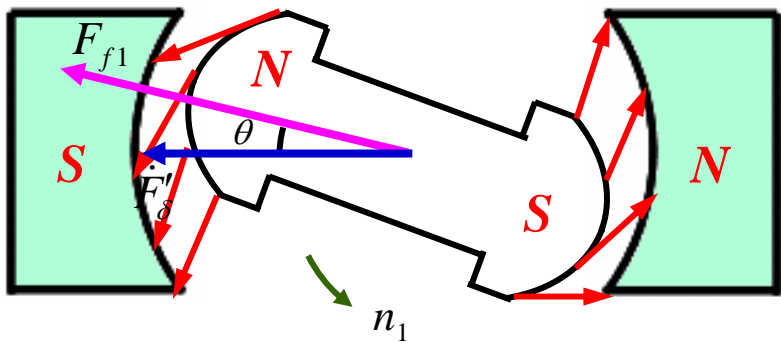
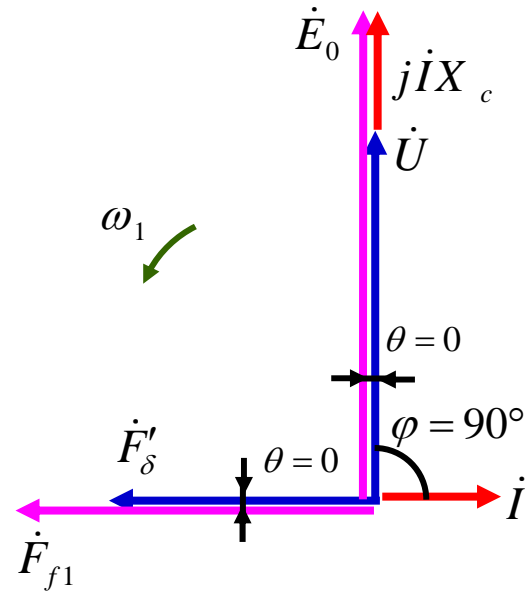
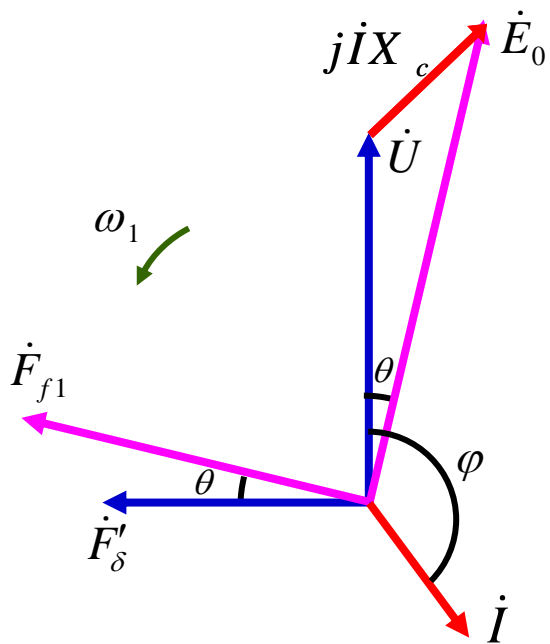
1.同步电机运行的可逆原理



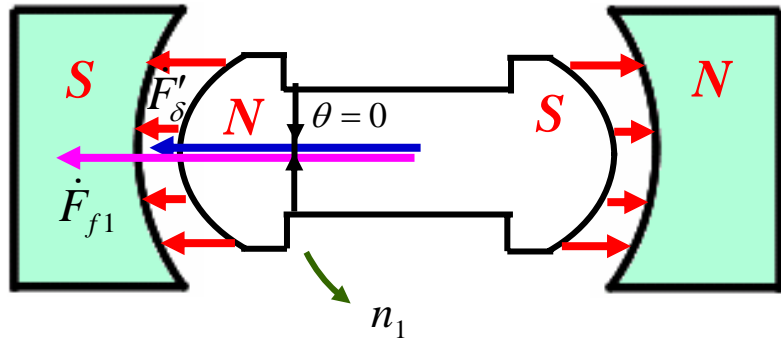
1) 发电机 $\theta > 0$



2) 空载的同步发电机 $\theta = 0$

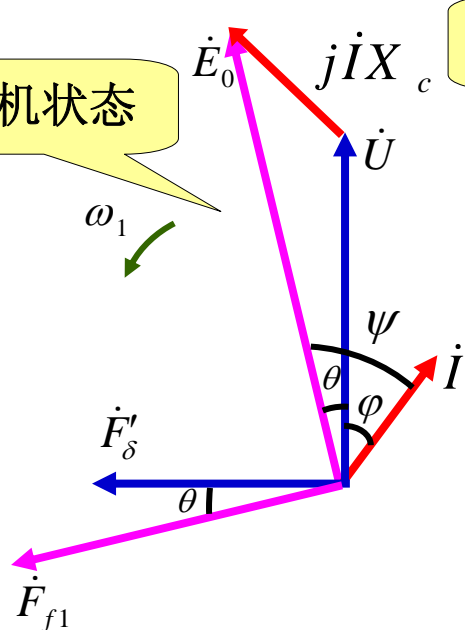


3) 电动机 $\theta < 0$

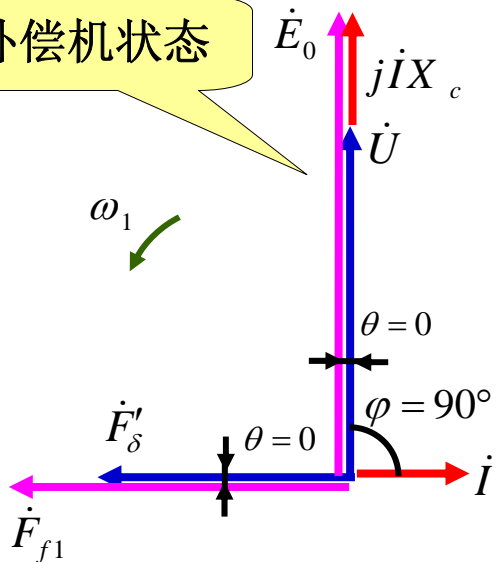


2) 空载的同步发电机 $\theta = 0$

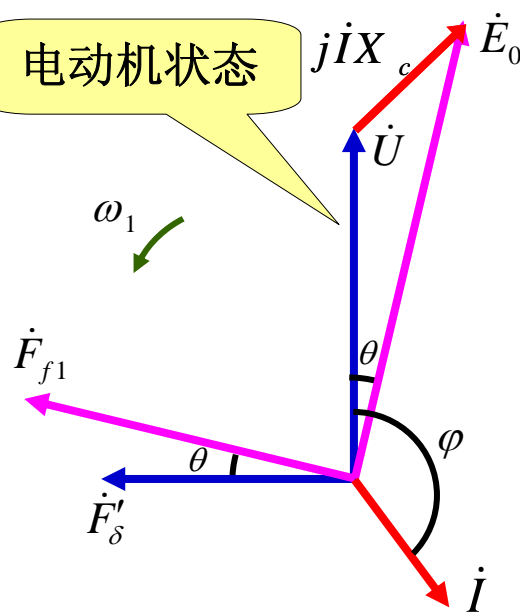
发电机状态



补偿机状态



电动机状态



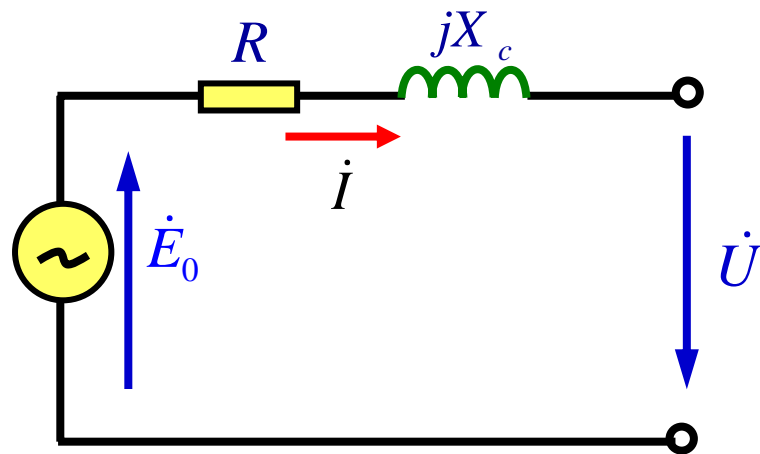
1) 发电机状态: \dot{E}_0 超前 \dot{U} $\theta > 0$ 机械能 \rightarrow 电能

2) 补偿机状态: \dot{E}_0 与 \dot{U} 同相 $\theta = 0$

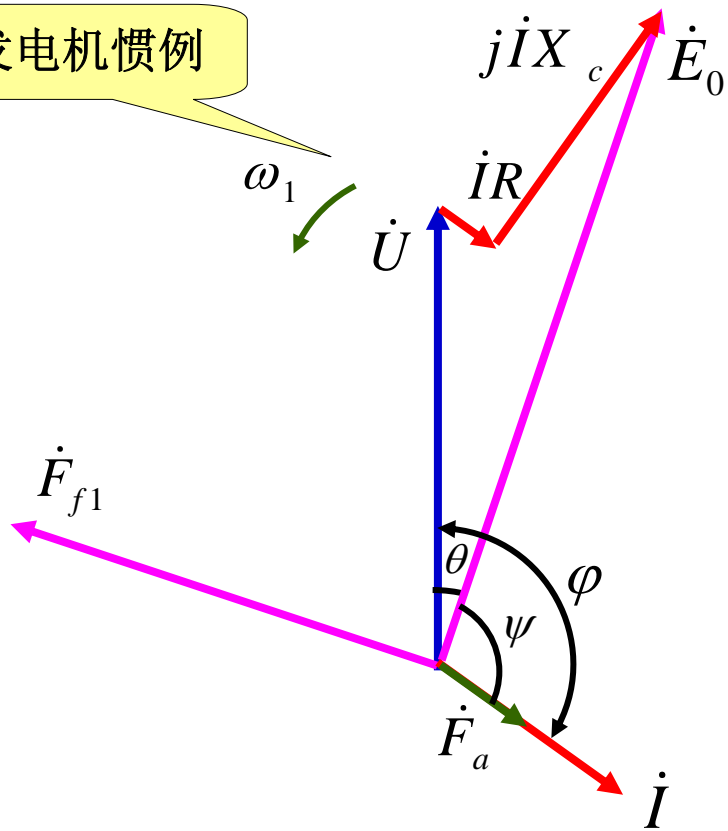
3) 电动机状态: \dot{E}_0 滞后 \dot{U} $\theta < 0$ 电能 \rightarrow 机械能

2.同步电动机的电压方程式和相量图

■采用发电机惯例



发电机惯例



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{U} + \dot{I}Z_c$$

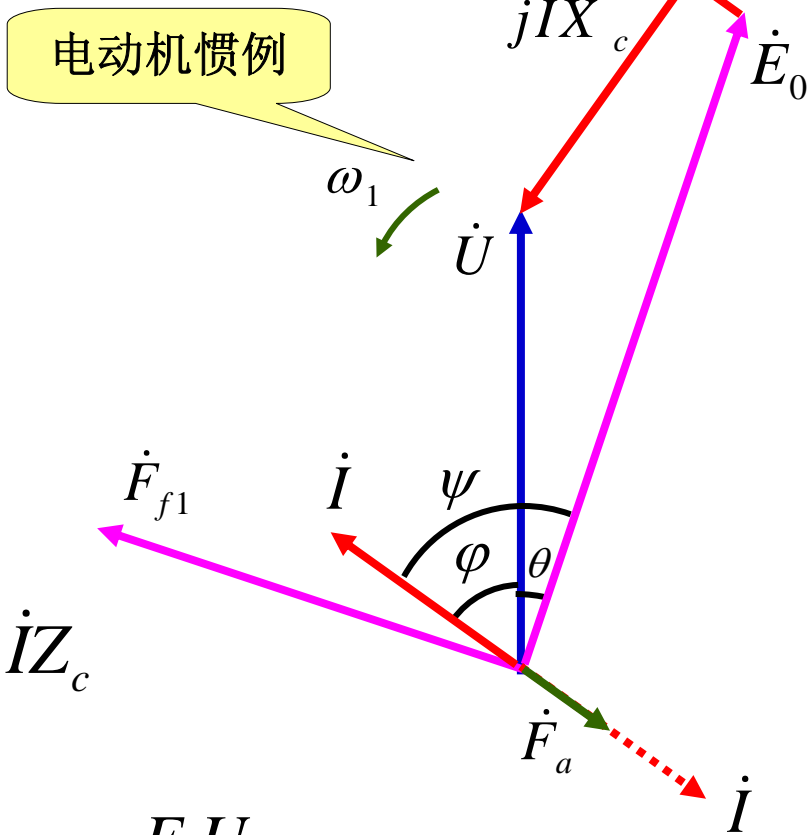
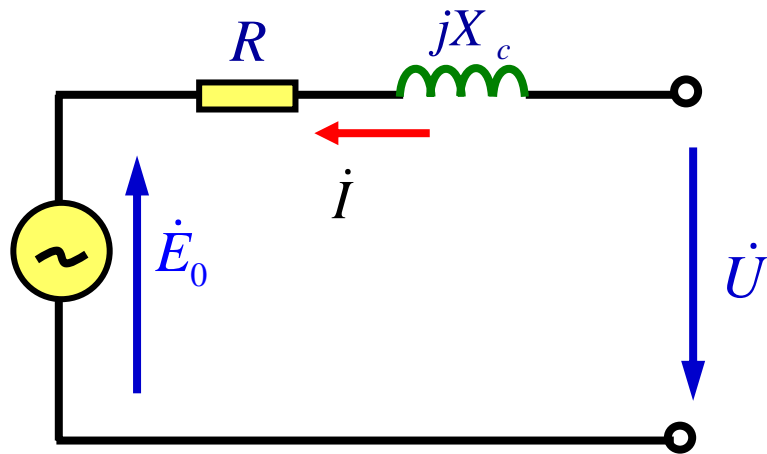
$$\theta < 0 \quad P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta < 0$$

电能 → 机械能

$$\varphi > 90^\circ \quad P_2 = mUI \cos \varphi < 0$$

从电网吸收电能

■采用电动机惯例



$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{E}_0 + \dot{I}Z_c$$

θ : \dot{E}_0 滞后 \dot{U} 的角度。 $P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta > 0$

采用电动机惯例时，正电枢电流产生负的电枢磁动势。

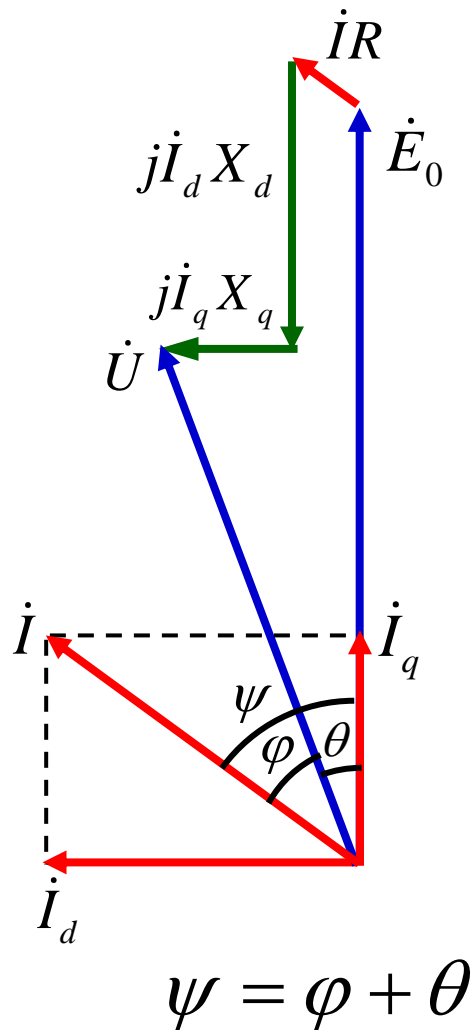
2. 同步电动机的电压方程式和相量图

1) 隐极同步电动机

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{E}_0 + \dot{I}Z_c$$

2) 凸极同步电动机

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$



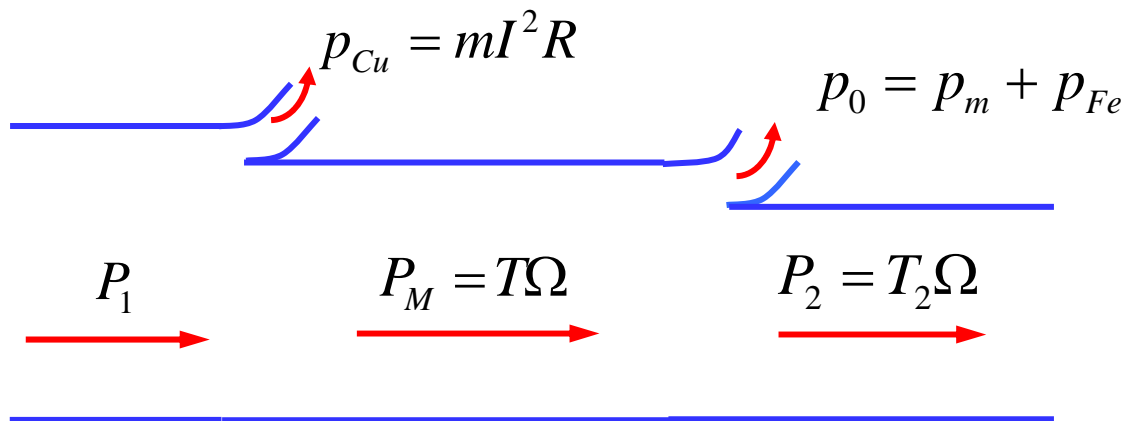
3.同步电动机的功率和转矩平衡关系

1) 功率平衡关系

$$P_1 = mUI \cos \varphi \quad p_{cu} = mI^2 R$$

$$P_M = P_1 - p_{cu}$$

$$P_2 = P_M - (p_m + p_{Fe}) = P_M - p_0$$



同步电动机的功率流程图

2) 转矩平衡关系

$$P_M = P_2 + p_0$$

$$\frac{P_M}{\Omega} = \frac{P_2}{\Omega} + \frac{p_0}{\Omega}$$

$$T = T_2 + T_0$$

式中， T —电磁转矩；

T_2 —机械负载的制动转矩；

T_0 —机械摩擦及铁损引起的空载转矩。

4.同步电动机的功角特性和静态稳定

1) 功角特性

■凸极同步电动机
$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + m U^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$$

电磁转矩
$$T = m \frac{E_0 U}{\Omega X_d} \sin \theta + \frac{m U^2}{\Omega} \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$$

■隐极同步电动机
$$P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$$

电磁转矩
$$T = m \frac{E_0 U}{\Omega X_c} \sin \theta$$

2) 静态稳定

同步电动机静态稳定的判据： $\frac{dT}{d\theta} > 0$

3) 过载能力

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

隐极同步电动机：

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

5.同步电动机无功功率的调节和V形曲线

1) 同步电动机无功功率的调节

同步电动机电压和输出的有功功率不变时，调节励磁电流即可改变同步电动机的无功功率。

以隐极同步电动机为例进行分析，忽略电枢电阻和主磁路饱和的影响，且不考虑励磁电流变化对空载损耗的影响，则有

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

$$P_1 = mUI \cos \varphi = C \quad \Rightarrow \quad I \cos \varphi = C$$

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

① 正常励磁

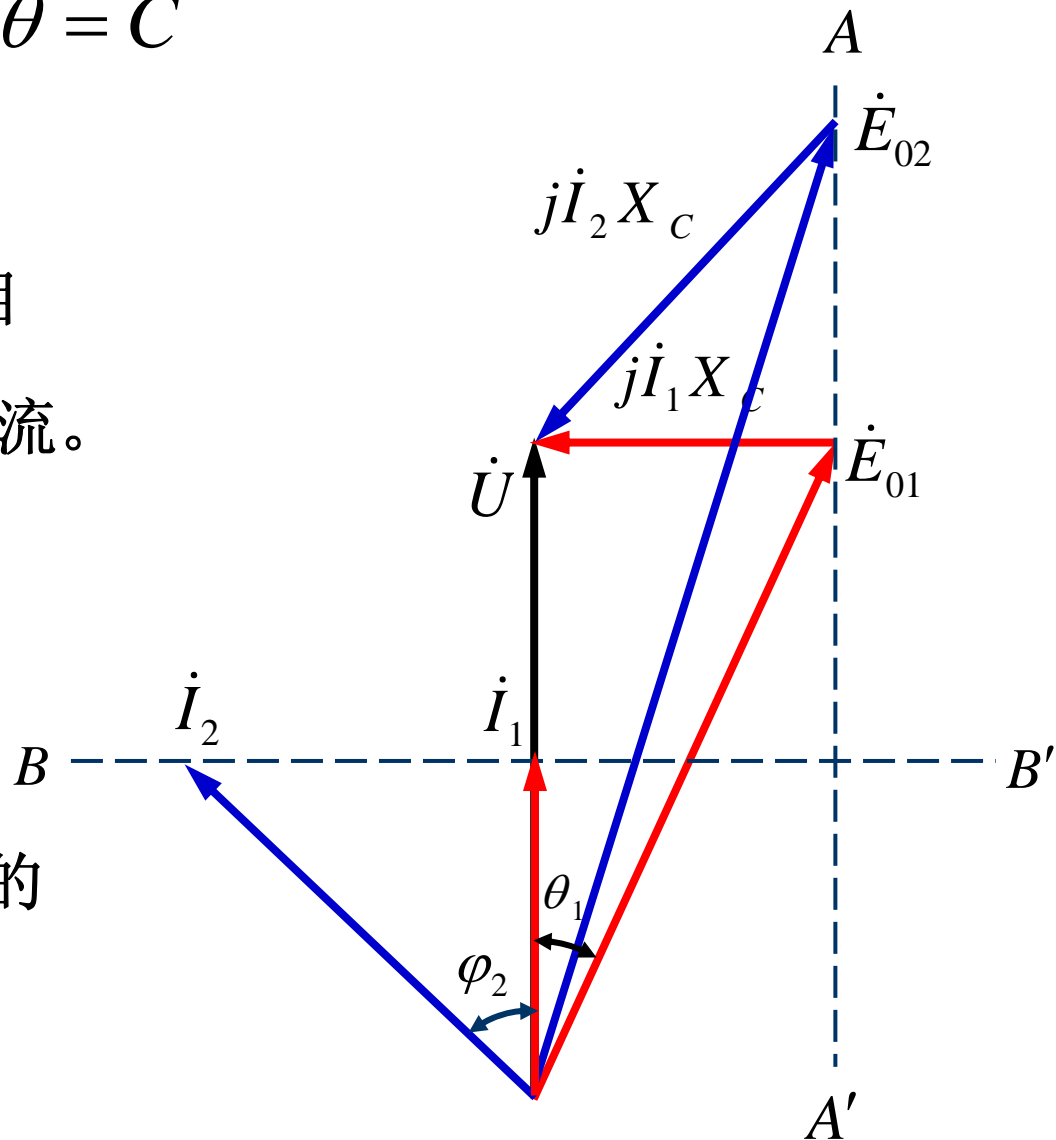
$\cos \varphi = 1$ i 与 \dot{U} 同相

电枢电流全部为有功电流。

② 过励状态

$\cos \varphi$ 超前 $i_{f2} > i_{f1}$

电动机从电网吸收超前的无功功率。

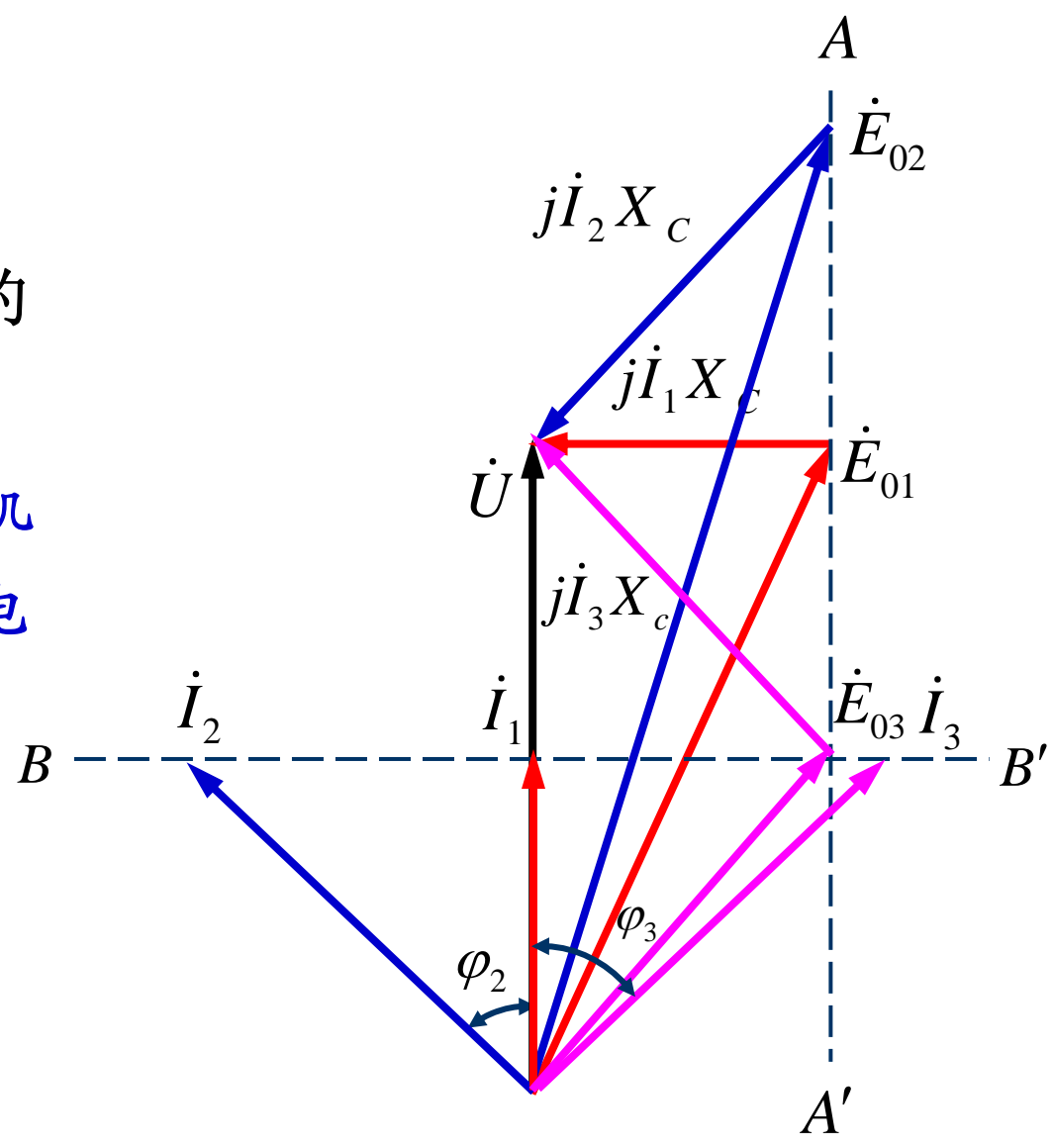


③欠励状态

$\cos \varphi$ 滞后 $i_{f3} < i_{f1}$

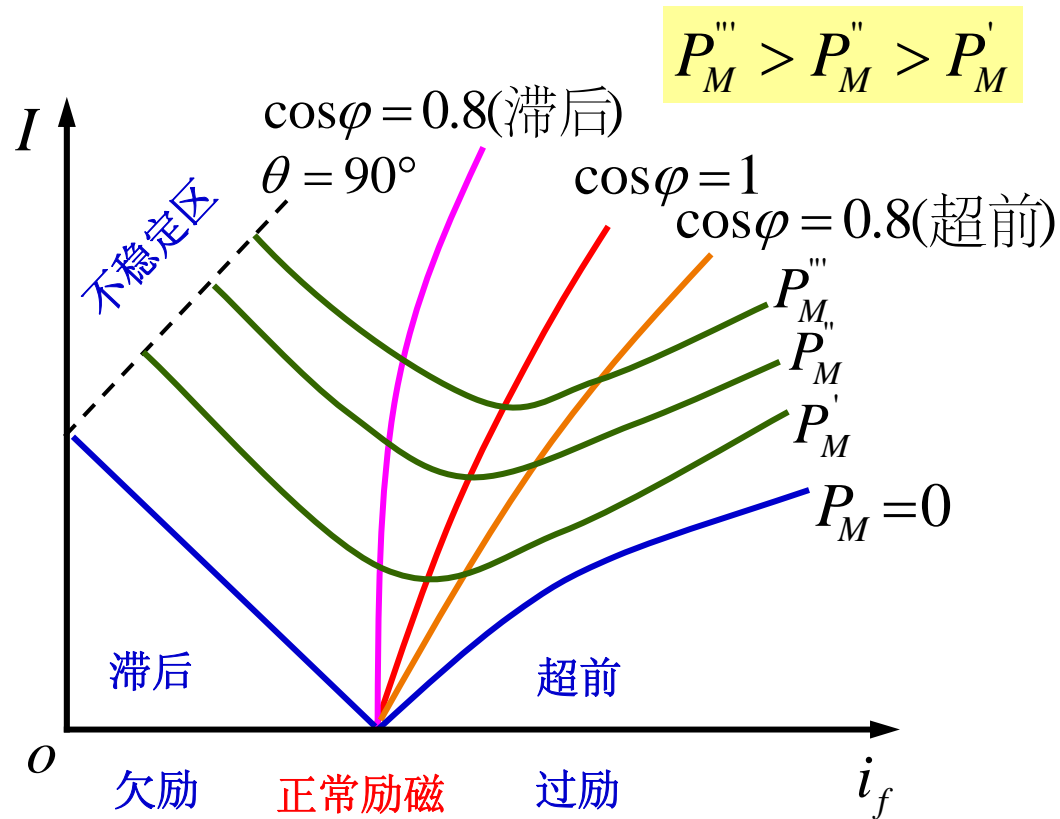
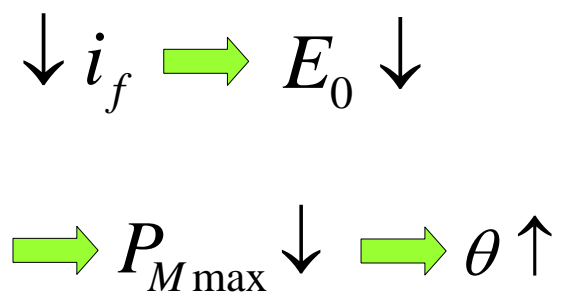
电动机从电网吸收滞后的无功功率。

改变励磁可以调节电动机的功率因数，这是同步电动机最可贵的特性。



2) 同步电动机的V形曲线

同步电动机在电压和输出的有功功率恒定时，电枢电流 I 和励磁电流 i_f 的关系曲线 $I=f(i_f)$ 就是所谓的V形曲线。

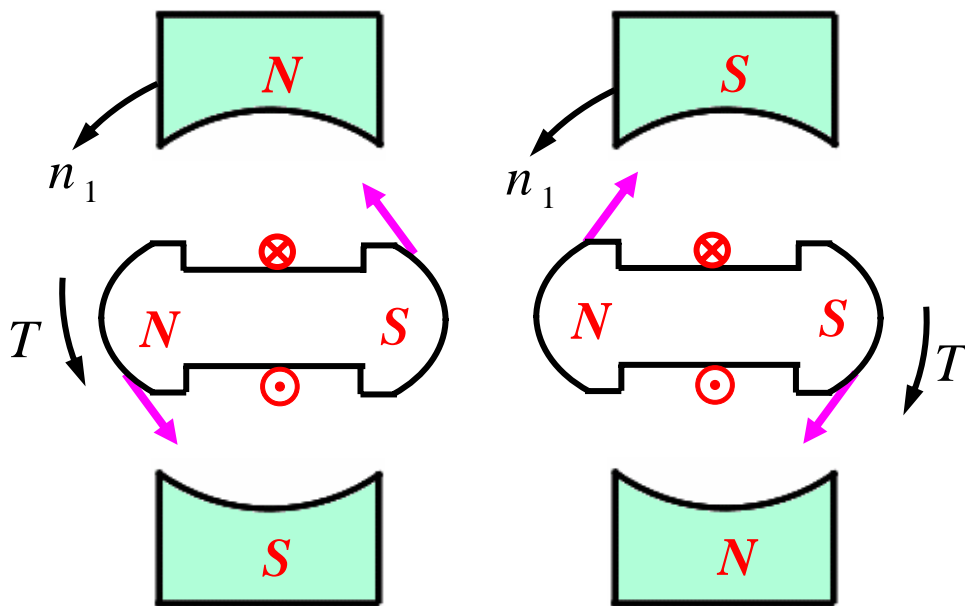


16-3 同步电动机的起动

同步电机定子通入三相对称电流，在气隙内产生转速为 n_1 的旋转磁场，转子通入直流励磁产生N、S极，由于在定、转子磁场之间存在相对运动，产生的平均电磁转矩为零，无法自起动。

■同步电动机的起动方法：

1. 辅助电动机起动
2. 异步起动
3. 变频起动



1.辅助电动机起动

选用与同步电动机极数相同的异步电动机(容量一般为主机的5%~15%)作为辅助电动机。先用辅助电动机将同步电动机拖动至接近于同步转速，然后再用自整步法将其投入电网，并切断辅助电动机电源。

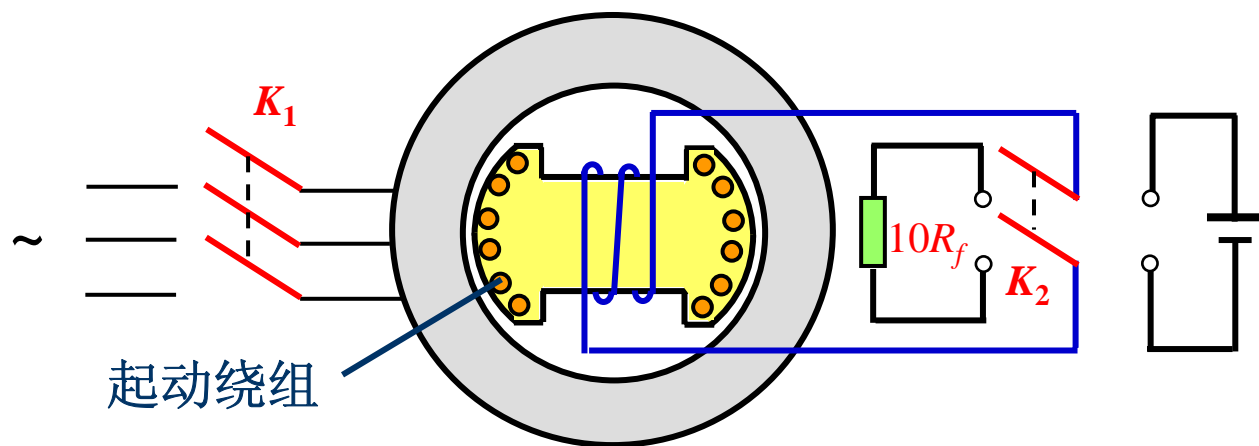
缺点：设备投资大，操作复杂，且只适合于空载起动，

2.异步起动

在转子极靴上加装起动绕组（发电机称为阻尼绕组）。当定子接通电源时，就能产生使转子转动的异步转矩，并不断加速至接近同步速，此时，再加入励磁，就可以用自整步法将电机牵入同步。

■异步起动过程:

- 1) 起动前先把励磁绕组经10倍于励磁绕组电阻值的附加电阻短接,然后将定子投入电网,依靠异步转矩起动并加速至接近同步转速;
- 2) 给转子加励磁,依靠同步转矩将转子牵入同步。



异步起动的原理接线图

3. 变频启动

启动过程中，定子由变频电源供电。在开始启动时，把定子电源的频率调得很低，转子上加励磁，然后逐步上调电源频率直至额定频率。在同步转矩的作用下，转子转速将随定子旋转磁场的转速上升而同步上升，直至额定转速。

优点：启动过程平稳。

缺点：必须有变频电源。

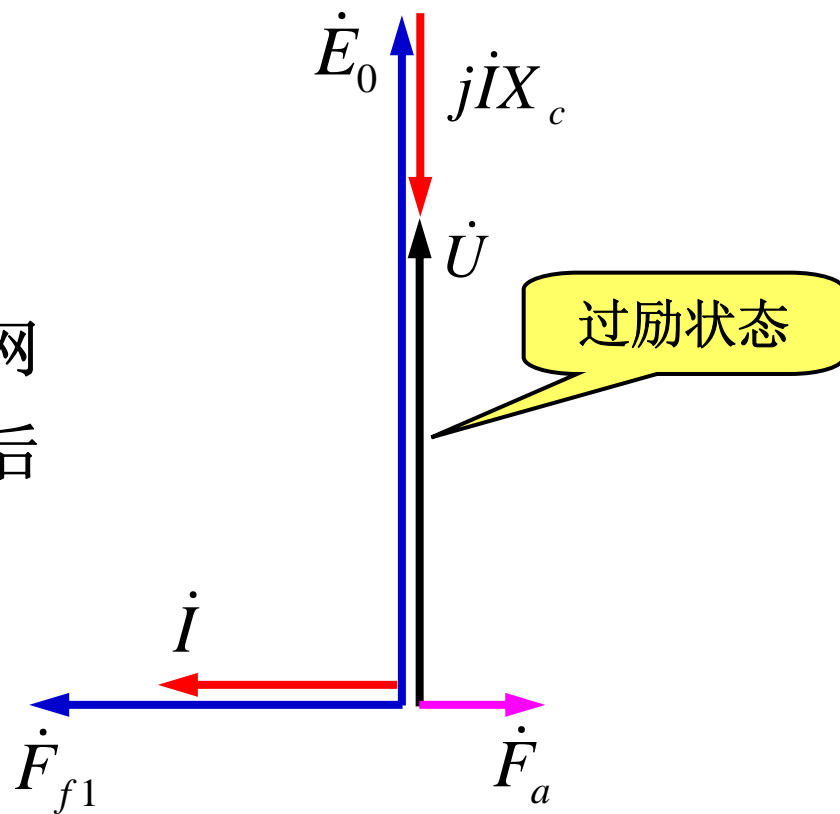
同步补偿机

1.同步补偿机的原理

1) 同步补偿机的原理

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

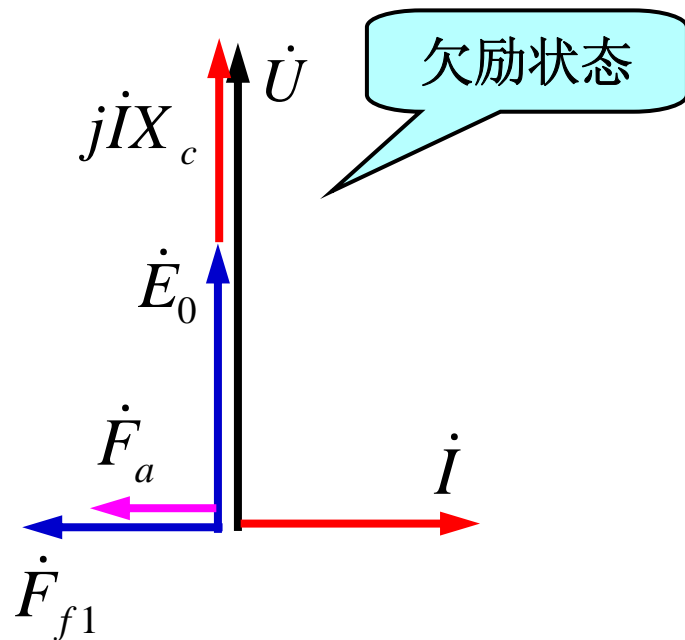
•过励时， \dot{i} 超前 \dot{U} 90° ，从电网吸收超前的无功功率（发出滞后的无功功率）。



• 欠励时， i 滞后 \dot{U} 90° ，从电网吸收滞后的无功功率（发出超前的无功功率）。

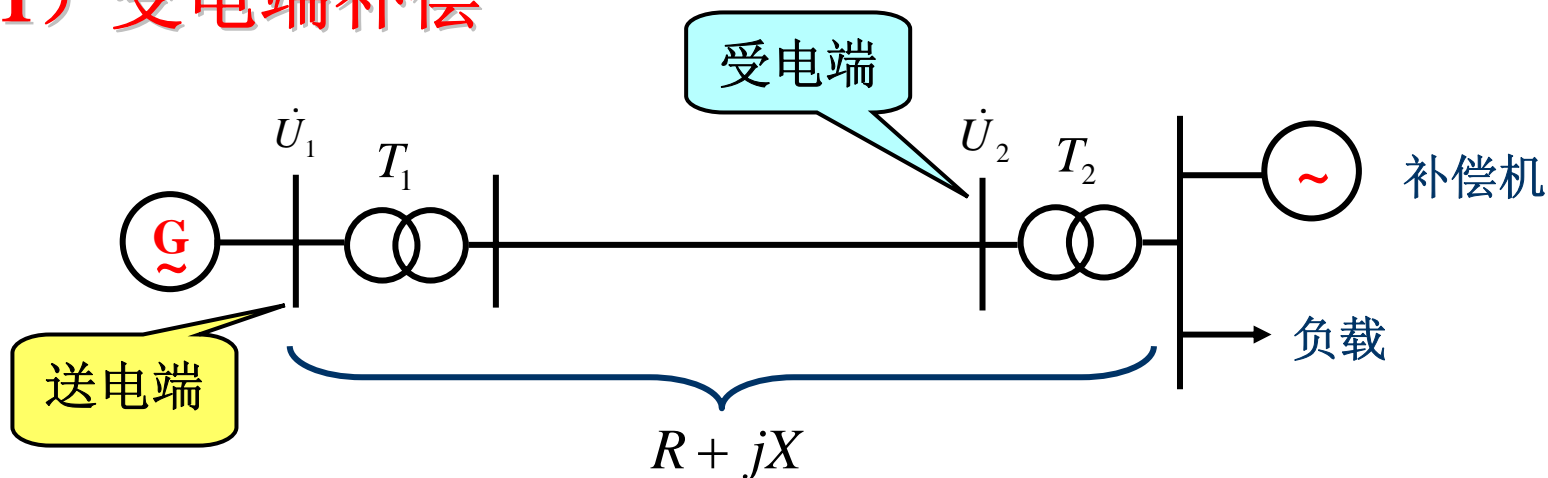
只要调节励磁电流，就能灵活地调节同步补偿机无功功率的性质和大小。

电力系统在大多数情况下呈感性，所以同步补偿机通常都是在过励状态下运行，作为无功功率电源，提供感性的无功，改善电网的功率因数，保持电网电压稳定。



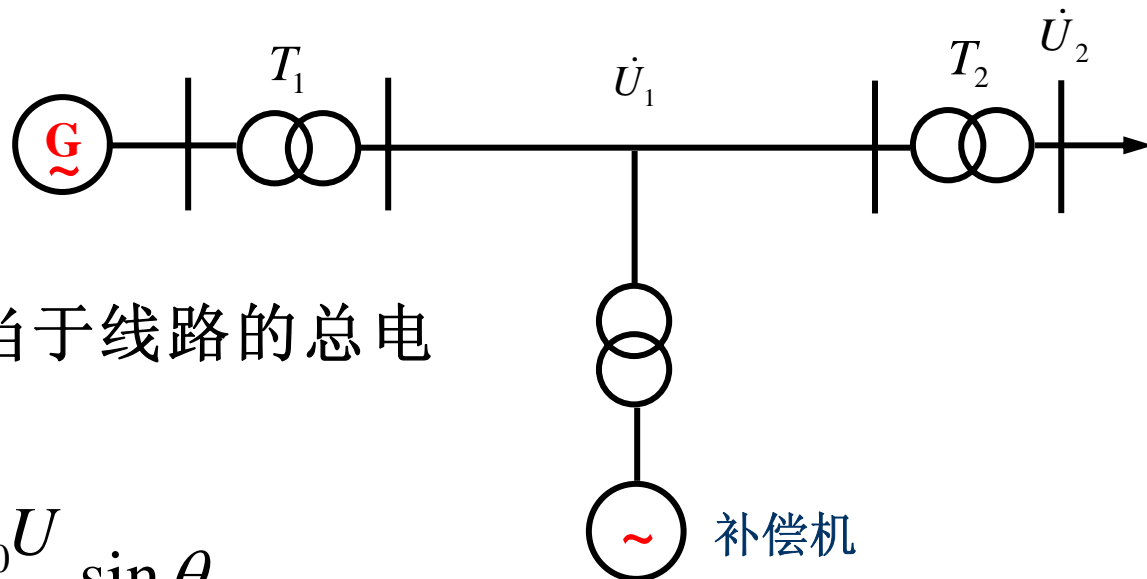
2.同步补偿机的用途

1) 受电端补偿



- 当负荷较大时，为了改善功率因数，同步补偿机应过励运行。
- 当电网负荷很小或空载运行时，高压长输电线路将呈现较大的电容作用，使受端电网电压升高，此时，同步补偿机应运行在欠励状态。

2) 中间补偿



中间加补偿机相当于线路的总电抗减小，

$$P = m \frac{E_0 U}{\sum X} \sin \theta$$

$$\sum X \downarrow \Rightarrow m \frac{E_0 U}{\sum X} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} P \text{ 不变时, } \theta \downarrow \\ \theta \text{ 不变时, } P \uparrow \end{cases}$$

①提高了稳定性；

②当保持原过载能力时，输送的功率将增大。

3.同步补偿机的特点

- 1) 同步补偿机的额定容量是指过励状态下的视在功率。根据实际运行要求和稳定性需要，它在欠励运行时的容量只是过励时的**0.5~0.65**倍。
- 2) 由于不带机械负载，补偿机的转轴无轴伸，且转轴可以比较细；
- 3) 由于没有稳定问题， X_d 可较大，电机造价较低；
- 4) 一般采用异步起动，装设起动绕组。

课后复习重点和作业

★复习重点:

- 同步电机运行状态的判别依据
- 同步电动机的起动方法

★作业:



P307 思考题16-1, 16-3

小 结

1.同步电机运行的可逆原理

发电机、电动机和补偿机是同步电机的三种运行状态，

- 1) 当 \dot{E}_0 超前 \dot{U} 时，同步电机将原动机从轴上输入的机械能转换成电能，为发电机运行状态；
- 2) 当 \dot{E}_0 滞后 \dot{U} 时，同步电机从电网吸收电能，将其转换成机械能从轴上输出，为电动机运行状态；
- 3) 当 \dot{E}_0 与 \dot{U} 同相时，同步电机工作于补偿机状态，主要从电网吸收无功功率。

2.同步电动机的运行原理

1) 电压方程式

隐极同步电动机 $\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{E}_0 + \dot{I}Z_c$

凸极同步电动机 $\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$

2) 功角特性

凸极同步电动机 $P_M = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + m U^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\theta$

隐极同步电动机 $P_M = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$

3) 静态稳定

同步电动机静态稳定的判据： $\frac{dT}{d\theta} > 0$

4) 过载能力

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

5) 同步电动机无功功率的调节

通过调节励磁电流可以方便地改变同步电动机的无功功率，从而改善电网的功率因数，这是同步电动机的最大优势。

过励时，同步电动机从电网吸取超前的无功功率；

欠励时，同步电动机从电网吸取滞后的无功功率。

3.同步电动机的起动

从同步电动机的原理来看，它不能自行起动。所以要起动同步电动机必须借助于其他方法。

同步电动机的起动方法有：（1）辅助电动机起动；2）异步起动；3）变频起动。

其中，异步起动是同步电动机目前采用最为广泛的一种起动方法。所谓异步起动，就是在同步电动机的转子上装设起动绕组，借助异步电动机的原理来完成其起动过程。