

同步电机

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p} \quad \text{同步转速}$$

额定功率 $P_N = \begin{cases} S_N \cos \phi_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \phi_N & \text{发电机} \\ \sqrt{3} U_N I_N \cos \phi_N \eta_N & \text{电动机} \end{cases}$

电磁关系

空载运行

$$U_f \rightarrow i_f \rightarrow F_f$$

$$E_0 \leftarrow \phi_0$$

$$E_0 \leftarrow \phi_0$$

对称负载时

$$I_f \rightarrow F_f \rightarrow \phi_0 \rightarrow E_0$$

$$I \rightarrow I_a \rightarrow \phi_a \rightarrow E_a$$

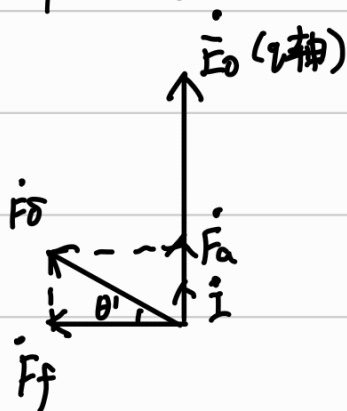
$$\phi_0 \rightarrow E_0$$

$$\phi_a \rightarrow E_a$$

功率因数角 ψ	$\dot{E}_0$ 与 $\dot{I}$	→ 电枢反应性质	} $\psi = \varphi + \delta$
功率因数角 φ	$\dot{U}$ 与 $\dot{I}$	→ 负载性质	
功角 δ	$\dot{E}_0$ 与 $\dot{U}$	→ 电机运行状态	

直轴 交轴 相轴 时轴

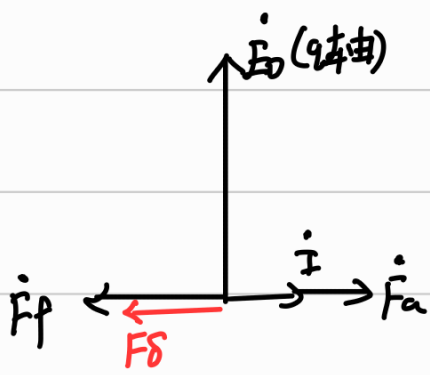
$\psi = 0^\circ$ 时



$\dot{I}$ 与 $\dot{F}_a$ 同相位

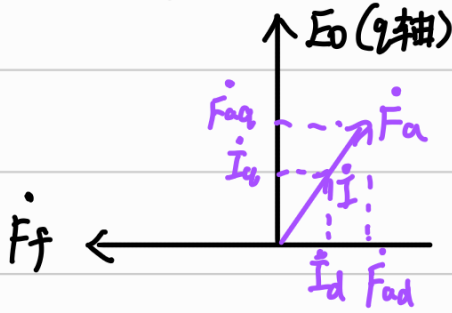
交轴电枢反应是实现机电能量转换的必要条件

$\psi = \pm 90^\circ$ 时



-90° : 气隙合成磁场增强 } 直轴电枢反应
 90° : 气隙合成磁场减小 } 增/去磁
 不能进行机电能量转换

一般情况 $\psi \in (0, 90^\circ)$



F_{aq} : 机电能量转换
 F_{ad} : 去磁

隐极式 (δ 均匀) ($\chi_{ad} = \chi_{aq} = \chi_a$)

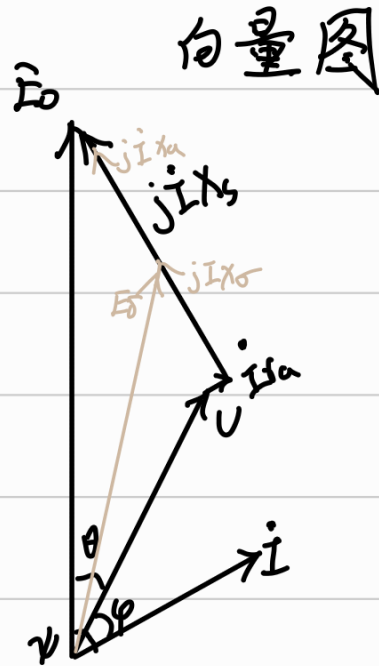
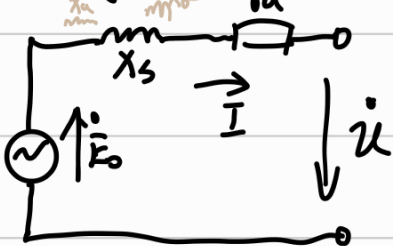
方程式

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}(r_a + j\chi_s)$$

$$\chi_s = \chi_a + \chi_\sigma$$

↓
同步电机同步电抗

等效电路图

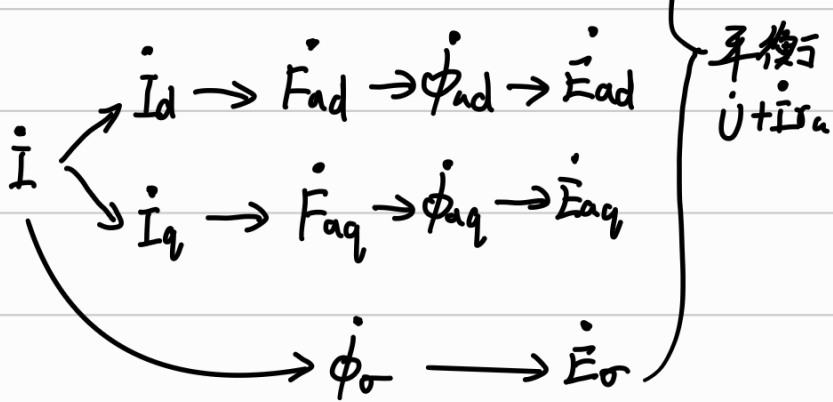


凸极式 (δ 不均匀)

双反应理论

$$I_f \rightarrow F_f \rightarrow \phi_0 \longrightarrow \dot{E}_0$$

方程式



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + I_r a + j I_d X_d + j I_q X_q$$

$$X_d = X_{ad} + X_o \quad \text{直轴同步电抗}$$

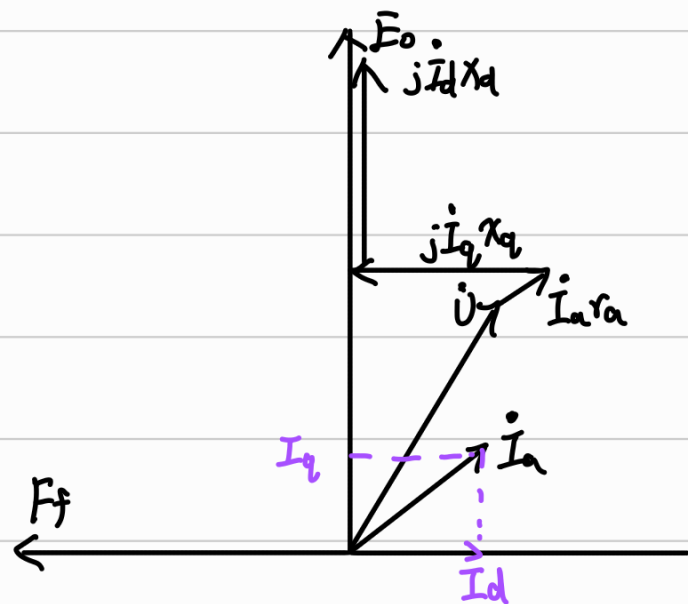
$$X_q = X_{aq} + X_o \quad \text{交轴同步电抗}$$

电枢反应电抗

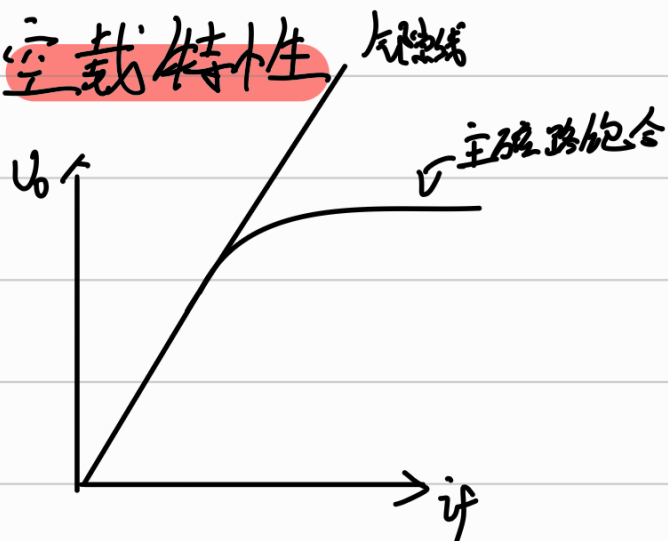
$$X_d > X_{ad} > X_q > X_{aq} > X_o$$

向量图

$$\psi = \arctan \frac{I^* X_q^* + U^* \sin \varphi}{U^* \cos \varphi}$$



空载特性



短路特性



直线：电枢反应纯直轴去磁
使 ϕ_0 不饱和

测得同步电抗不饱和值

$$X_s = \frac{E_0}{I_k}$$

短路比 $K_c = \frac{1}{X_d^*}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{小} \rightarrow X_d^* \uparrow \rightarrow I_k \downarrow \rightarrow \text{不稳定} \\ \text{大} \quad \text{成本高} \end{array} \right.$

转差法测同步电抗

$$X_d = \frac{U_{\max}}{I_{\min}} > \frac{U_{\min}}{I_{\max}} = X_q$$

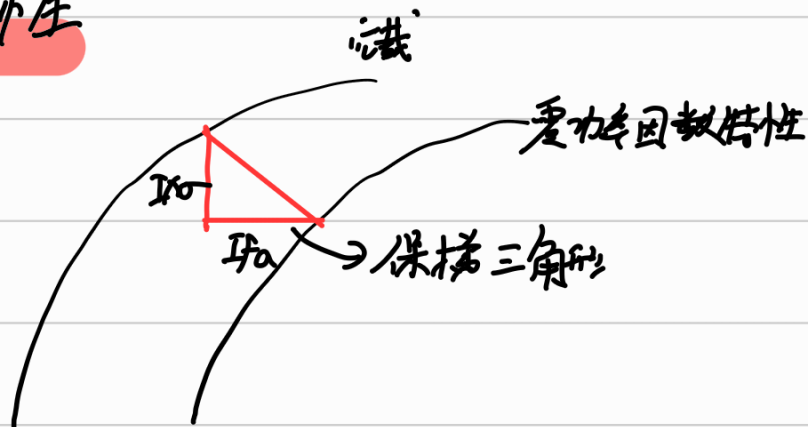
空功率因数负载特性

$$\eta = \eta_1$$

$$I = I_{\text{nst}}$$

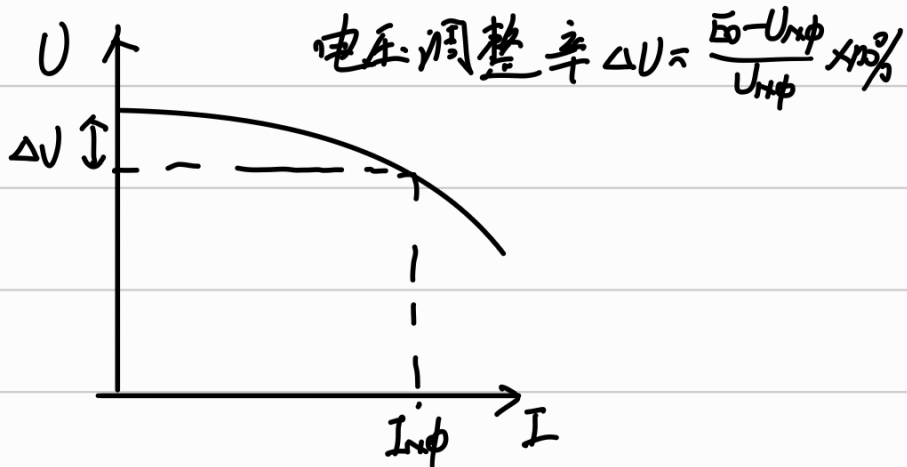
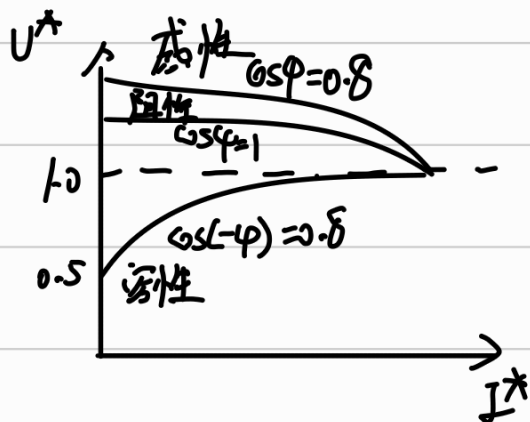
$\cos \varphi \approx 0$ (滞后) 纯感性

$$U = f(I_f)$$



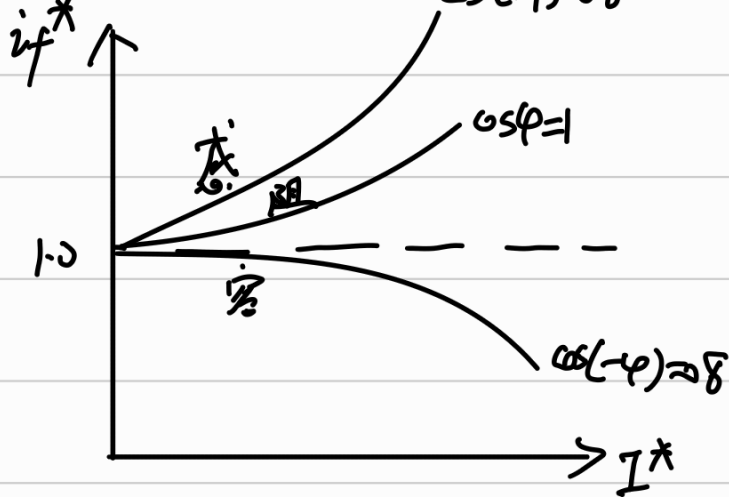
可求定子漏电抗及电枢反应的等效励磁磁势

外特性



调整特性

$$\cos(\varphi) = 0.8$$



并联运行

电网特点

$$S \rightarrow \infty \quad U_s = C \quad f_s = C \quad Z_s \rightarrow 0$$

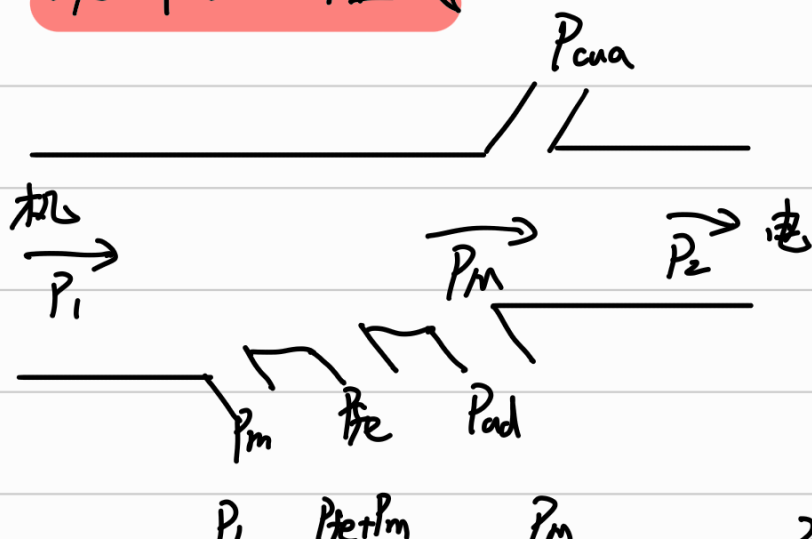
并联运行条件

电压大小相同 } 小环流
 频率相同 }
 相序一致 (x. 频一致) 环流非常大
 相位相同.

并入方法

准整步法 { 优: 冲击电流小
 { 缺: 复杂, 时间长
 自整步法 { 优: 简单
 { 缺: 冲击电流大

功率流程图



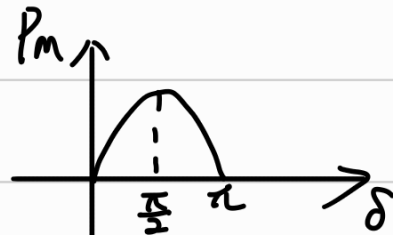
$$\frac{1}{\Omega_1} \rightarrow \frac{1}{\Omega_2} \quad \Omega_1 = \frac{60}{p} = \frac{2\pi}{p}$$

$$T_1 = T_0 + T_m$$

功角特性 ($P_m = f(\delta)$)

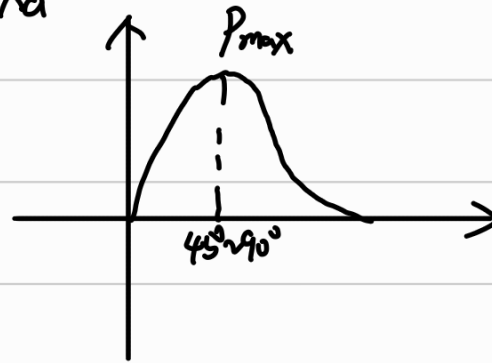
δ { 空间意义 F_f 与 B_s 夹角
时间意义 E_0 与 U 夹角

隐极式 $P_m = \frac{mUE_0}{X_s} \sin \delta$



凸极式 $P_m = m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$

基本 ~ P_{max}



$\rightarrow$ 无 E_0

$\rightarrow$ 附加电磁功率

转矩特性 (功角特性 / Ω 即得)

$$T_m'' = m \frac{U^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

$\rightarrow$ 无 E_0
 $\downarrow I_f$

空载/轻载, 无需励磁电流

有功调节

有功功率的调节 (调节原动机拖动转矩)

静态稳定 T_m 与 δ 成正比时稳定

隐 ($0 \sim 90^\circ$)

凸 ($0 \sim \theta_m$)

$\frac{dT_m}{d\delta} > 0$ 稳定, 越大

θ 越小, 稳定性越强

$$\text{过载能力 } k_m = \frac{P_{M\max}}{P_M} = \frac{1}{\sin \theta_N}$$

无功调节

空载



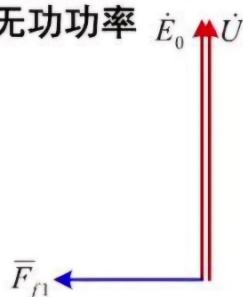
同步发电机无功调节

BUFF 电气考研

发电机空载情况下无功功率的调节

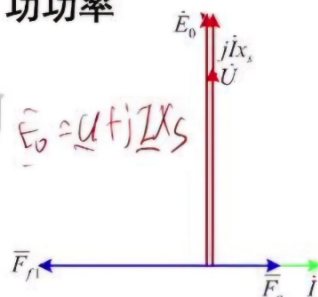
□ 正常励磁

- ✓ 产生的电动势与电网电压相等
- ✓ 发电机既不发出有功功率，也不发无功功率



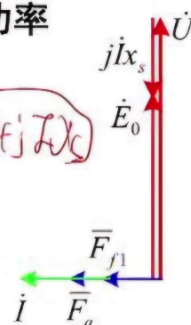
□ 过励磁

- ✓ 产生电动势比电网电压高，励磁电流比正常励磁电流大
- ✓ 发电机发出感性无功功率



□ 欠励磁

- ✓ 产生电动势比电网电压低，励磁电流比正常励磁电流小
- ✓ 发电机发出容性无功功率



BUFF团队出品

负载，保持有功功率不变，V形曲线

09:42 5月7日周三

6-电机-同步电机 (1)

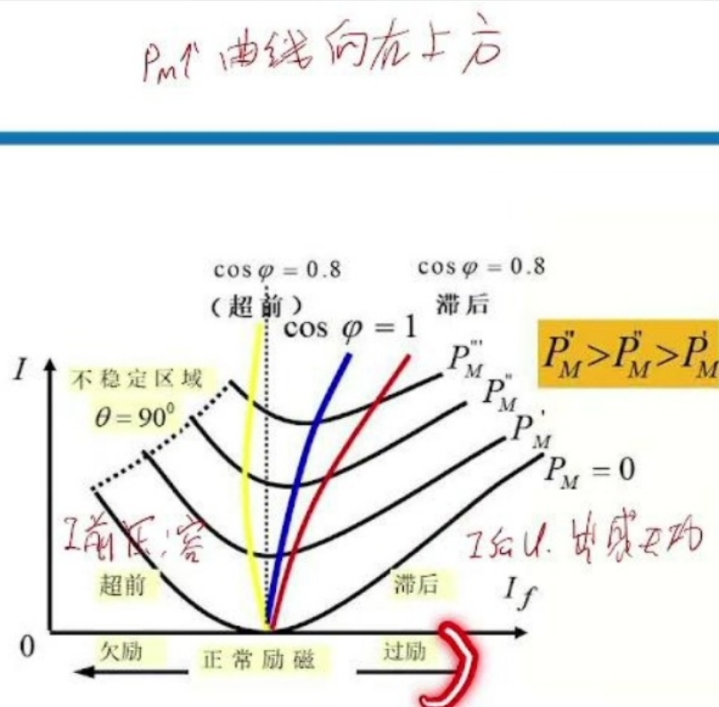


同步发电机无功调节

BUFF 电气考研

V形曲线的几个特点

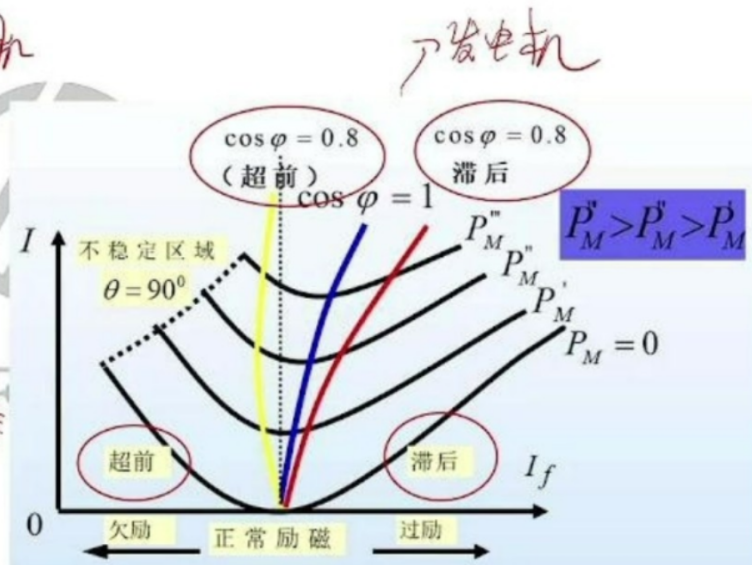
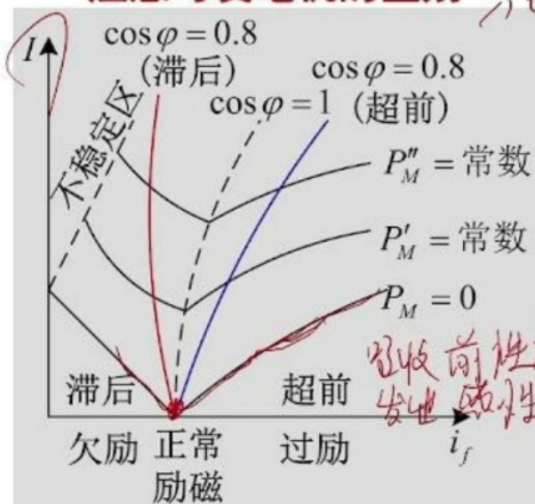
- 每条曲线最低点： $\cos \varphi = 1$ ，连线向右倾斜
- 不稳定区域边缘： $\theta = 90^\circ$ ，连线向右倾斜
- 每条曲线上的电流变化量 ΔI 为无功分量
- 励磁电流增大时，电枢电流变化规律为先减小后增大



BUFF团队出品

同步电动机的V型曲线

✓ 注意与发电机的区别



BUFF 电气考研

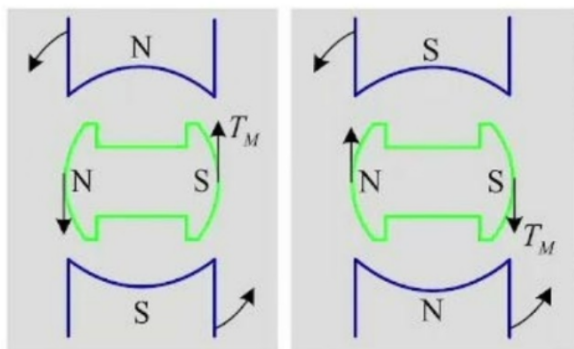
同步电动机的主要优点

- 改变励磁可以调节电动机的功率因数，这是同步电动机最宝贵的特性
- 电网上主要负载是异步电动机和变压器，它们都要从电网吸收感性无功功率，如果将运行在电网上的同步电动机工作在过励状态，使它们从电网中吸收电容性无功功率（即向电网发出感性无功功率），从而提高了电网功率因数
- 因此，为改善电网功率因数和提高电机的过载能力，现代同步电动机的额定功率因数一般均设计为 1~0.8（超前）

BUFF 电气考研

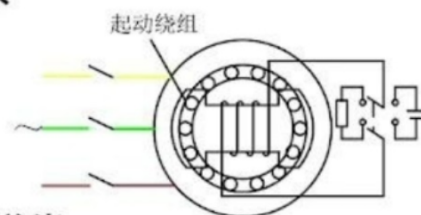
同步电动机启动特点

- 同步电动机不具有自启动能力



同步电动机启动方法

- 辅助电动机启动
 - ✓ 不能在负载情况下启动
 - ✓ 该方法现在一般不用
- 调频启动
 - ✓ 设备昂贵复杂
 - ✓ 一般不用
- 异步启动
 - ✓ 最常用方法
 - ✓ 启动时，励磁绕组切忌开路



BUFF团队出品



同步调相机

UFF 电气考研

同步调相机的研究意义

- 电网负载主要是异步电动机和变压器，它们都从电网吸取感性无功而使电网功率因数降低，减少有功功率的传输能力，并使整个电力系统的设备利用率和效率降低
- 如能在适当地点把负载所需感性无功就地供给，避免远距离输送，既减小线路损耗和电压降，又减轻发电机负担，充分利用它的容量
- 应用同步调相机便是解决这一问题很有效的方法

同步调相机定义

- 不带机械负荷，运行于电动机状态，专用来改善电网功率因数的同步电动机，称为同步调相机或同步补偿机
- 除供应本身损耗外，不从电网吸收更多有功功率，因此同步调相机总是在接近于零的电磁功率和零功率因数情况下运行

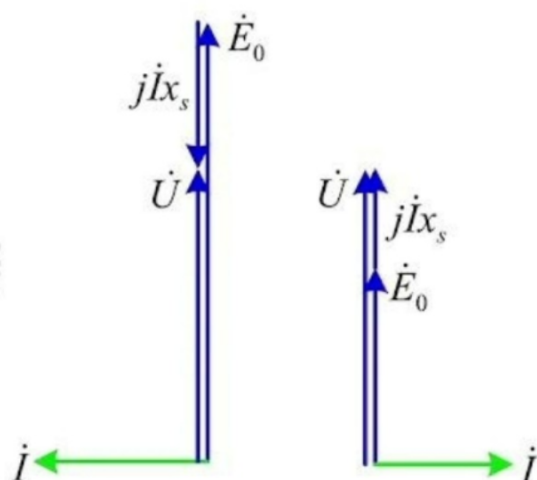
BUFF团队出品

➤ 同步调相机的原理和用途

- 忽略同步调相机的全部损耗，则电枢电流全是无功分量，其电动势方程式为

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

- 过励时可看作是电网的一个电容性无功负载
- 欠励时则为一个电感性无功负载
- 只要调节励磁电流，就能灵活地调节它的无功功率



BUFF团队出品



同步调相机

BUFF 电气考研

➤ 同步调相机的起动问题

- 同步调相机与同步电动机一样，可采用辅助电动机法或异步起动法起动，而以后者为多
- 由于同步调相机容量较大(几千或几万伏安)，在异步起动投入电网时，相当于投入一个很大的电感负载，将显著降低同步调相机接入处电压，而严重影响附近其它用电设备的正常运行
- 因此，通常要在定子回路中串入电抗器起动，以限制起动电流

➤ 同步调相机的装设位置

- 为减小无功电流在线路上产生损耗和压降，一般把同步调相机装设在受电端
- 在长距离输电线路中，为提高输电稳定性，也有在输电线中间加装同步调相机，叫做中间补偿



本章小结

BUFF 电气考研

- ✓ 发电机、电动机和调相机是同步电机的三种运行状态
- ✓ 发电机把机械能转变为电能；电动机把电能转换为机械能；同步调相机中基本没有有功功率的转换，它既可看成是空载运行的同步电动机，又可看成是专门发出无功功率的无功发电机
- ✓ 忽略定子绕组电阻，同步电机的电磁功率决定于功角 θ ，当 E_0 超前 U 是发电机运行状态； E_0 滞后 U 是电动机运行状态；两者同相为同步调相机状态
- ✓ 无论是同步发电机、同步电动机还是同步调相机，当它们接在电网上时，调节励磁就可以调节发出或从电网吸收的无功功率
- ✓ 过励状态下，都是发出感性无功；在欠励状态下，都是发出容性无功功率。这是同步电机一个可贵的性质
- ✓ 为减少无功电流在线路上产生的电阻损耗和电压损失，同步调相机一般装设在用户端
- ✓ 同步电动机和同步调相机不能自起动，一般采用异步起动