

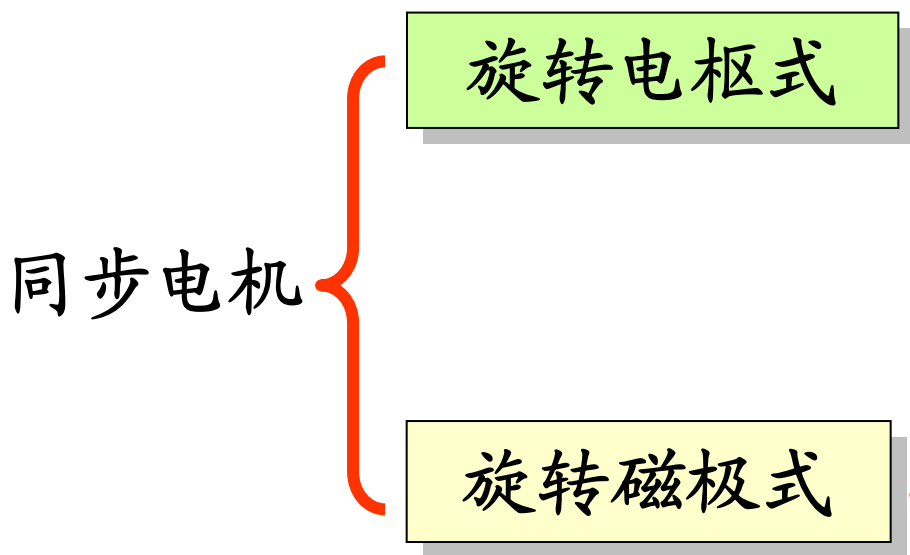
第六章

同步电机的稳态分析

同步发电机，视为一个有**内阻抗**的电源！

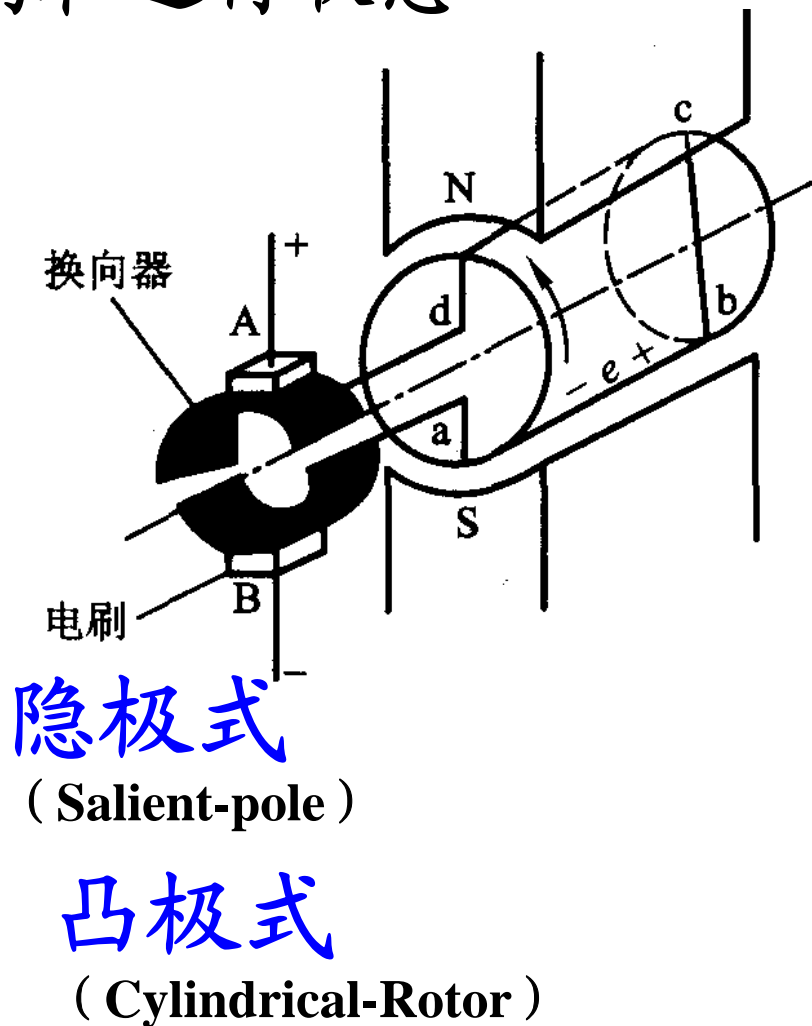
6.1 同步电机的基本结构和运行状态

一、同步电机的基本结构

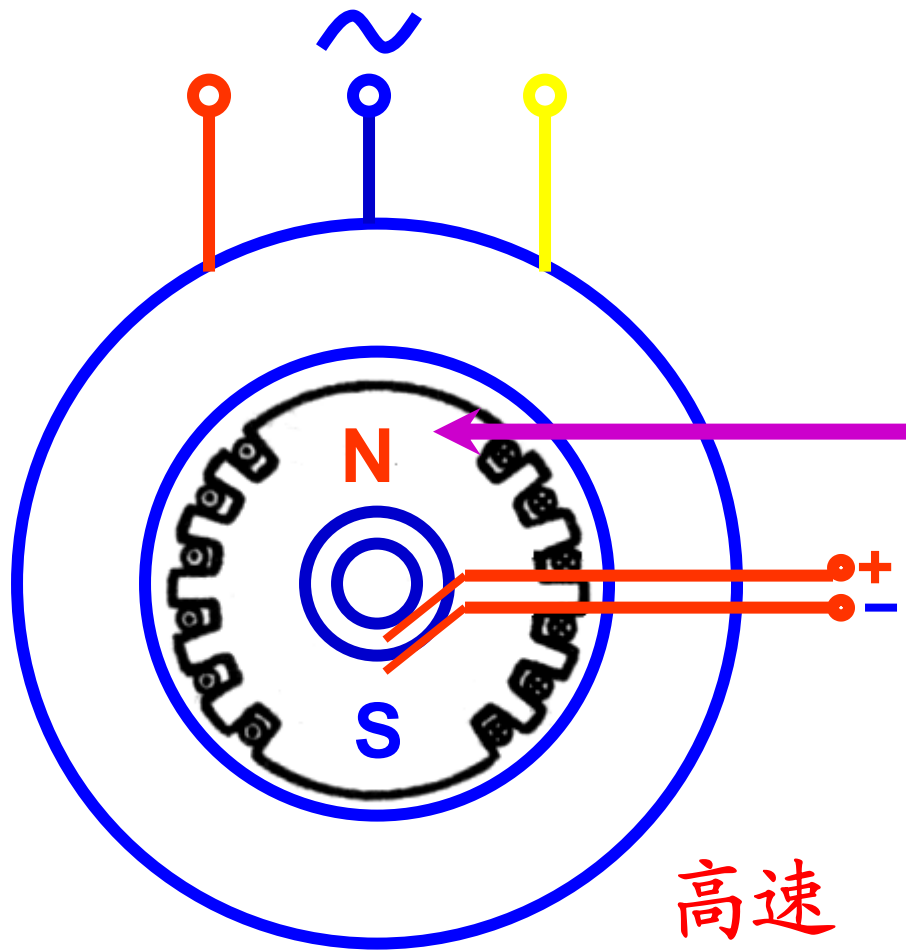


↓

基本结构形式

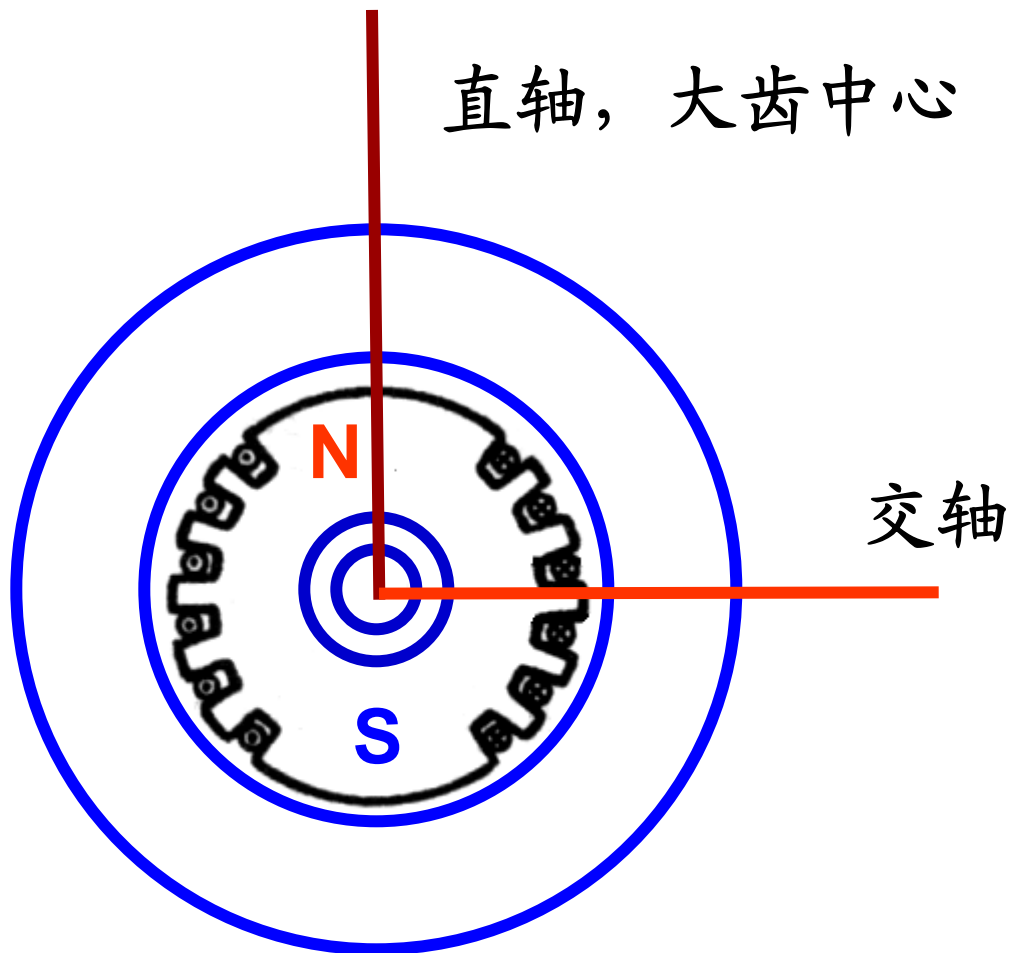


隐极式



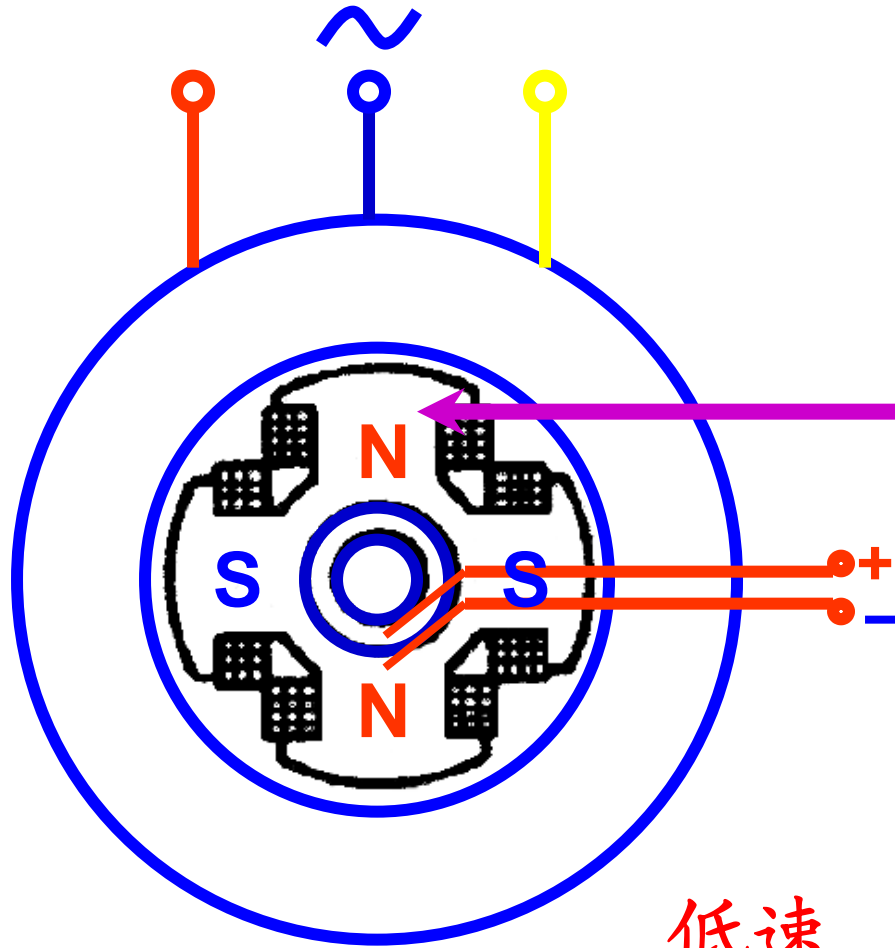
结构特点：转子是长圆柱形，气隙较为均匀，转子表面有大齿和小齿之分。一对极，由汽轮机拖动，称汽轮发电机

隐极式



联想到直流电机的交轴电枢反应和直轴电枢反应!

凸极式

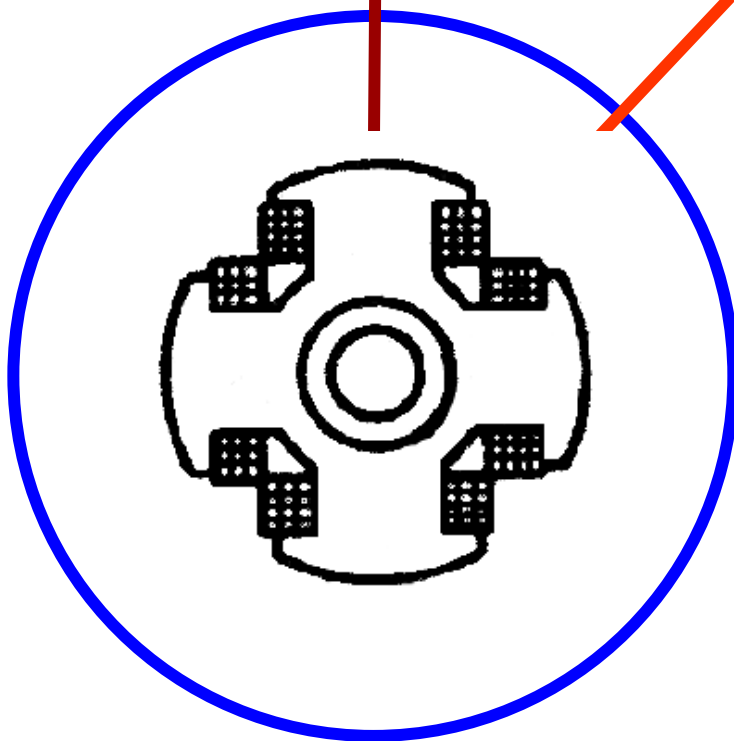


结构特点：转子是扁盘状，转子表面有明显凸出的磁极，气隙为不均匀。多对极，通常由水轮机拖动，称水轮发电机

凸极式

直轴，磁极中心

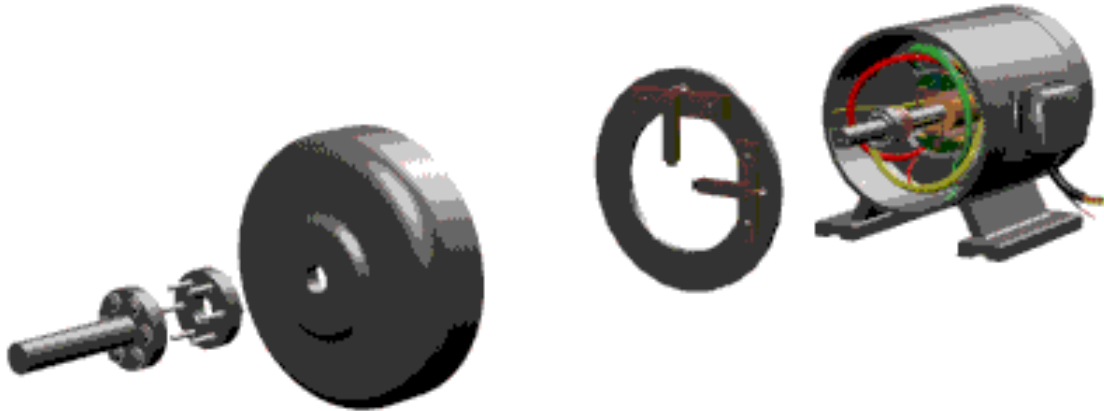
交轴



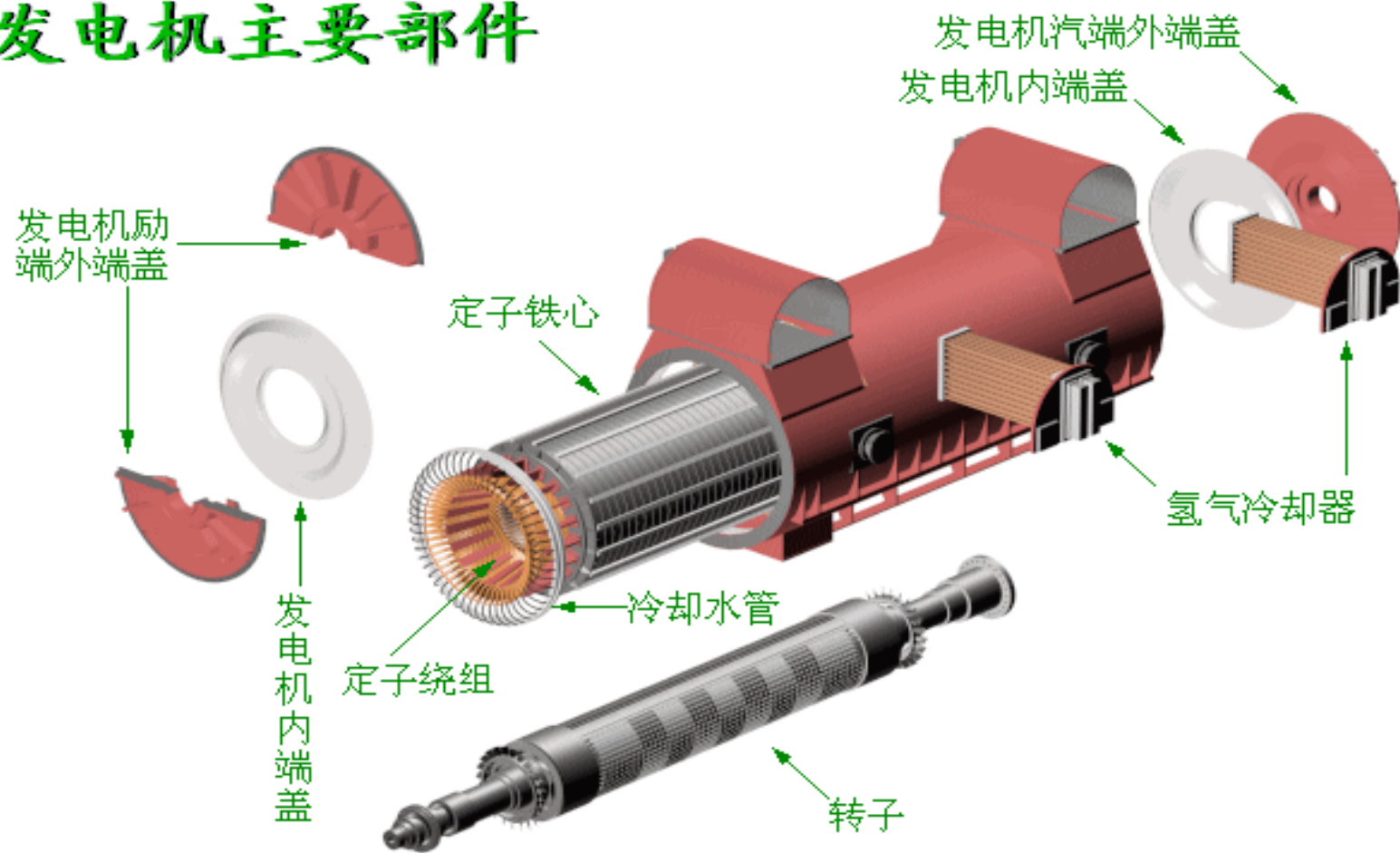
联想到直流电机的交轴电枢反应和直轴电枢反应!

直轴和交轴的气隙不均匀

1.1 零部件拆卸动画

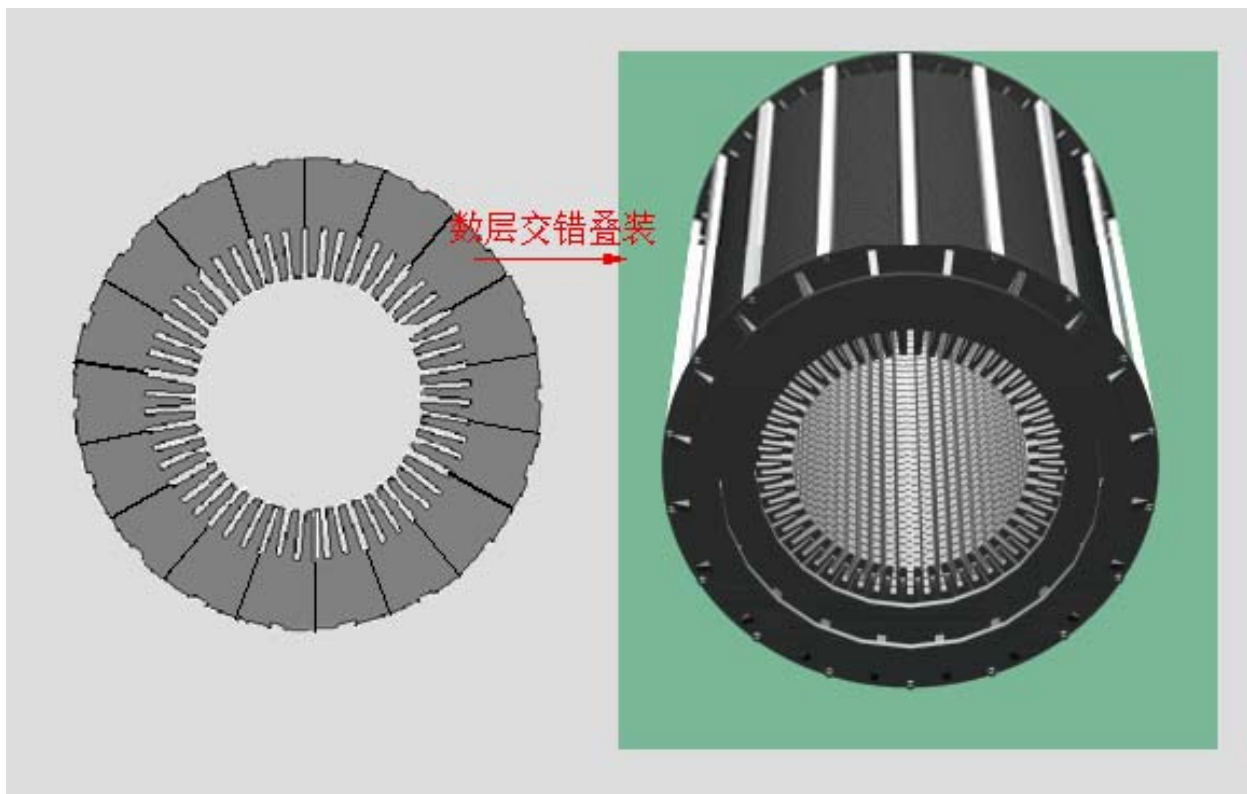


发电机主要部件

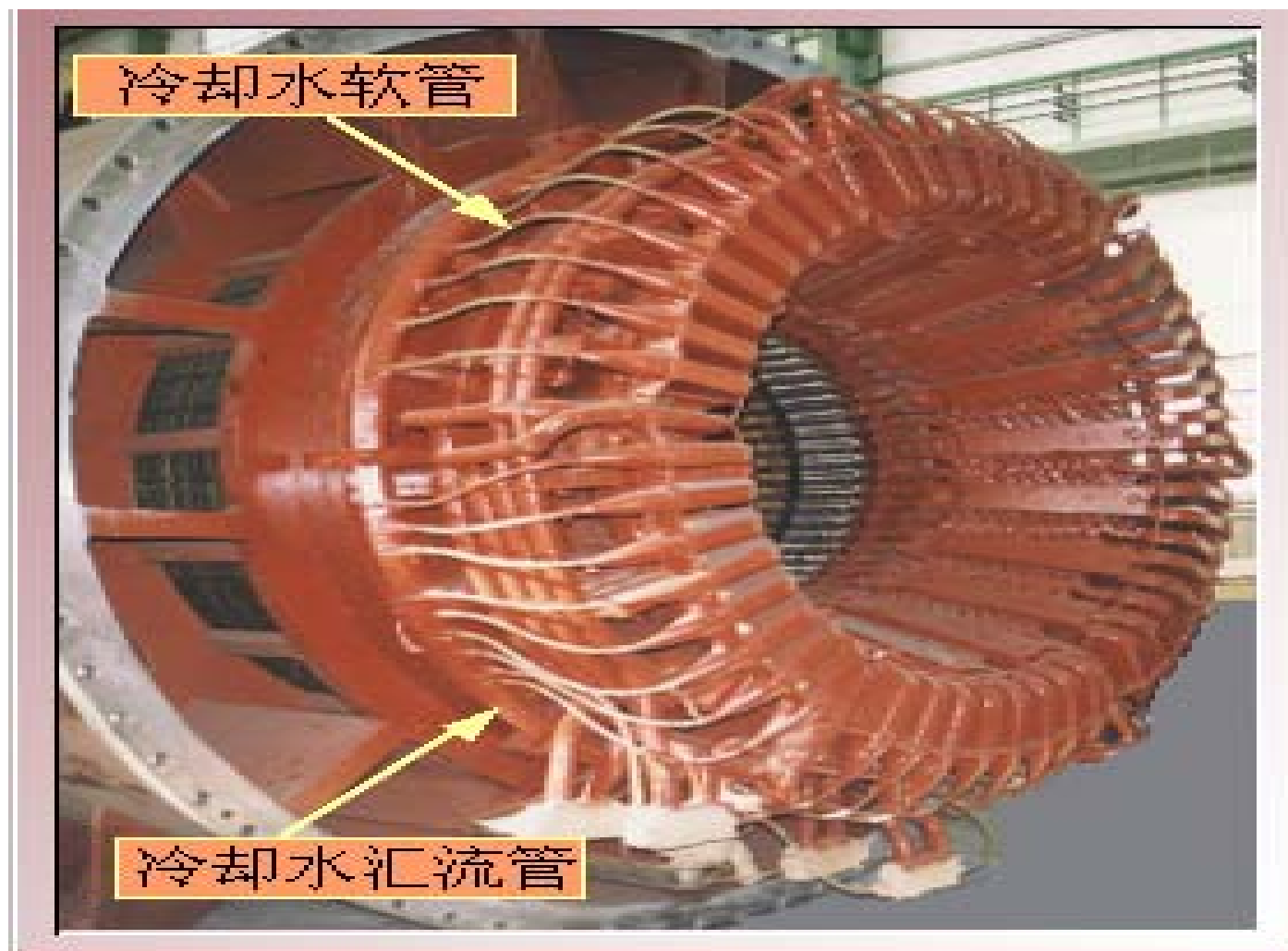


1、汽轮发电机结构

(1) 定子铁心



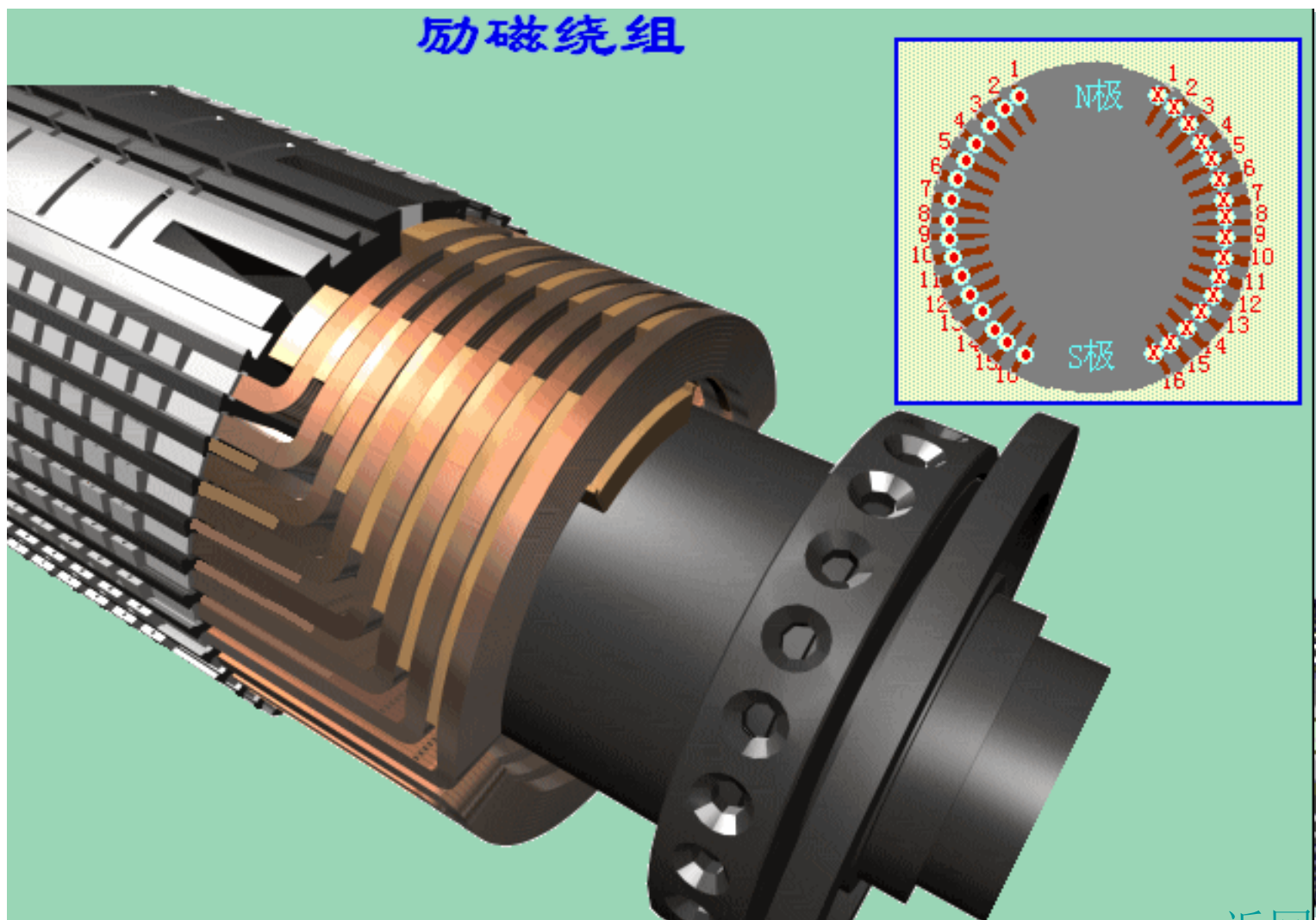
[返回](#)



汽轮发电机定子绕组端部结构照片

[返回](#)

1、汽 轮发电 机结构



[返回](#)

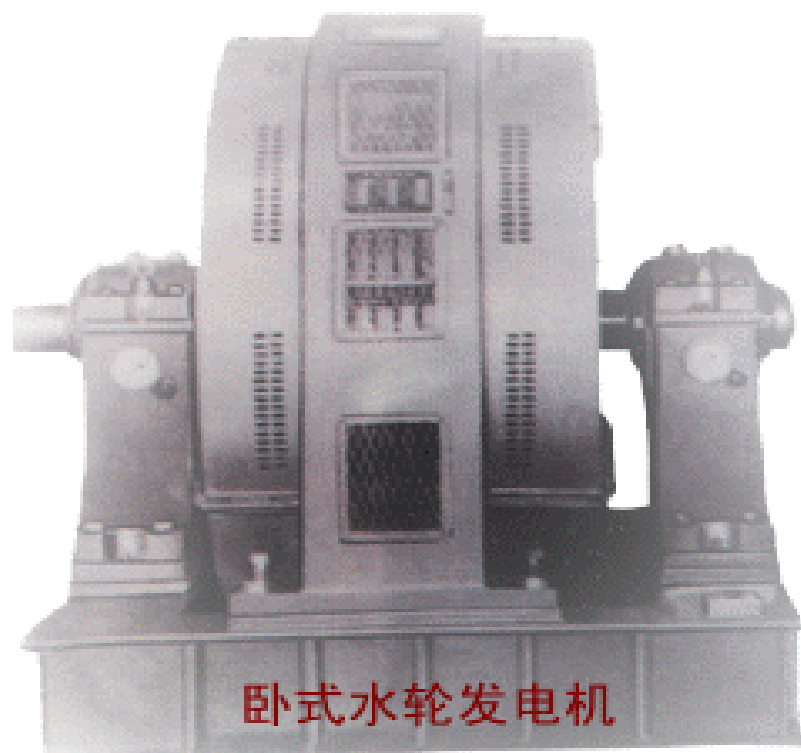
2、水轮发电机结构

(1) 立式水轮发电机



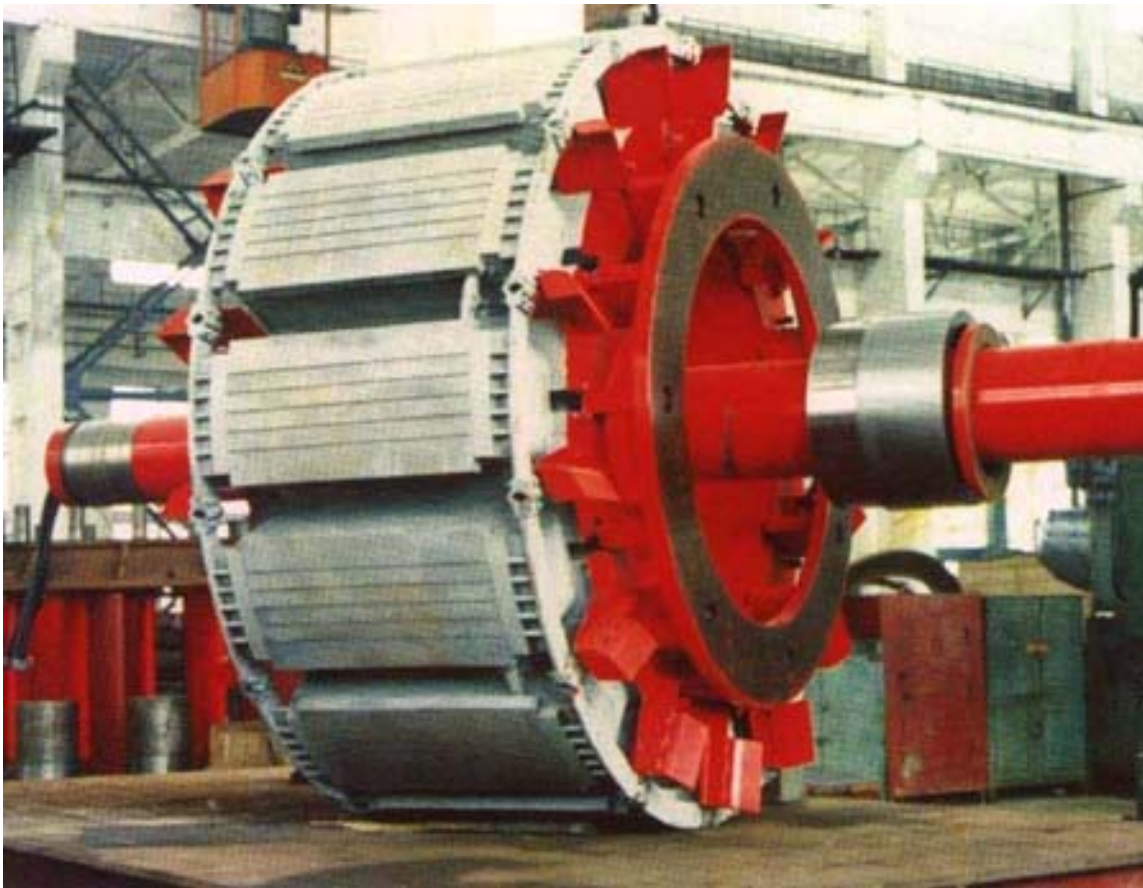
立式水轮发电机

(2) 卧式水轮发电机



卧式水轮发电机

2、水轮发电机结构转子结构

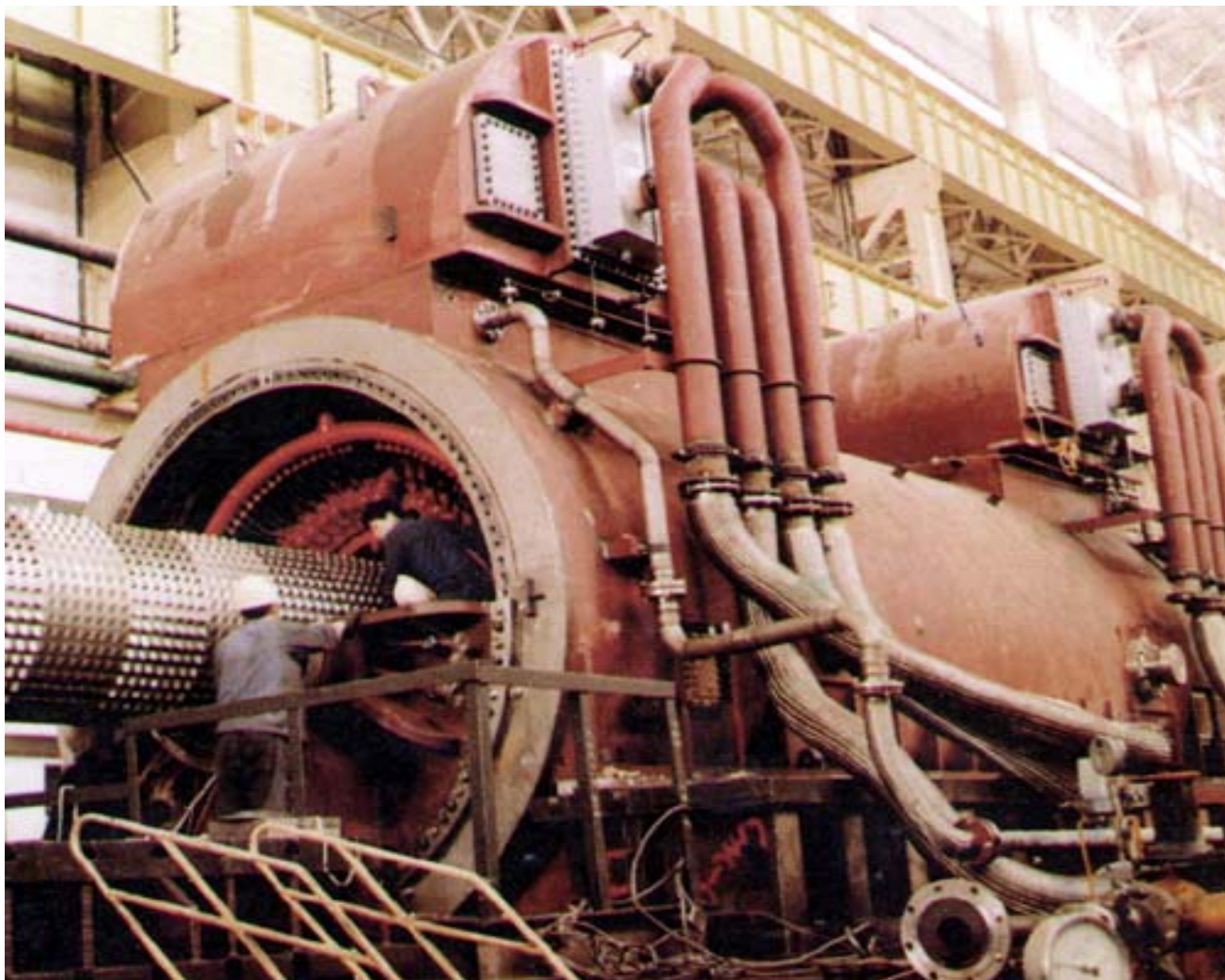


10000kW水轮机转子

1. 发电环节——各种电机



引进600MW汽轮发电机



国产300MW汽轮发电机



国产200MW汽轮发电机定子

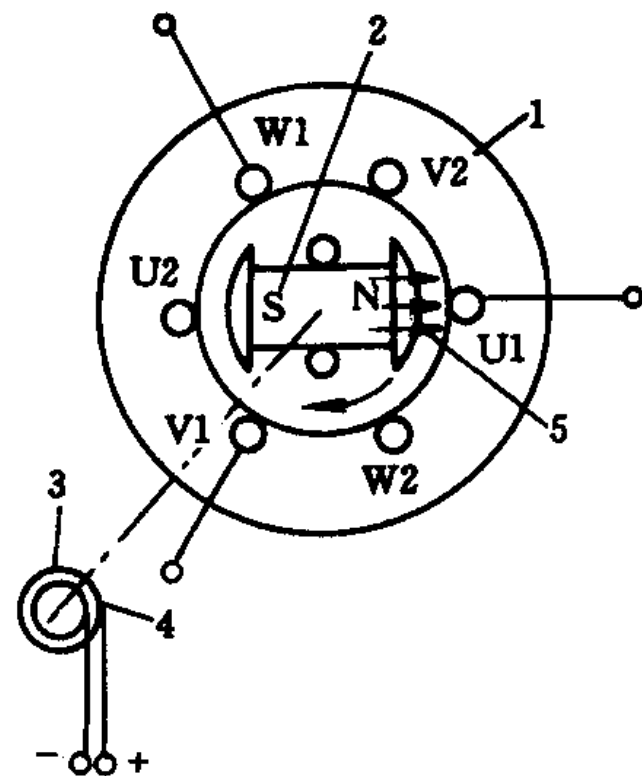
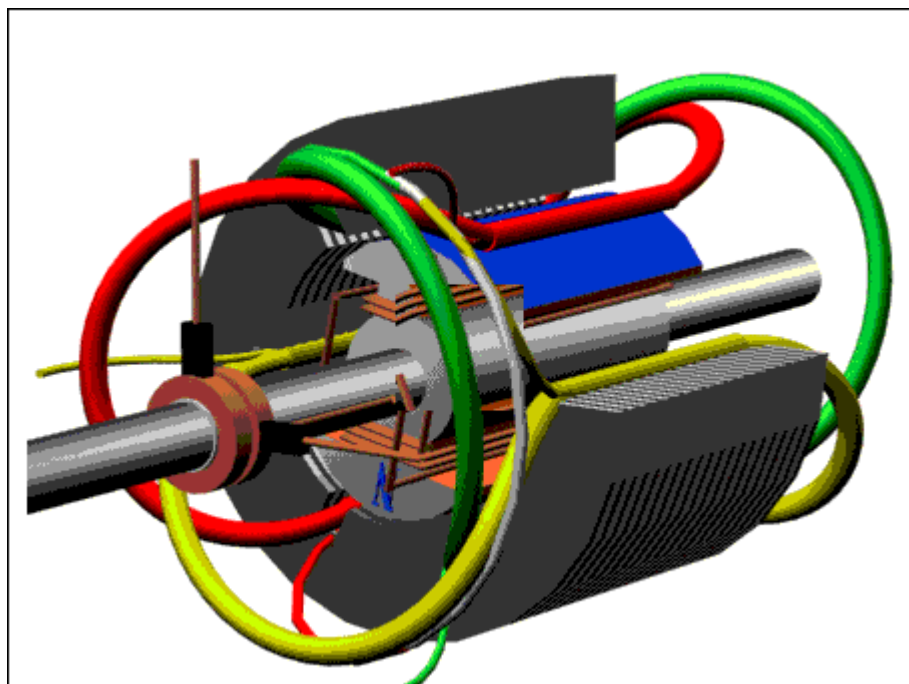


国产200MW汽轮发电机定子铁心



现场运行的水轮发电机

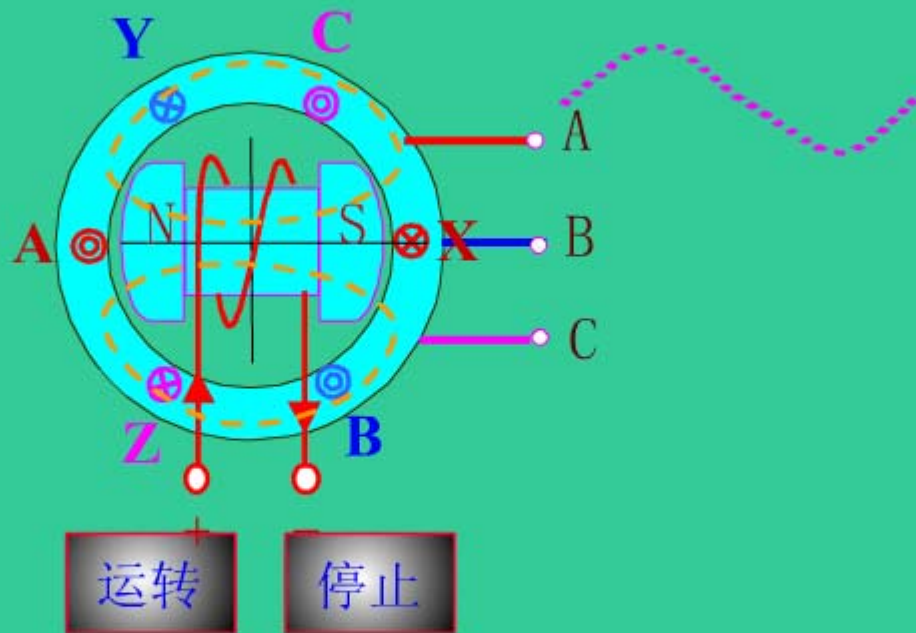
6.1 同步电机的基本工作原理与结构



1—定子铁心；2—转子；3—滑环；

4—电刷；5—磁力线

发电机的物理过程可用图示表示



6.1.2 同步电机的基本工作原理与分类

一、同步发电机的基本工作原理

励磁绕组通入直流电流后建立恒定磁场，原动机拖动转子以转速 n 旋转时，其磁场切割定子绕组而感应交流电动势 E_0 。

频率：
$$f = \frac{pn}{60}$$

大小：
$$E_0 = 4.44 f N_1 k_{w1} \Phi_0$$

波形：由 $e = B_{(x)} l v$ 可知，波形取决于 $B_{(x)}$ 的空间分布。

相序：由转子的转向决定。

二、同步电机的运行状态

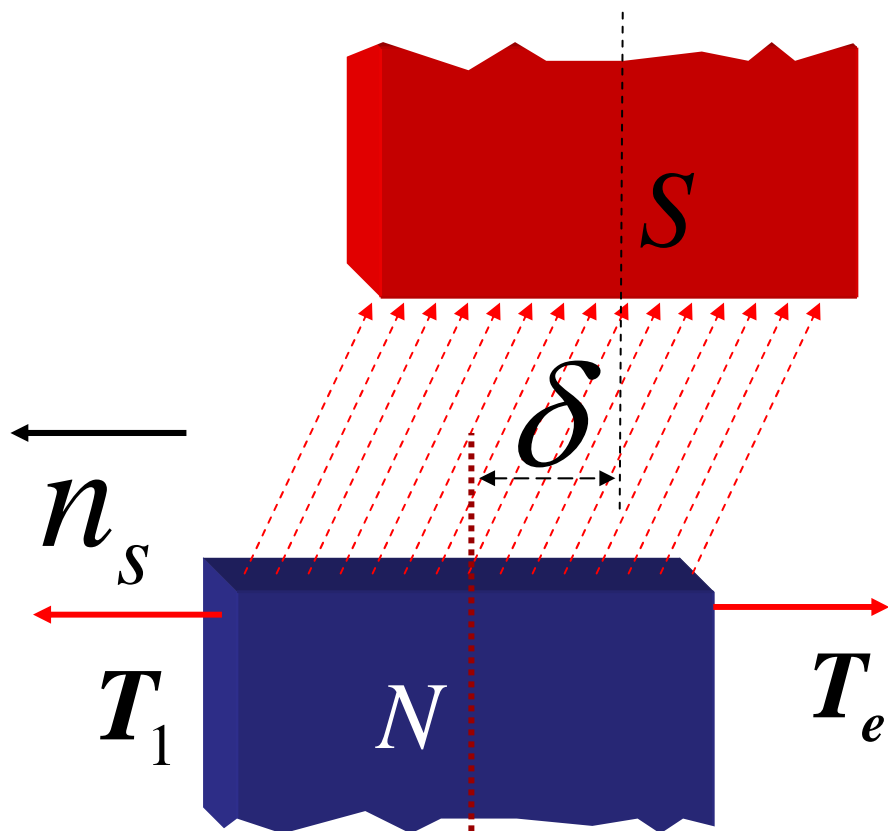
电动机——把电能转换为机械能

补偿机——中没有有功功率的转换，专门发出或吸收无功功率，**调节电网的功率因数**

发电机——把机械能转换为电能

同步电机运行于哪一种状态，主要取决于定子合成磁场与转子主磁场之间的夹角 δ ， δ 称为**功率角**

定子合成磁场等效磁极(电气旋转磁场)

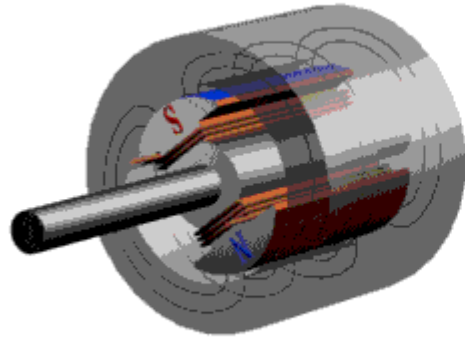


$$P_e = T_e \Omega_s$$

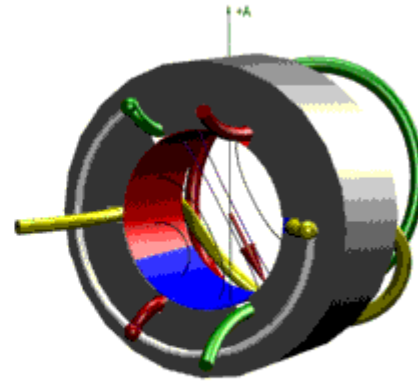
做功和电枢反应的性质，取决于电气旋转磁场（定子合成磁场）轴线和直轴之间的电角度。

转子主磁极(机械旋转磁场)

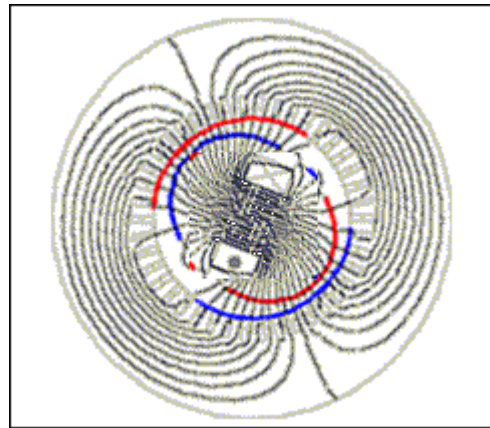
直轴



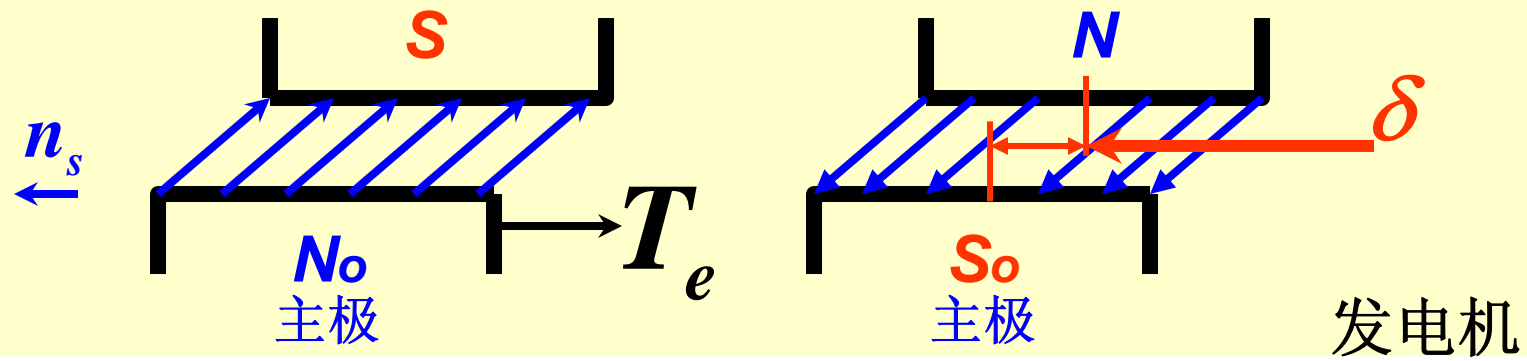
转子磁场示意图



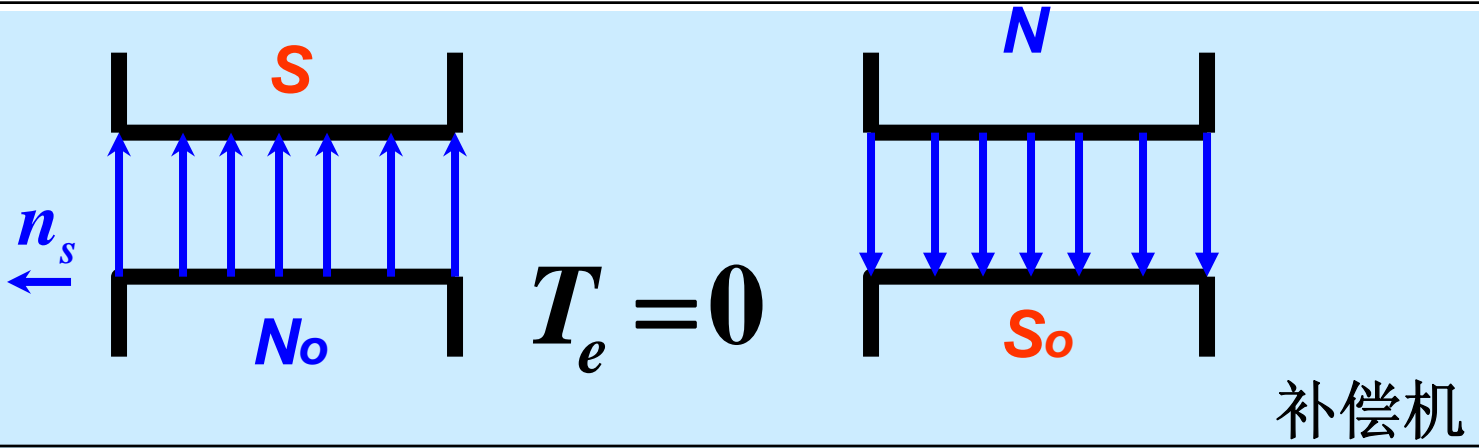
定子磁场示意图



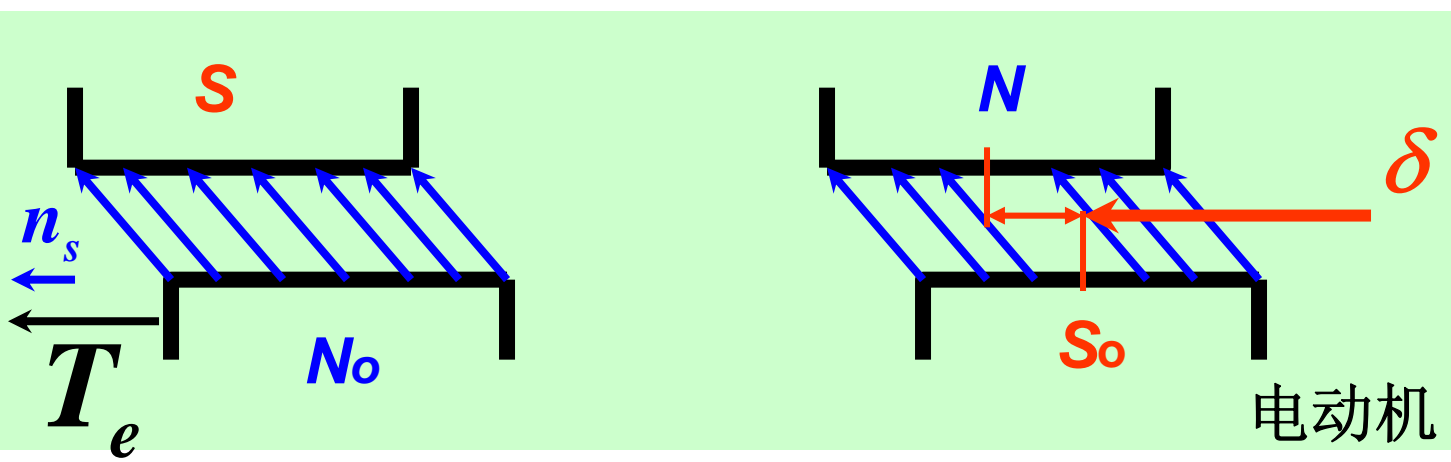
同步电机的三种运行状态



发电机



补偿机



电动机

三、同步电机的励磁方式

直流励磁机励磁

直流励磁机通常与同步发电机同轴，采用并励或他励接法。如图6—8所示

整流器励磁静止式和旋转式

整流器励磁又分为静止式和旋转式两种。图6-9表示静止整流器励磁系统的原理图

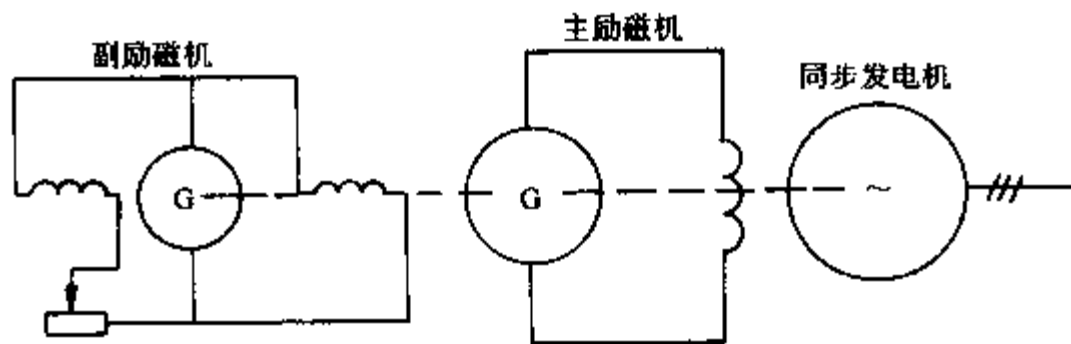


图 6-8 带副励磁机的励磁系统

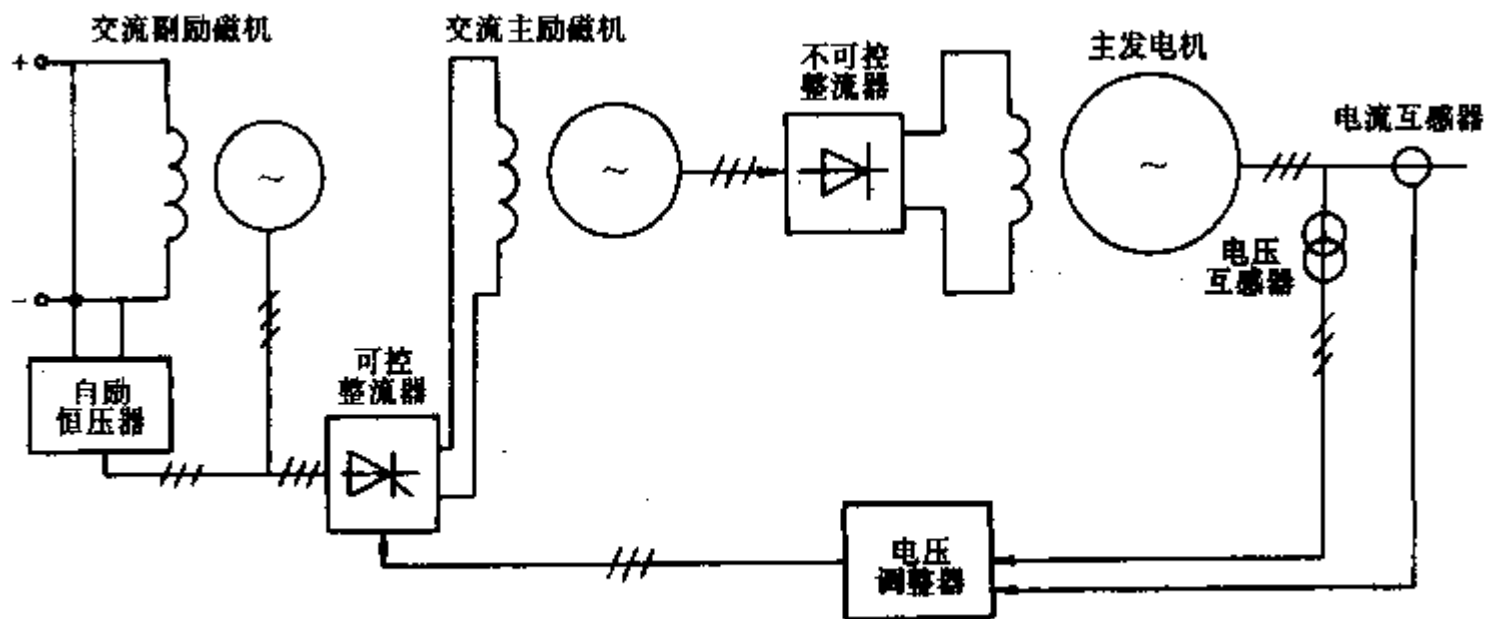


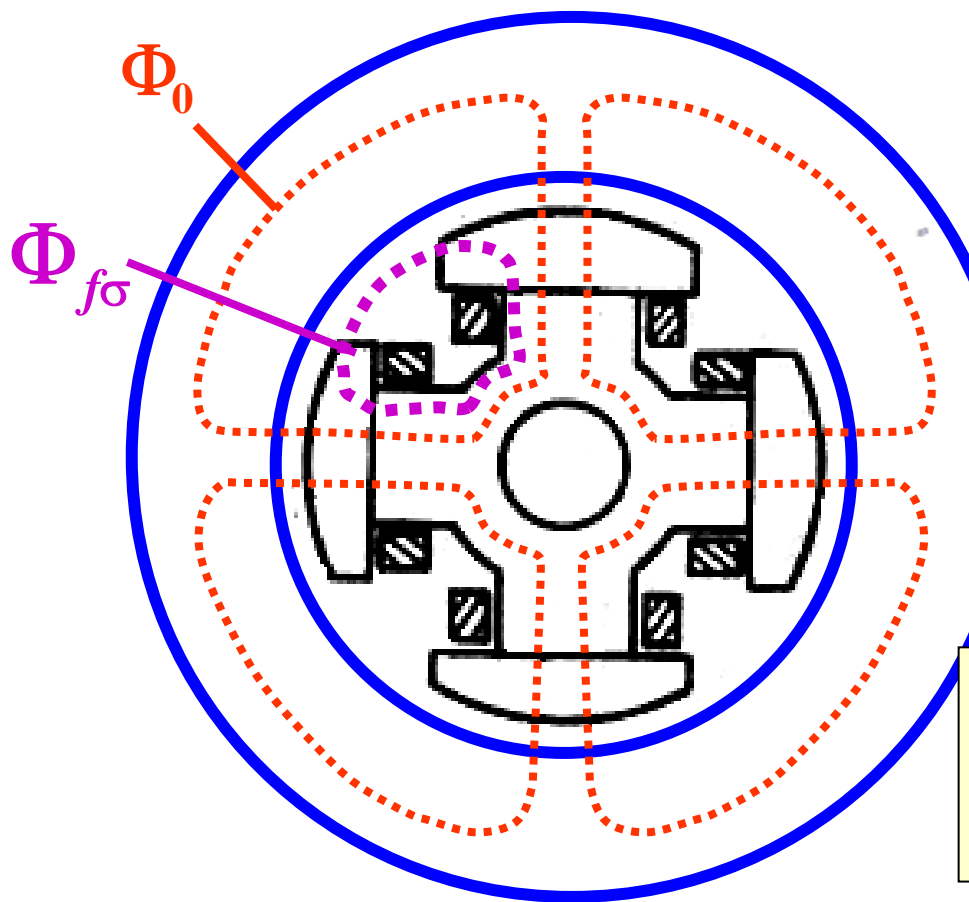
图 6-9 静止整流器励磁系统

四、额定值

- **额定容量 S_N (或额定功率 P_N)** —— 指额定运行时电机的输出功率。单位kVA表示容量，单位kW表示有功功率
- **额定电压 U_N** —— 指额定运行时定子的**线电压**
- **额定电流 I_N** —— 指额定运行时定子的**线电流**
- **额定功率因数 $\cos \Phi$** —— 指额定运行时电机的功率因数
- **额定频率 f_N** —— 指额定运行时电枢的频率。我国标准工频规定为**50Hz**
- **额定转速 n_N** —— 指额定运行时电机的转速，对同步电机而言，即为同步转速

6.2 空载和负载时同步发电机的磁场

一、空载运行空载运行时，同步电机内仅有由励磁电流所建立的主极磁场。



主磁通 Φ_0 通过气隙并与定子绕组相交链，主磁通所经过的主磁路包括空气隙、电枢齿、电枢轭、磁极极身和转子轭等五部分

漏磁通 $\Phi_{f\sigma}$ 不通过气隙，仅与励磁绕组相交链

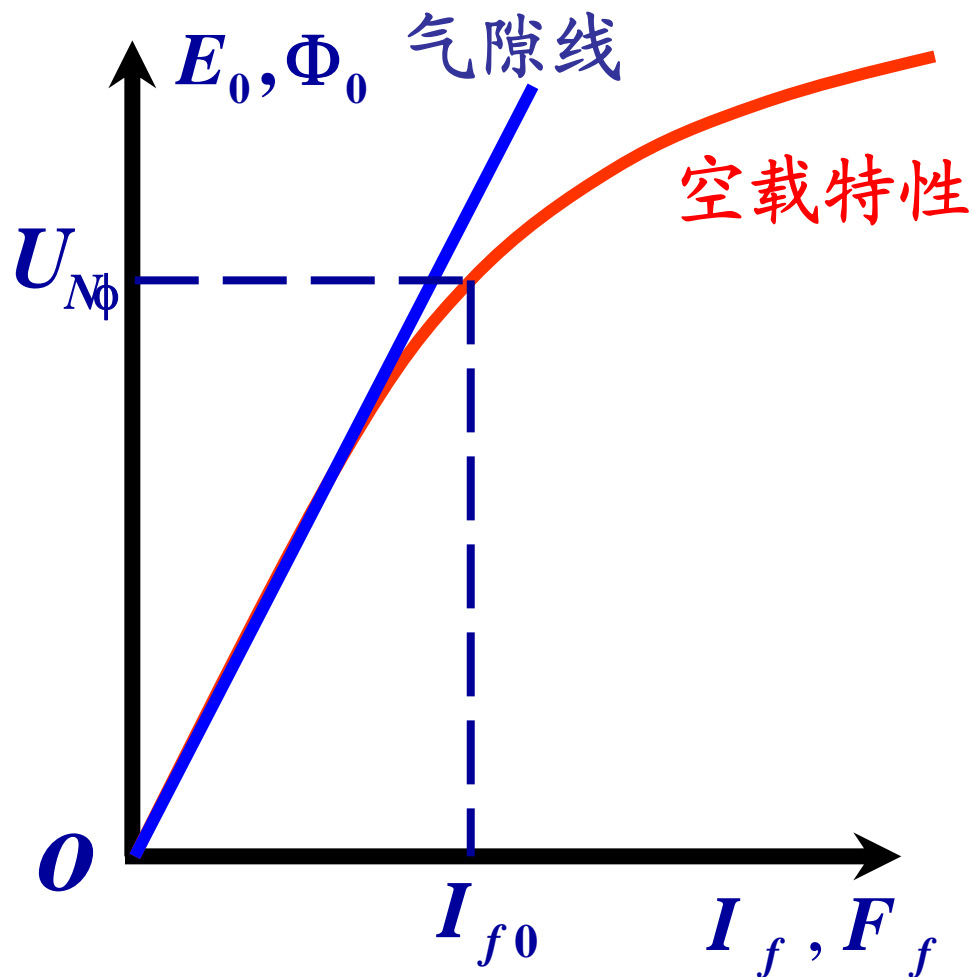
当转子以同步转速旋转时，主磁场将在气隙中形成一个旋转磁场，它“切割”对称的三相定子绕组后，就会在定子绕组内感应出一组频率为 f 的对称三相电动势，称为**激磁电动势**

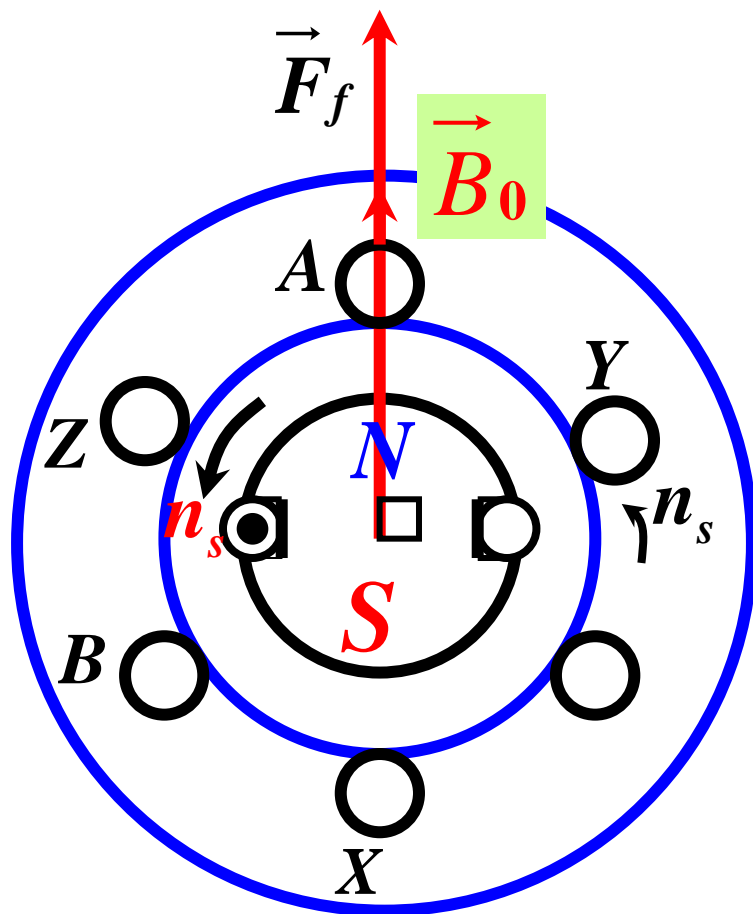
$$\dot{E}_{0A} = E_0 \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_{0B} = E_0 \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_{0C} = E_0 \angle -240^\circ$$

空载特性是同步电机的一条基本特性





励磁磁动势 \vec{F}_f 被固定在转子直轴上, 改变励磁电流的大小, 只会改变 \vec{F}_f 的幅值, 而不会改变相对于转子的位置

二、对称负载时的电枢反应

•当定子接上负载后，电枢绕组将流过对称三相电流，定子电枢电流将产生**电枢磁动势**

电枢磁动势与**励磁磁动势**相互作用形成负载时气隙中的**合成磁动势**，并建立负载时的气隙磁场。这时尽管励磁电流没有改变，但气隙磁场已经不同于原来的励磁磁场。

对称负载时电枢磁动势的基波对主极磁动势基波的影响称为**电枢反应**。

电枢反应的性质取决于电枢磁动势与励磁磁动势的空间相对位置

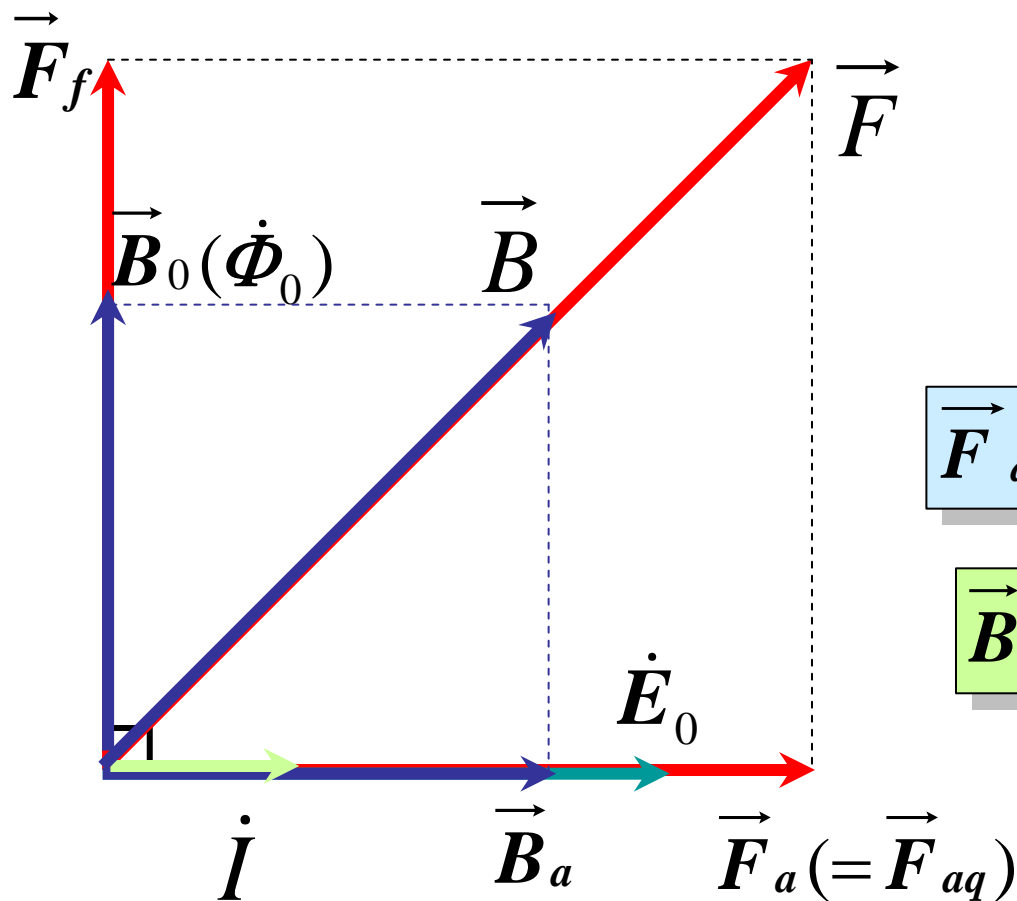
二、对称负载时的电枢反应

电枢磁动势的基波在气隙中所产生的磁场就称为电枢反应。

电枢反应的性质(增磁、去磁或交磁)取决于电枢磁动势和主磁场在空间的相对位置。

分析表明电枢磁动势与励磁磁动势在空间的相对位置取决于激磁电动势 E_0 和负载电流 I 之间的相角差 ψ_0, ψ_0 称为内功率因数角

(1) \dot{I} 和 \dot{E}_0 同相 $\psi_0 = 0$

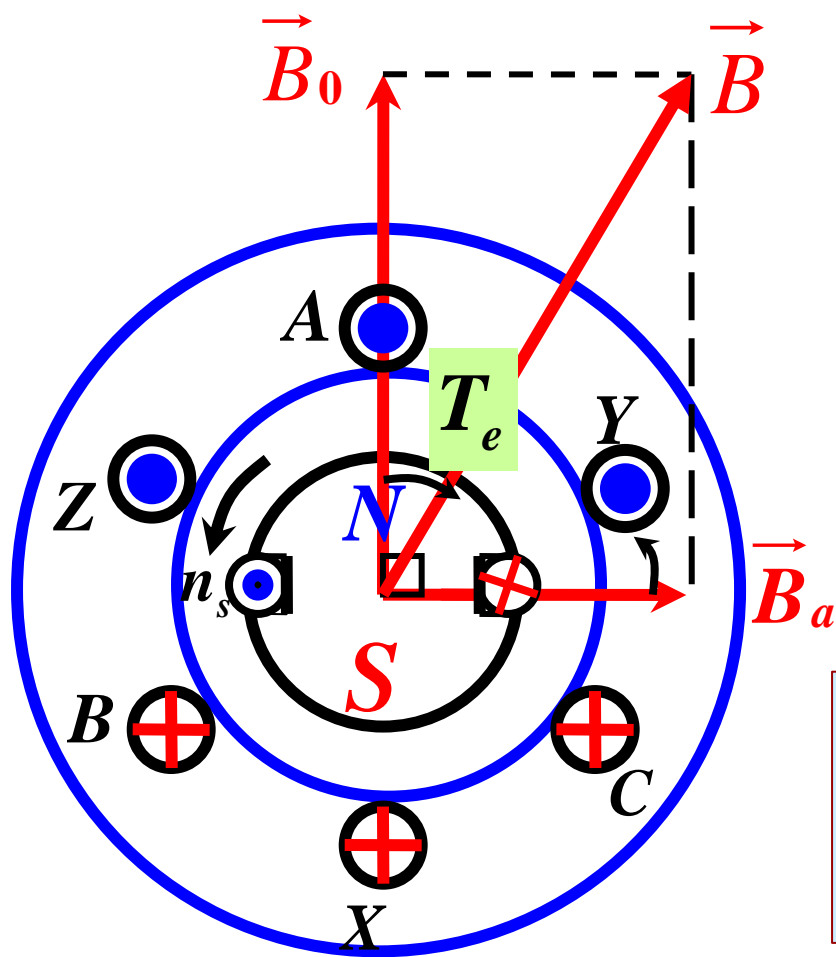


\vec{F}_{aq} 交轴电枢磁动势

\vec{B} 气隙合成磁场

(1) \dot{I} 和 \dot{E}_0 同相 结论

使合成磁场轴线位置从空载时的直轴处，逆转向后移了一个锐角，而幅值也有所增加



\vec{B}_0 主磁场

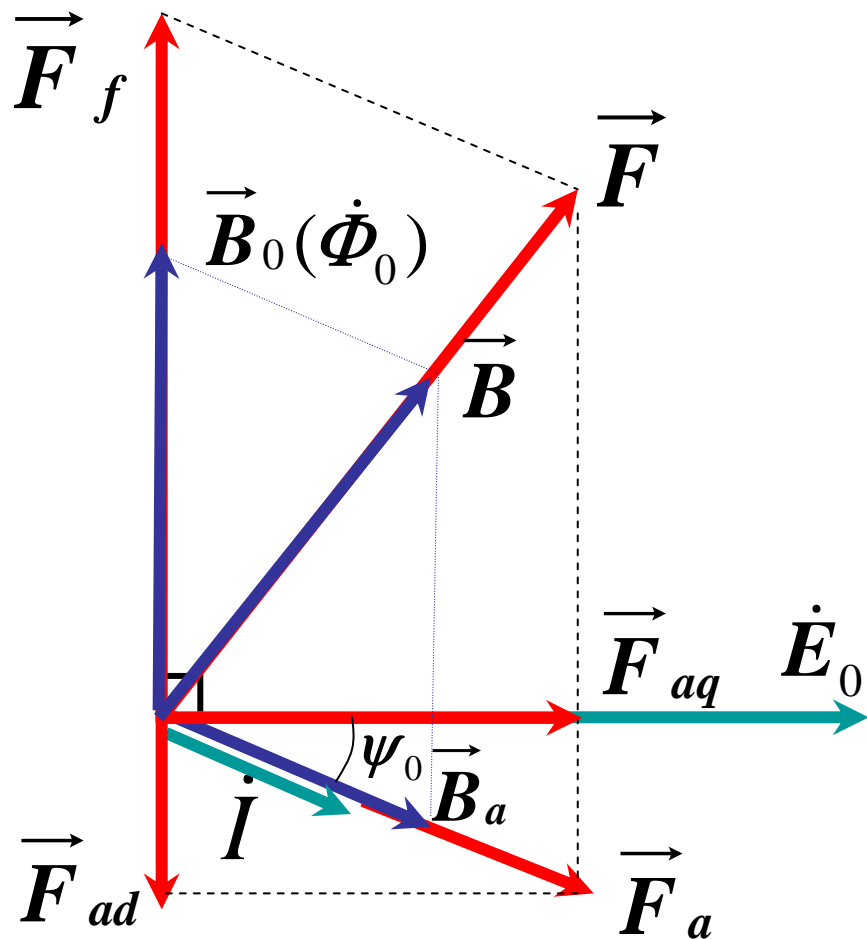
\vec{B} 气隙合成磁场

\vec{B}_a 电枢磁场

当 $\psi_0=0^\circ$ 时，主磁场将超前于气隙合成磁场，于是主极上将受到一个制动性质的电磁转矩。 发电机

(2) \dot{I} 和 \dot{E}_0 不同相

a) \dot{I} 滞后于 \dot{E}_0 时的空间矢量图



\vec{F}_{ad} 是去磁性质

如果 \dot{E}_0 与 \dot{I} 夹角为 30° (滞后为正)
则 \vec{F}_f 和 \vec{F}_a 的夹角为 120° !!!

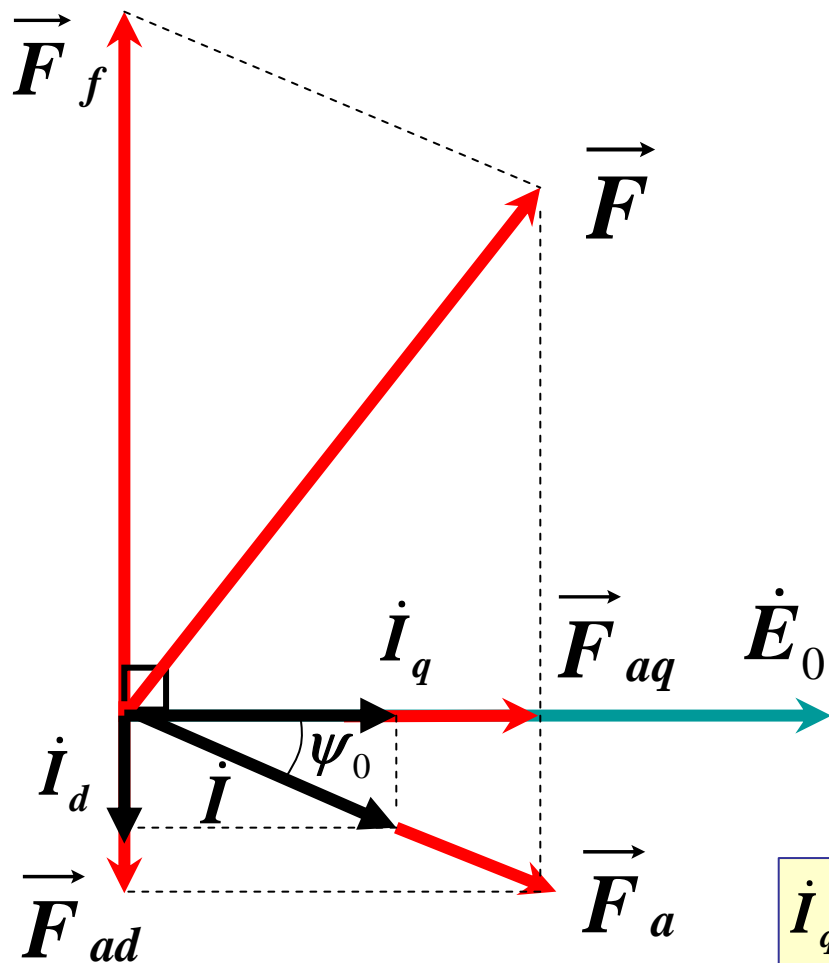
\vec{F}_a 滞后 \vec{F}_f $90^\circ + \psi_0$

\vec{F}_{ad} 作用是去磁

(2) \dot{I} 和 \dot{E}_0 不同相

从电流角度分析

a) \dot{I} 滞后于 \dot{E}_0 时的空间矢量图



不管时隐极机和凸机同步电机
 \dot{I} 都可以分解为 \dot{I}_d 和 \dot{I}_q

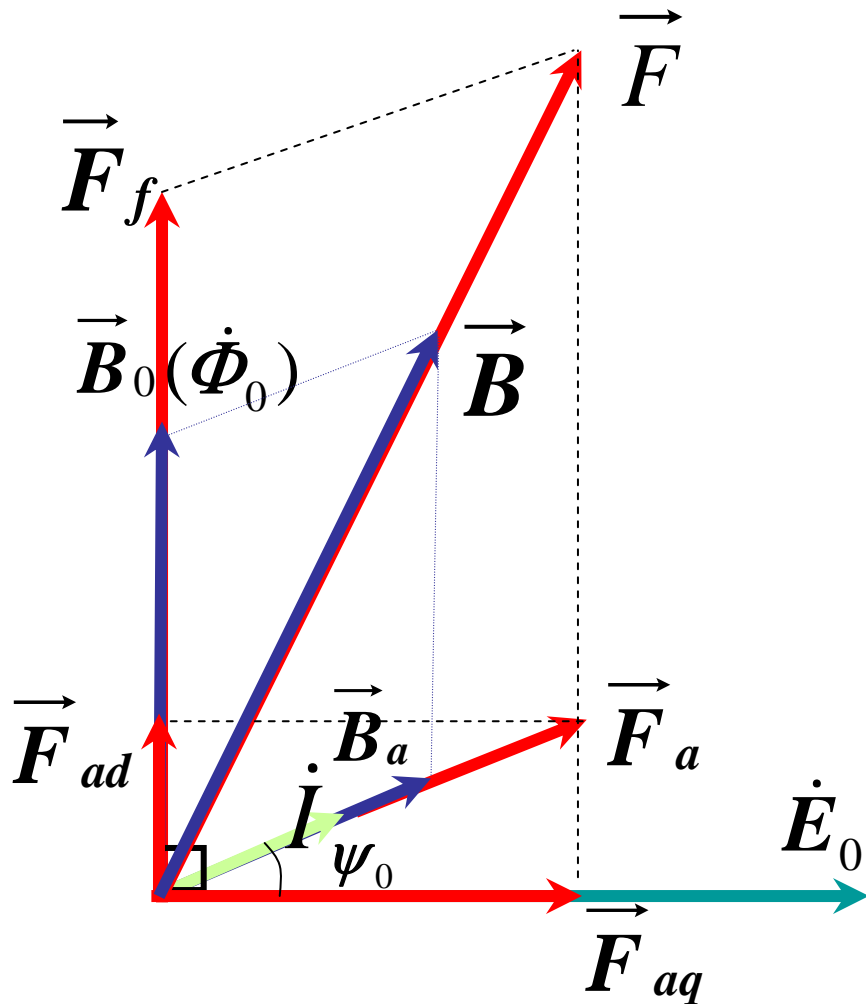
从电机的运行状态来看，
要发生机电能量转换必
然要使磁场发生扭斜，因此
 \dot{I} 必须含有交轴分量

\dot{I}_q 和 \dot{E}_0 的位置都是在交轴上

\dot{I}_q 的存在使 \vec{F}_f 和 \vec{F} 之间拉开了一个角度

(2) \dot{I} 和 \dot{E}_0 不同相

b) \dot{I} 超前于 \dot{E}_0 时的空间矢量图



\vec{F}_{ad} 作用是助磁

电枢磁动势

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

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$

$$F_{ad} = F_a \sin \psi_0$$

$$I_d = I \sin \psi_0$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi_0$$

$$I_q = I \cos \psi_0$$

交轴电枢反应使功角拉开，与产生电磁转矩和能量转换直接相关

直轴电枢反应对同步电机运行影响很大。

1. 若同步发电机单独供电给一组负载，则负载后，去磁或者增磁性的直轴电枢反应将使气隙内的合成磁通减少或者增加，从而使发电机的端电压产生变动。

2. 若同步发电机接在电网上，由于电压受到电网控制而不可撼动，将影响无功功率和功率因数。

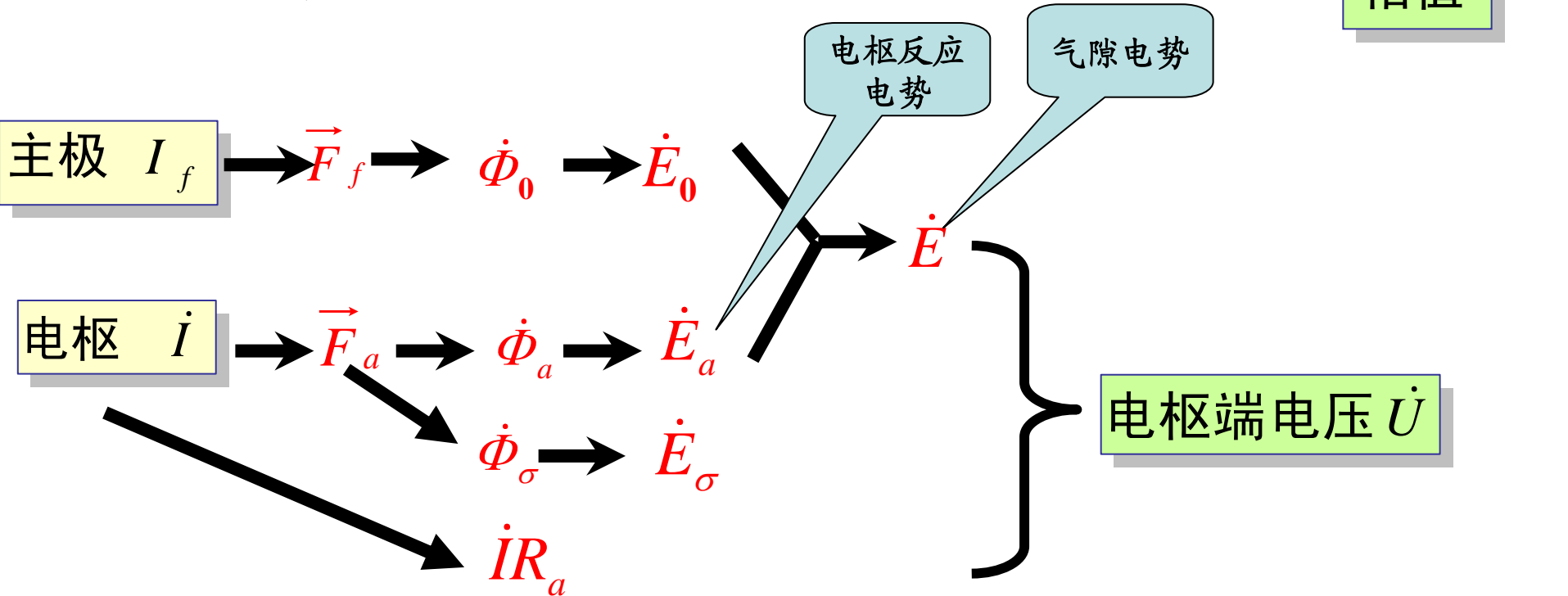
电枢反应后的同步电机磁场

- 负载后励磁磁动势和电枢磁动势形成了一个合成磁场,交轴电枢反应使气隙磁场发生畸变.
- 实际磁场分布和直流电机相似.
- 气隙合成磁场扭斜的程度越大,使在磁场间所产生的切向力及电磁转矩和电磁功率就越大。功率角正是来刻画这种扭斜的程度。

6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路

一、不考虑磁饱和，同步发电机负载运行时

相值



$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R_a \quad \rightarrow \quad \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_\sigma$$

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

$$\dot{E}_0 = \dot{U} - \dot{E}_a + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_\sigma$$

同步电抗

$$\dot{E}_a = -jIX_a$$

X_a 是与电枢反应磁通相对应的电抗，称为电枢反应电抗

$$\dot{E}_0 = \dot{U} - \dot{E}_a + \dot{I}R_a + jIX_\sigma$$

内阻抗

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + jIX_a + jIX_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R_a + jIX_s$$

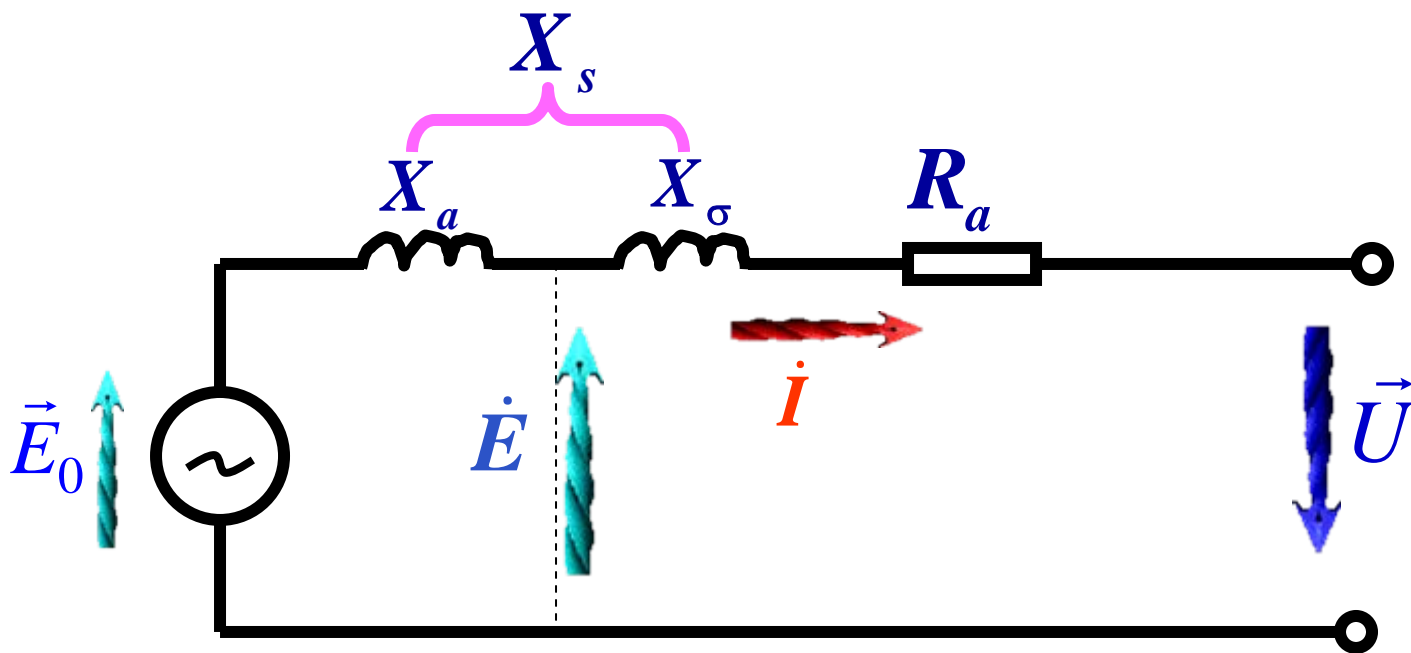
X_s 称为隐极同步电机的同步电抗， $X_s = X_a + X_\sigma$ 。它是对称稳态运行时表征电枢反应和电枢漏磁这两个效应的一个参数。不计饱和时 X_s 是常数

隐极同步发电机的等效电路

$$\vec{E}_0 = \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}X_a + j\vec{I}X_\sigma = \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}X_s$$

$R_a + jX_s$ 是内阻抗

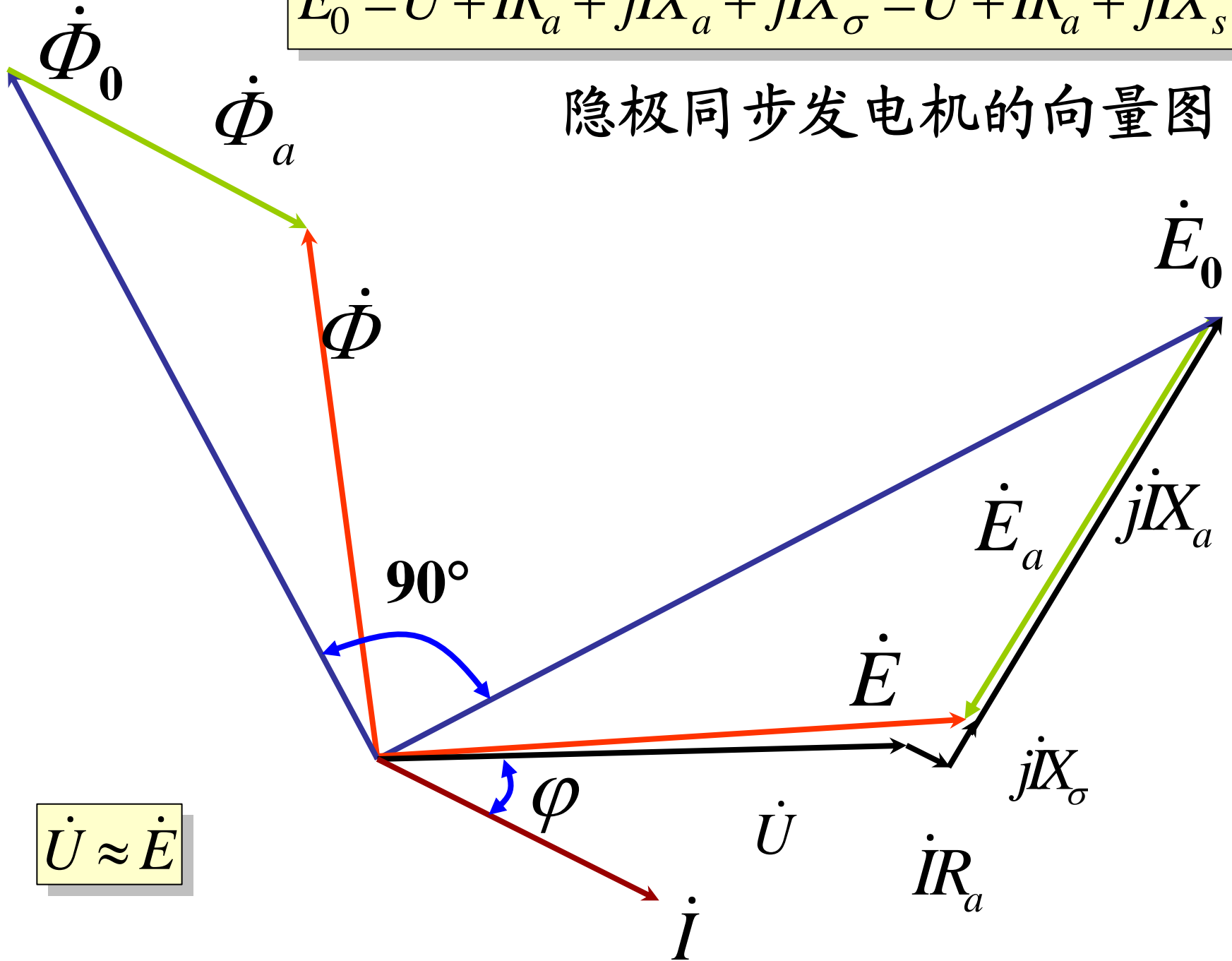
\vec{E}_0 是电源



带有内阻抗的电源

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_a + j\dot{I}X_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_s$$

隐极同步发电机的向量图



$$\dot{U} \approx \dot{E}$$

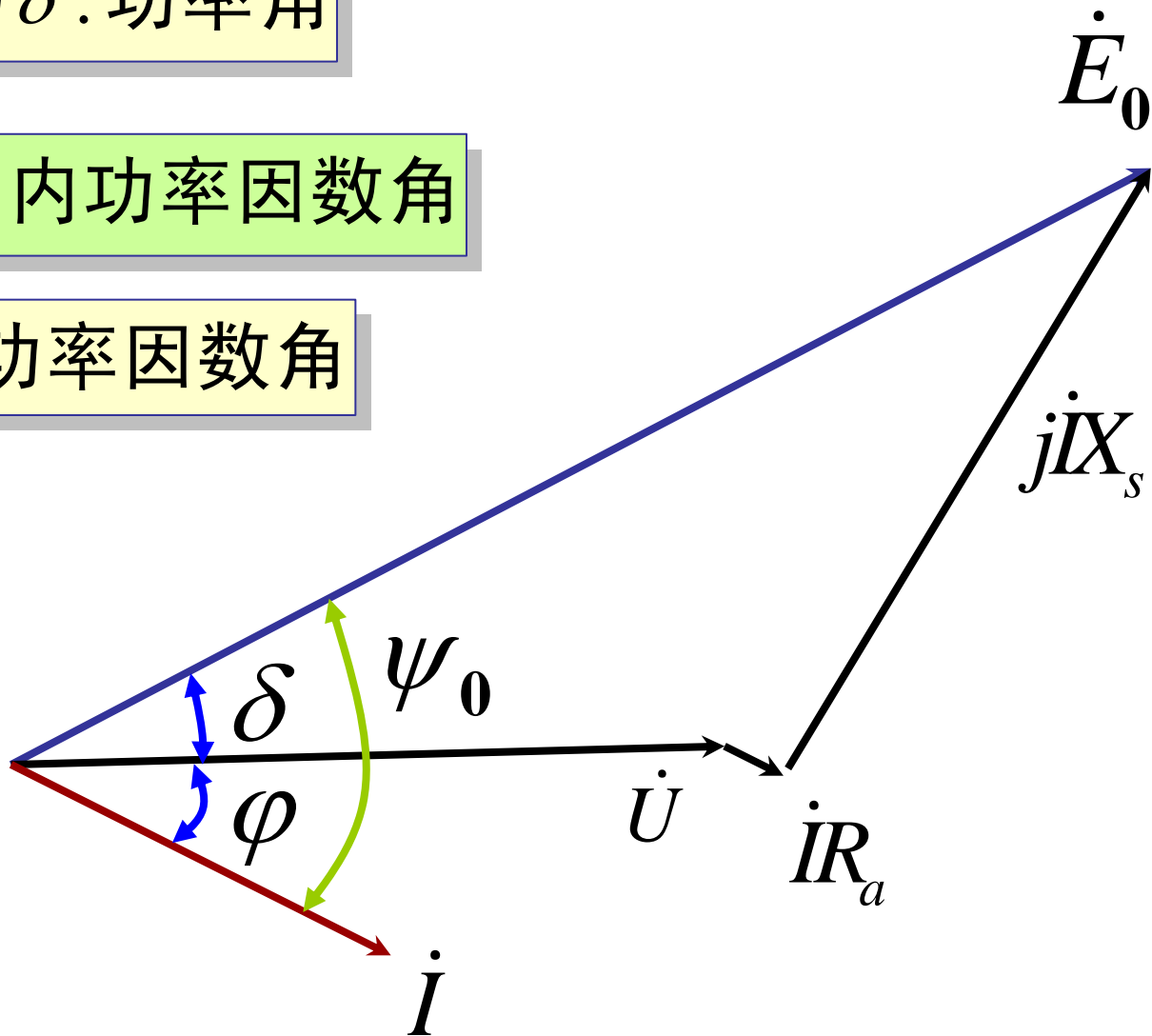
隐极同步发电机的向量图

\dot{E}_0 和 \dot{U} 的夹角为 δ :功率角

角度的含义

\dot{E}_0 和 \dot{I} 的夹角 ψ_0 :内功率因数角

\dot{U} 和 \dot{I} 的夹角 φ :功率因数角



$$\psi_0 = \delta + \varphi$$

隐极同步发电机的向量图绘制步骤

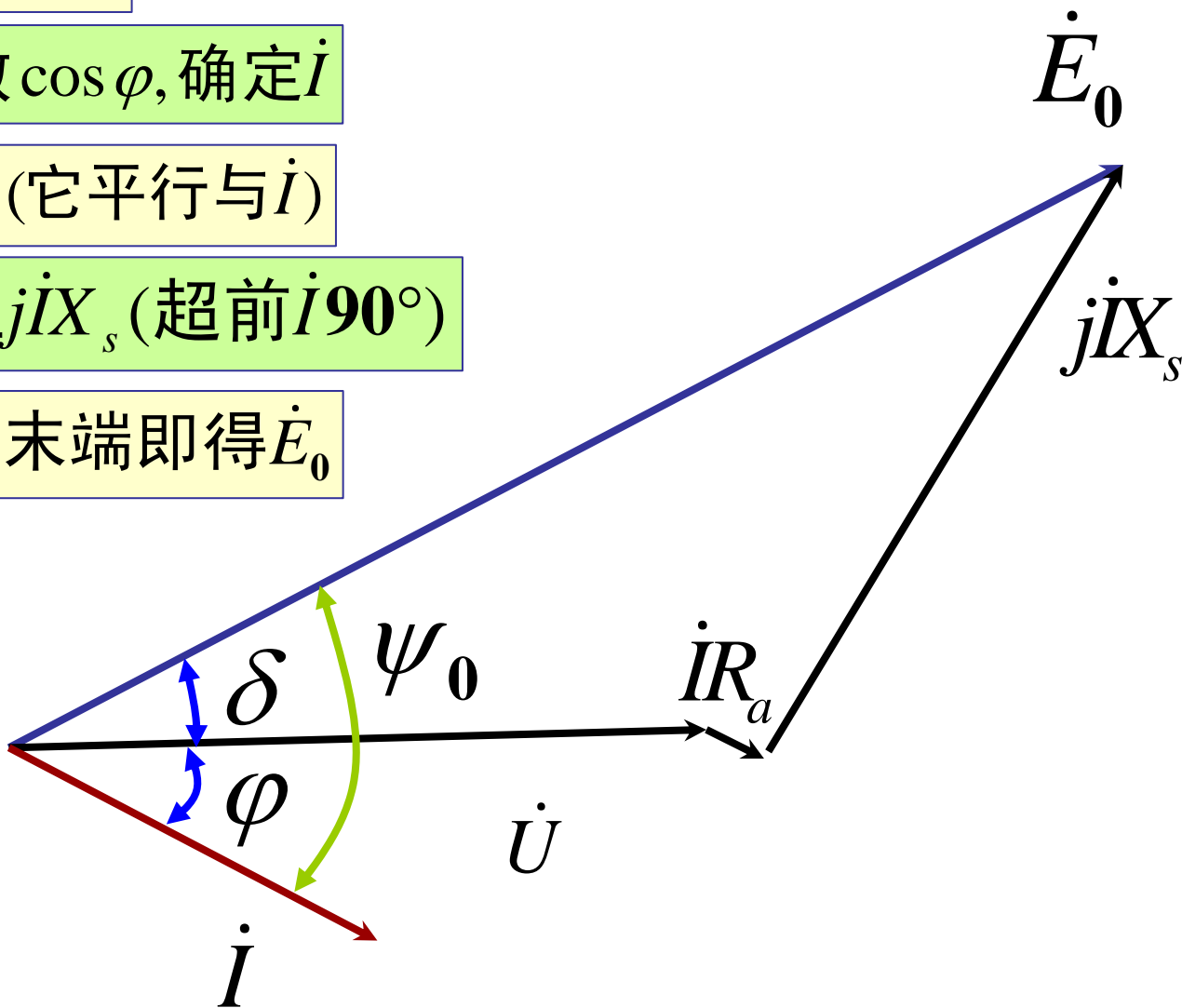
以 \dot{U} 作为参考向量先画出

根据负载功率因数 $\cos\varphi$, 确定 \dot{I}

在 \dot{U} 的末端加上 $\dot{I}R_a$ (它平行与 \dot{I})

在 $\dot{I}R_a$ 的末端加上 $j\dot{I}X_s$ (超前 $\dot{I}90^\circ$)

连接原点和 $j\dot{I}X_s$ 的末端即得 \dot{E}_0



隐极同步发电机的向量图的分析

$$E_0 \sin \psi_0 = IX_s + U \sin \varphi$$

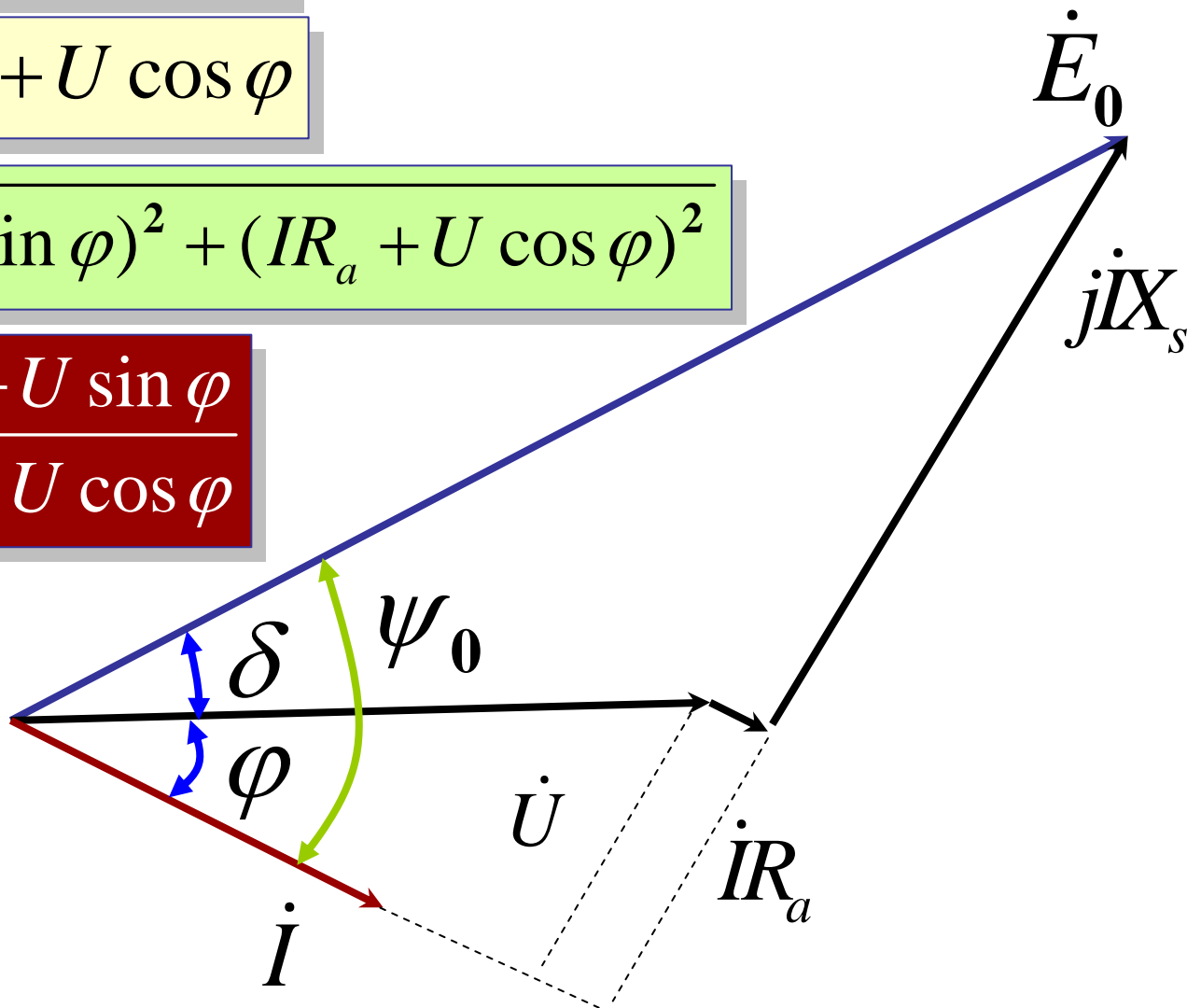
$$E_0 \cos \psi_0 = IR_a + U \cos \varphi$$

$$E_0 = \sqrt{(IX_s + U \sin \varphi)^2 + (IR_a + U \cos \varphi)^2}$$

$$\psi_0 = \arctan \frac{IX_s + U \sin \varphi}{IR_a + U \cos \varphi}$$

$$\delta = \psi_0 - \varphi$$

从三角关系出发



隐极同步发电机的向量图的分析

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

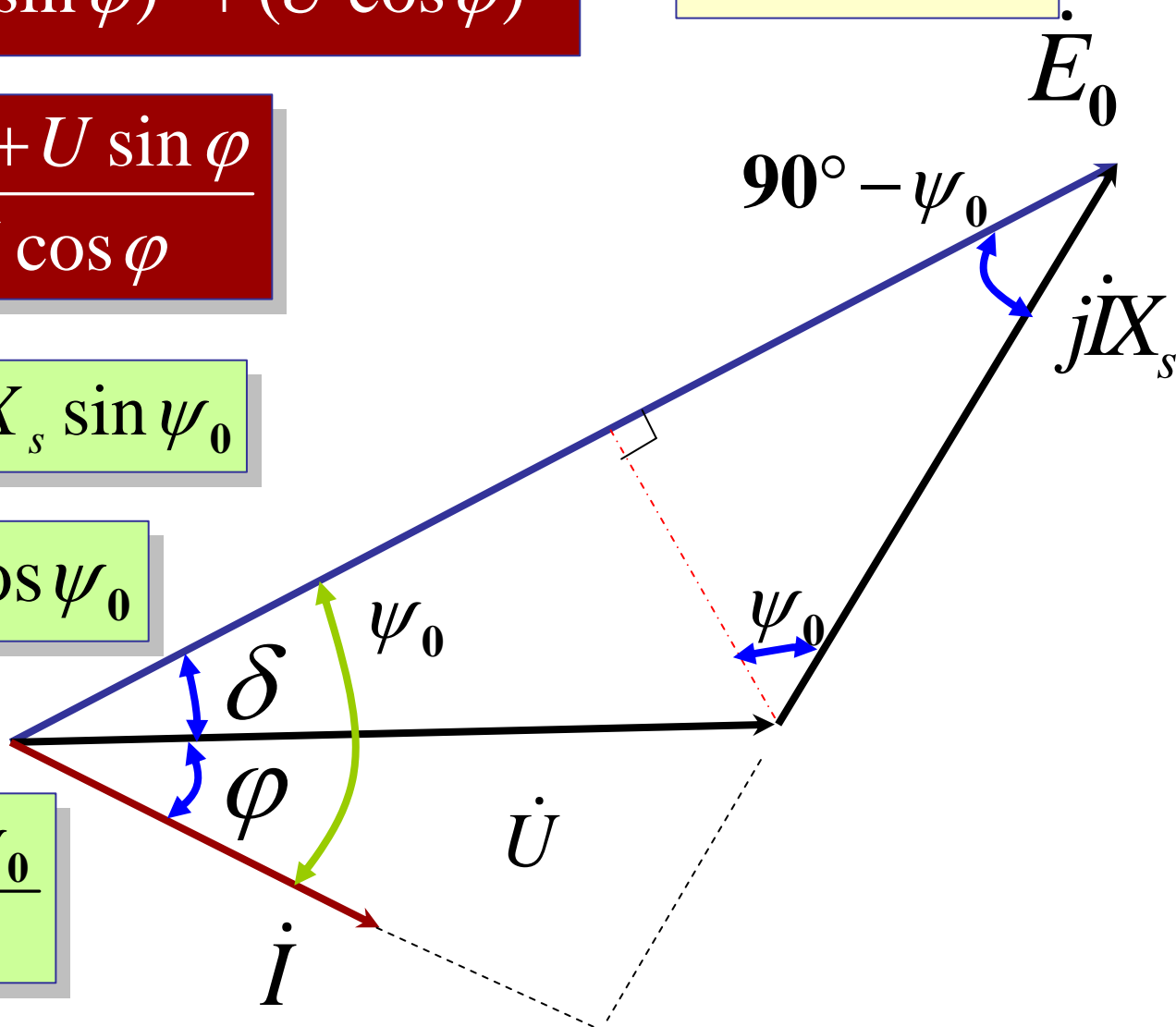
$$\psi_0 = \arctan \frac{IX_s + U \sin \varphi}{U \cos \varphi}$$

$$E_0 = U \cos \delta + IX_s \sin \psi_0$$

$$U \sin \delta = IX_s \cos \psi_0$$

$$\sin \delta = \frac{IX_s \cos \psi_0}{U}$$

忽略电阻 R_a



6.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图

一、双反应理论

- 考虑到凸极电机气隙的不均匀性，把电枢反应分成直轴和交轴电枢反应分别来处理的方法，就称为双反应理论。

凸极电机气隙是不均匀的，但是围绕直轴和交轴是对称的

直轴和交轴是对称分解后，采用叠加原理

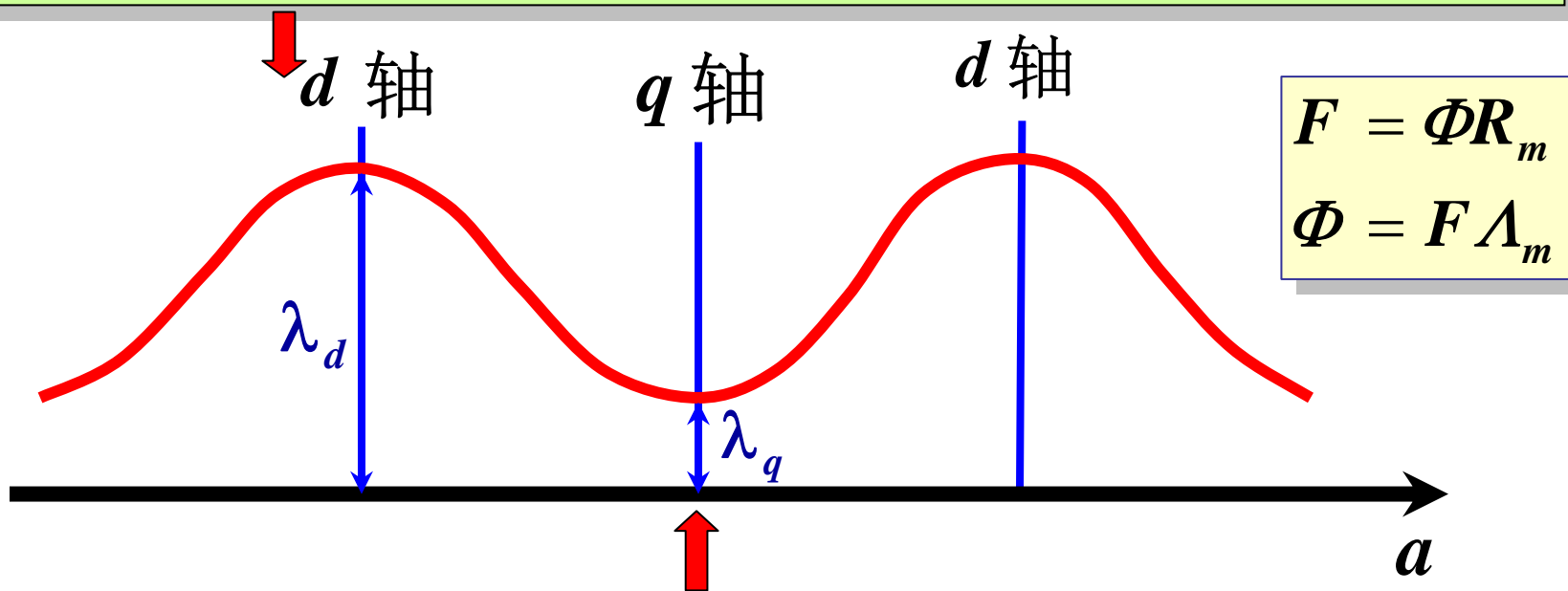


直轴下单位面积的气隙
磁导 λ_d ($\lambda_d = \mu_0 / \delta_d$)

>

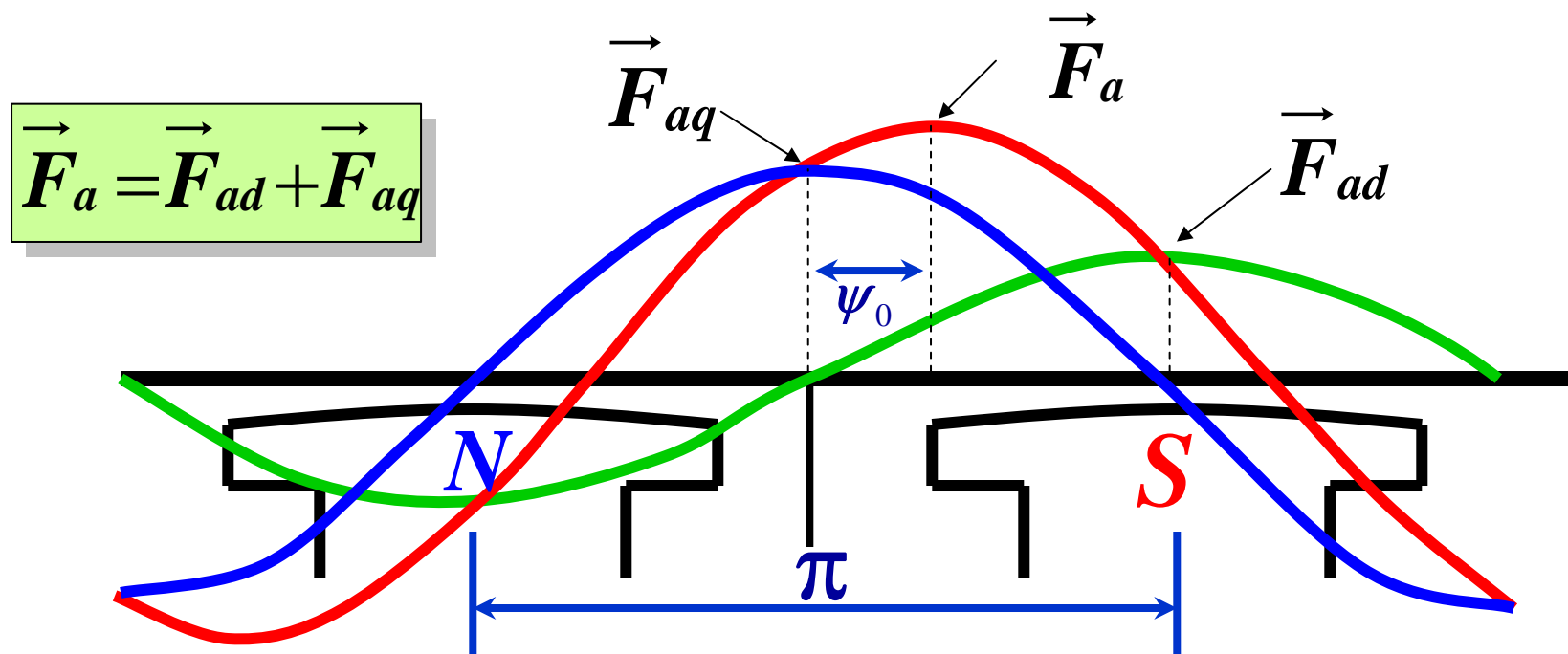
交轴下单位面积的气隙
磁导 λ_q ($\lambda_q = \mu_0 / \delta_q$)

当正弦分布的电枢磁动势作用在直轴上时，由于 λ_d 较大，故在一定大小的磁动势下，直轴基波磁场的幅值 B_{ad1} 相对较大。

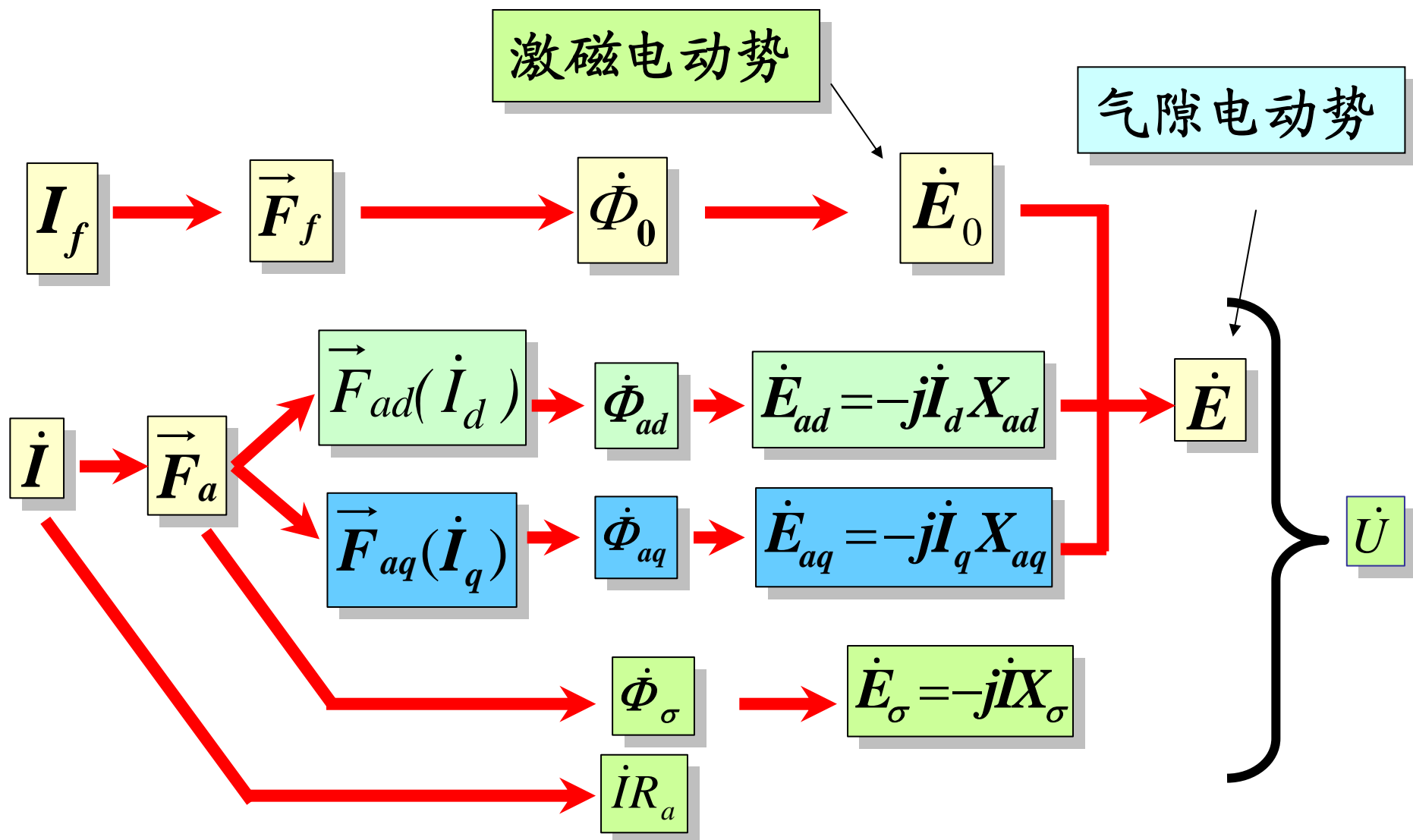


当同样大小的磁动势作用在交轴上时，由于 λ_q 较小，在极间区域，交轴电枢磁场出现明显下凹，相对来讲，基波幅值 B_{aq1} 将显著减小

一般情况下，若电枢磁动势既不在直轴、亦不在交轴而是在空间任意位置处，可把电枢磁动势分解成直轴和交轴两个分量(如图6—18b)，再用对应的直轴磁导和交轴磁导分别算出直轴和交轴电枢反应，最后把它们的效果叠加起来



二、凸极同步发电机的电压方程和相量图



再从气隙电动势减去电枢绕组的电阻和漏抗压降，便得电枢的端电压 U 。采用发电机惯例，电枢的电压方程为

$$E_{ad} \propto I_d \qquad E_{aq} \propto I_q$$

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

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

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$

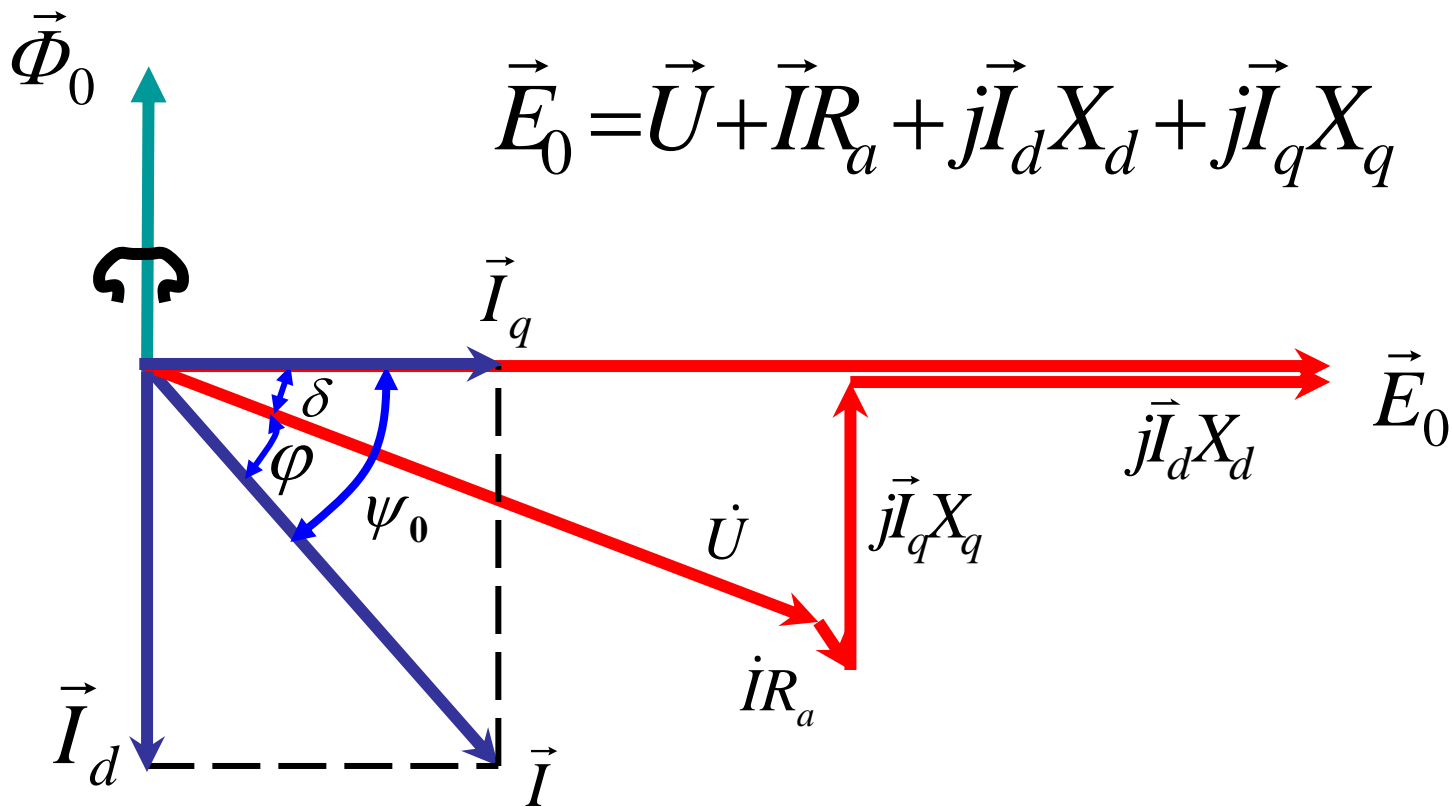
$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} - \dot{I}(R_a + jX_\sigma) = \dot{U}$$

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

$$= \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}_d (X_\sigma + X_{ad}) + j\vec{I}_q (X_\sigma + X_{aq})$$

$$= \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}_d X_d + j\vec{I}_q X_q$$

凸极同步发电机的向量图



问题： \vec{I}_q, \vec{I}_d 的分解是需要知道 ψ_0 才能确定的
即应该先确定 \vec{E}_0 的方向后才能够分解

ψ_0 角的确定

$$\vec{E}_Q = \vec{E}_0 - j\vec{I}_d (X_d - X_q)$$

交轴 交轴

$$\vec{E}_Q = (\vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}_d X_d + j\vec{I}_q X_q) - j\vec{I}_d (X_d - X_q) = \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}X_q$$

\dot{E}_Q (虚拟电势) 没有物理含义, 它和 \dot{E}_0 同方向

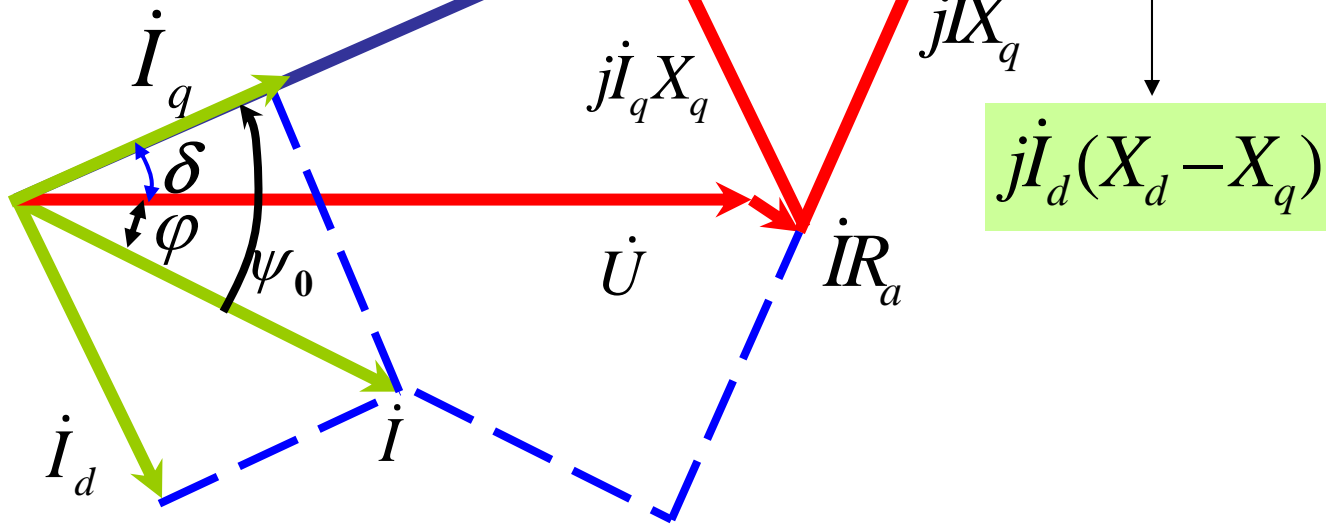
向量图绘制步骤

以 \dot{U} 作为参考向量先画出

根据负载功率因数 $\cos \varphi$, 确定 \dot{I}

在 \dot{U} 的末端加上 $\dot{I}R_a$ (它平行与 \dot{I})

$$\vec{E}_Q = \vec{U} + \vec{I}R_a + j\vec{I}X_q$$



$$j\dot{I}_d(X_d - X_q)$$

在 $\dot{I}R_a$ 的末端加上 $j\dot{I}X_q$ (超前 $\dot{I}90^\circ$), 得到 \dot{E}_Q ,

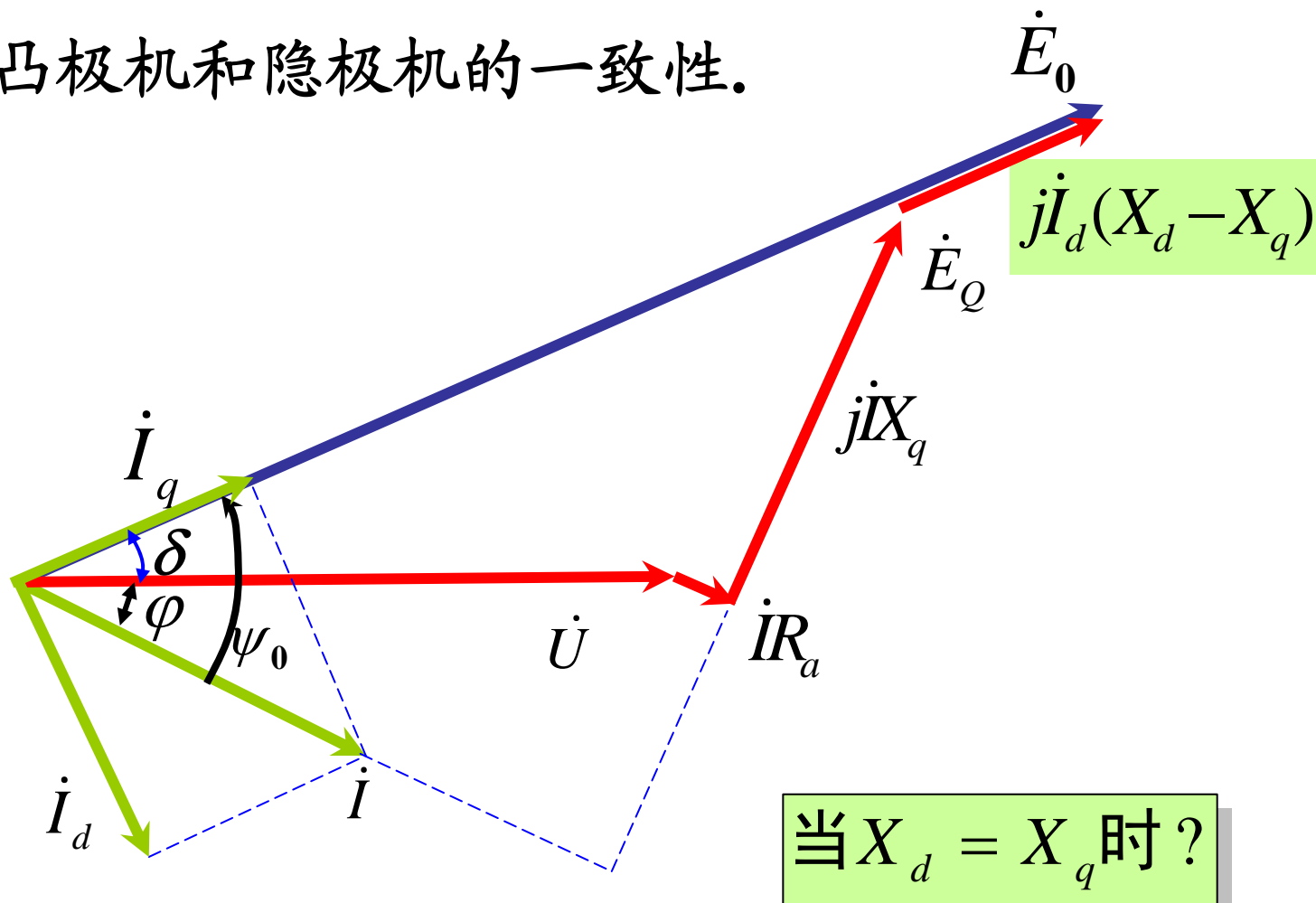
确定 \dot{E}_0 的方向得出 ψ_0

在 $\dot{I}R_a$ 的末端加上

$j\dot{I}_q X_q$ 和 $j\dot{I}_d X_d$ 得出 \dot{E}_0

按照 ψ_0 角分解为 \dot{I}_d 和 \dot{I}_q

凸极机和隐极机的一致性。



当 $X_d = X_q$ 时?

在隐极机当中，由于气隙均匀 $X_d = X_q = X_s$

$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi + IR_a}$$

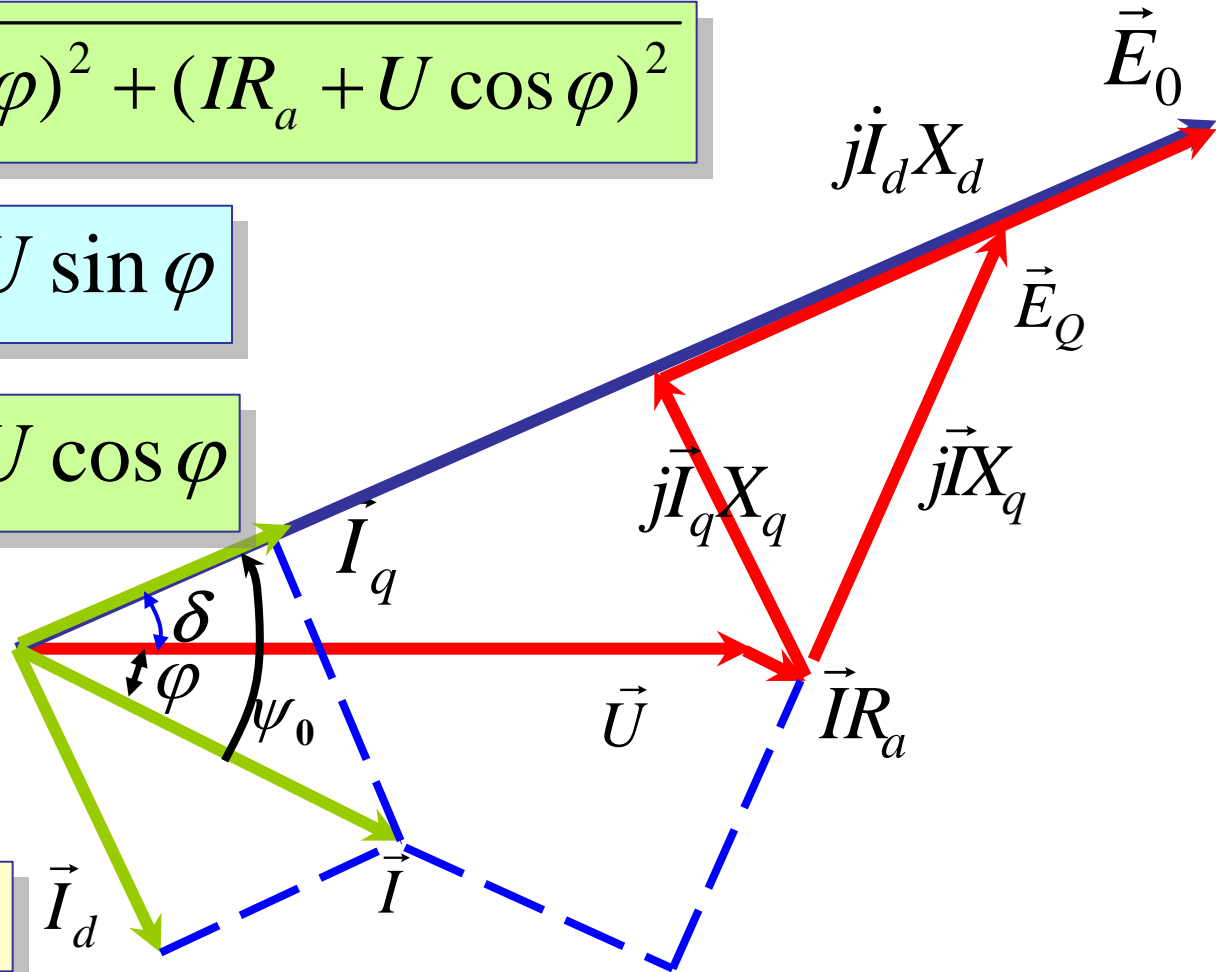
$$E_Q = \sqrt{(IX_q + U \sin \varphi)^2 + (IR_a + U \cos \varphi)^2}$$

$$E_Q \sin \psi_0 = IX_q + U \sin \varphi$$

$$E_Q \cos \psi_0 = IR_a + U \cos \varphi$$

$$\delta = \psi_0 - \varphi$$

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_Q + \mathbf{I}_d (X_d - X_q)$$



忽略电阻时:

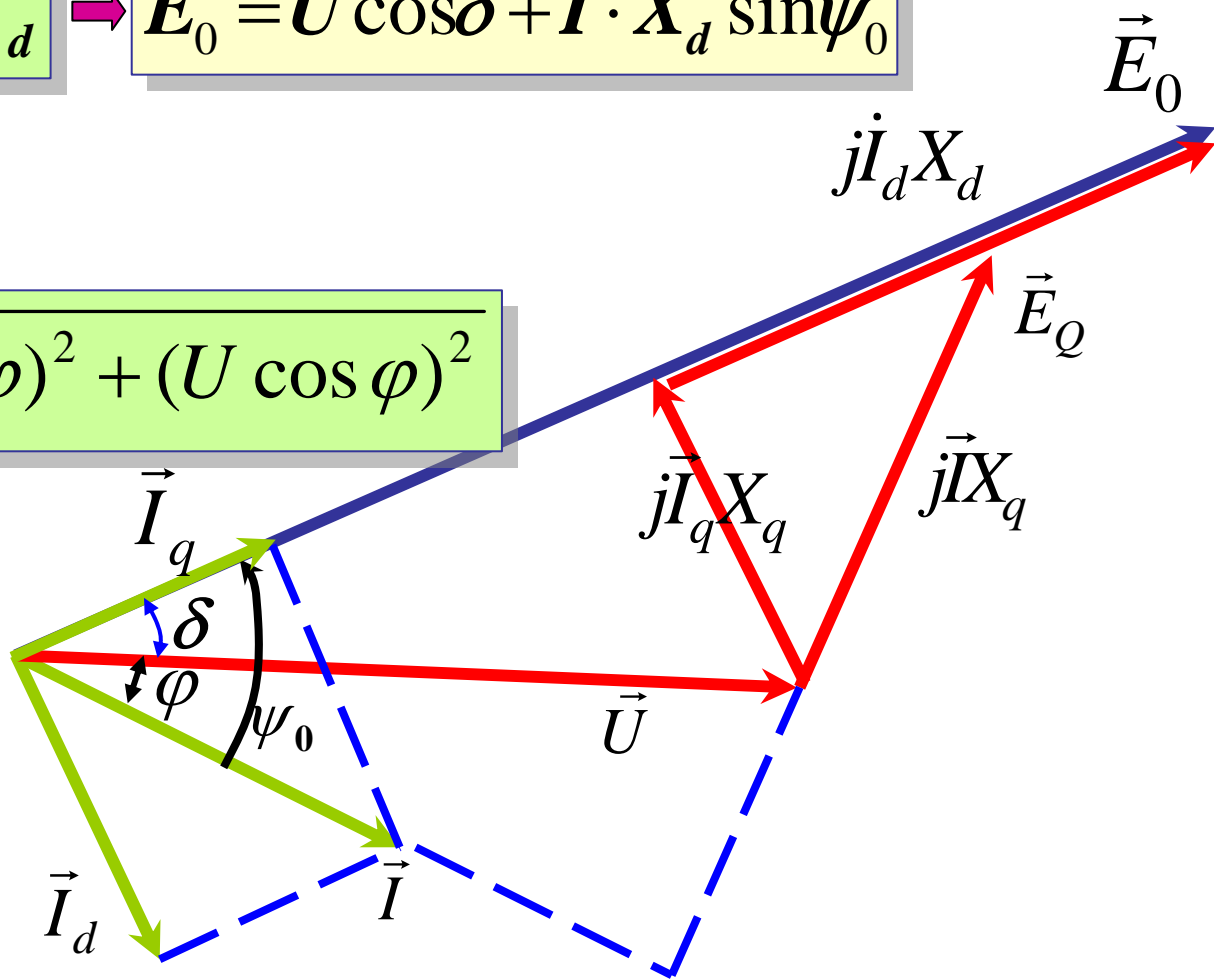
$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi}$$

$$E_0 = U \cos \delta + I_d X_d \rightarrow E_0 = U \cos \delta + I \cdot X_d \sin \psi_0$$

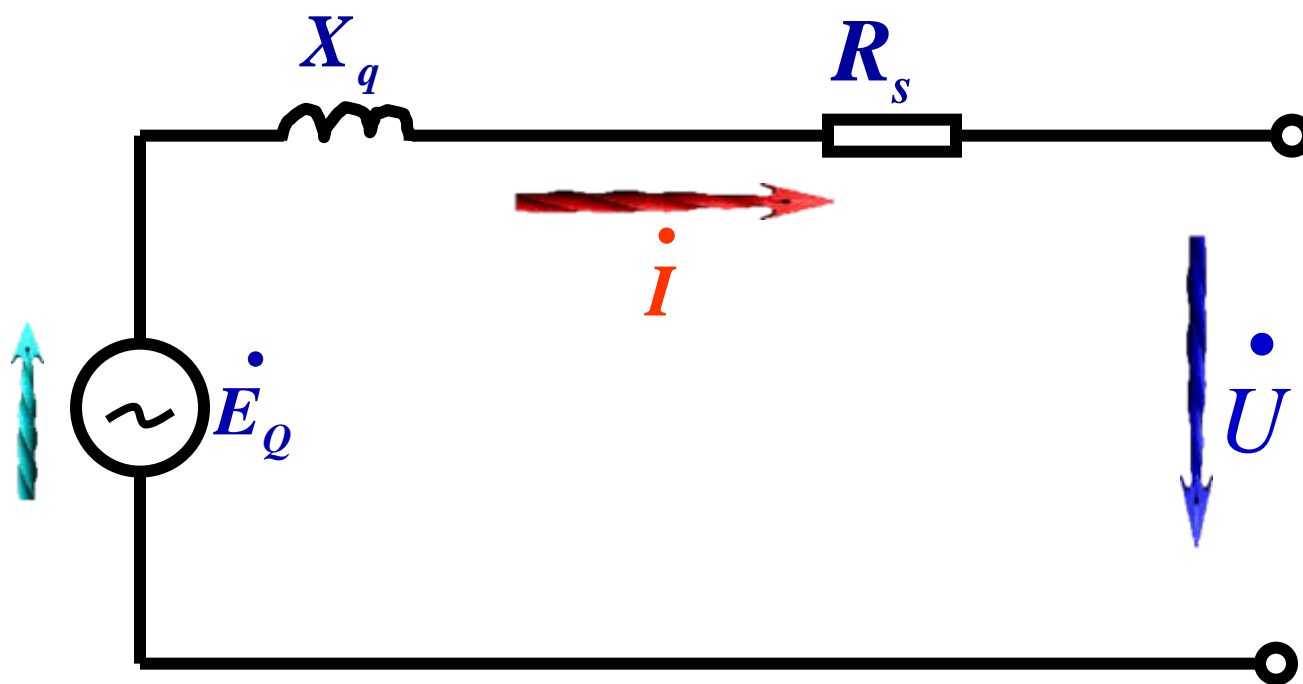
$$I_q X_q = U \sin \delta$$

$$E_Q = \sqrt{(IX_q + U \sin \varphi)^2 + (U \cos \varphi)^2}$$

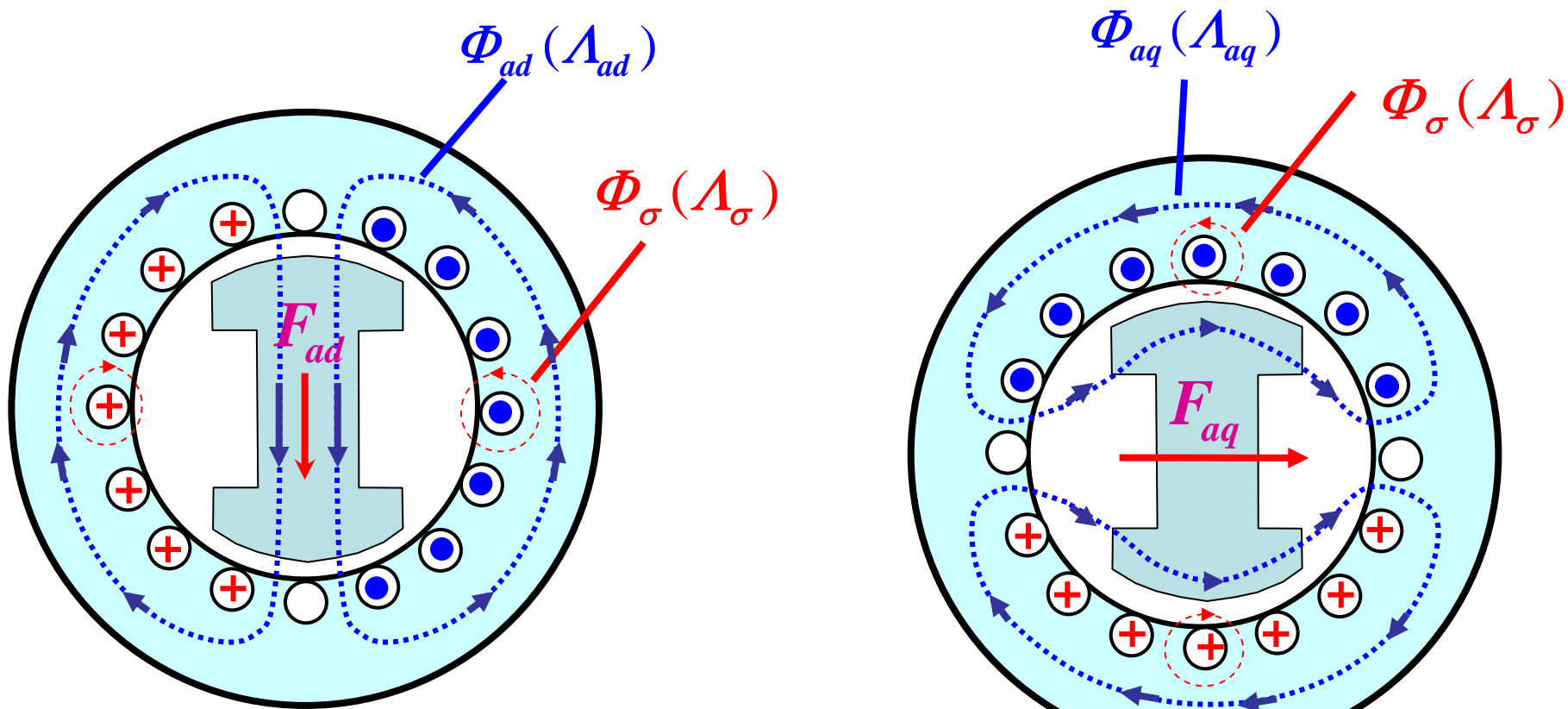
$$\delta = \psi_0 - \varphi$$



凸极同步发电机的等效电路图



凸极同步电机电枢反应磁通及所经磁路及磁导



直轴电枢磁导

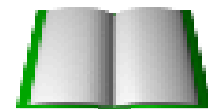
交轴电枢磁导

三、直轴和交轴同步电抗的意义

- 由于电抗与绕组匝数的平方和所经磁路的磁导成正比，所以

$$X_d \propto N_1^2 \Lambda_d \quad X_q \propto N_1^2 \Lambda_q$$

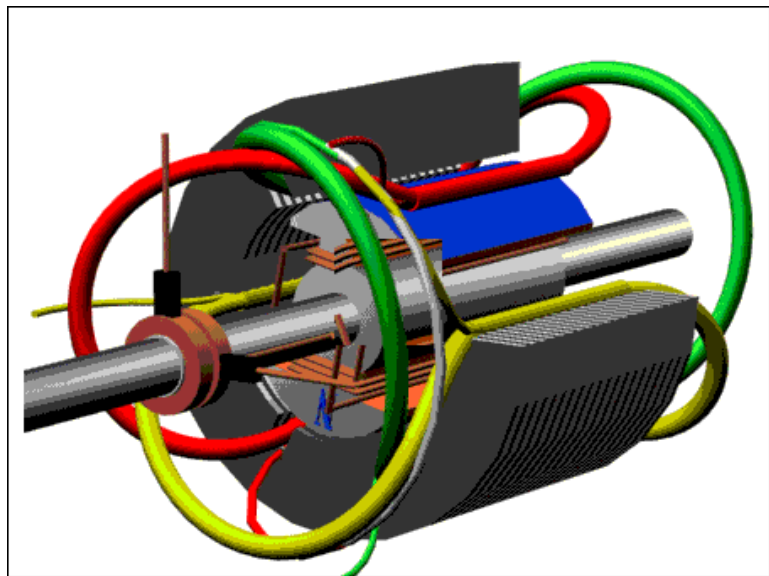
- 如图6-22所示。对于凸极电机，由于直轴下的气隙较交轴下小， $\Lambda_{ad} > \Lambda_{aq}$ ，所以 $X_{ad} > X_{aq}$ ，因此在凸极同步电机中， $X_d > X_q$ 。对于隐极电机，由于气隙是均匀的，故 $X_d \approx X_q \approx X_s$



例题

6.5 同步发电机的功率方程和转矩方程

- 一、功率方程和电磁功率
- 功率方程



若转子励磁损耗由另外的直流电源供给

发电机轴上
输入的机械
功率 P_1

$$P_1 = p_{\Omega} + p_{Fe} + P_e$$

机械损耗

定子铁耗

转换功率
电磁功率

再从电磁功率 P_e 中减去电枢铜耗 p_{cua} ，可得到电枢端点输出的电功率 P_2

$$P_e = p_{cua} + P_2$$

$$p_{cua} = mI^2 R_a$$

$$p_2 = mUI \cos \varphi$$

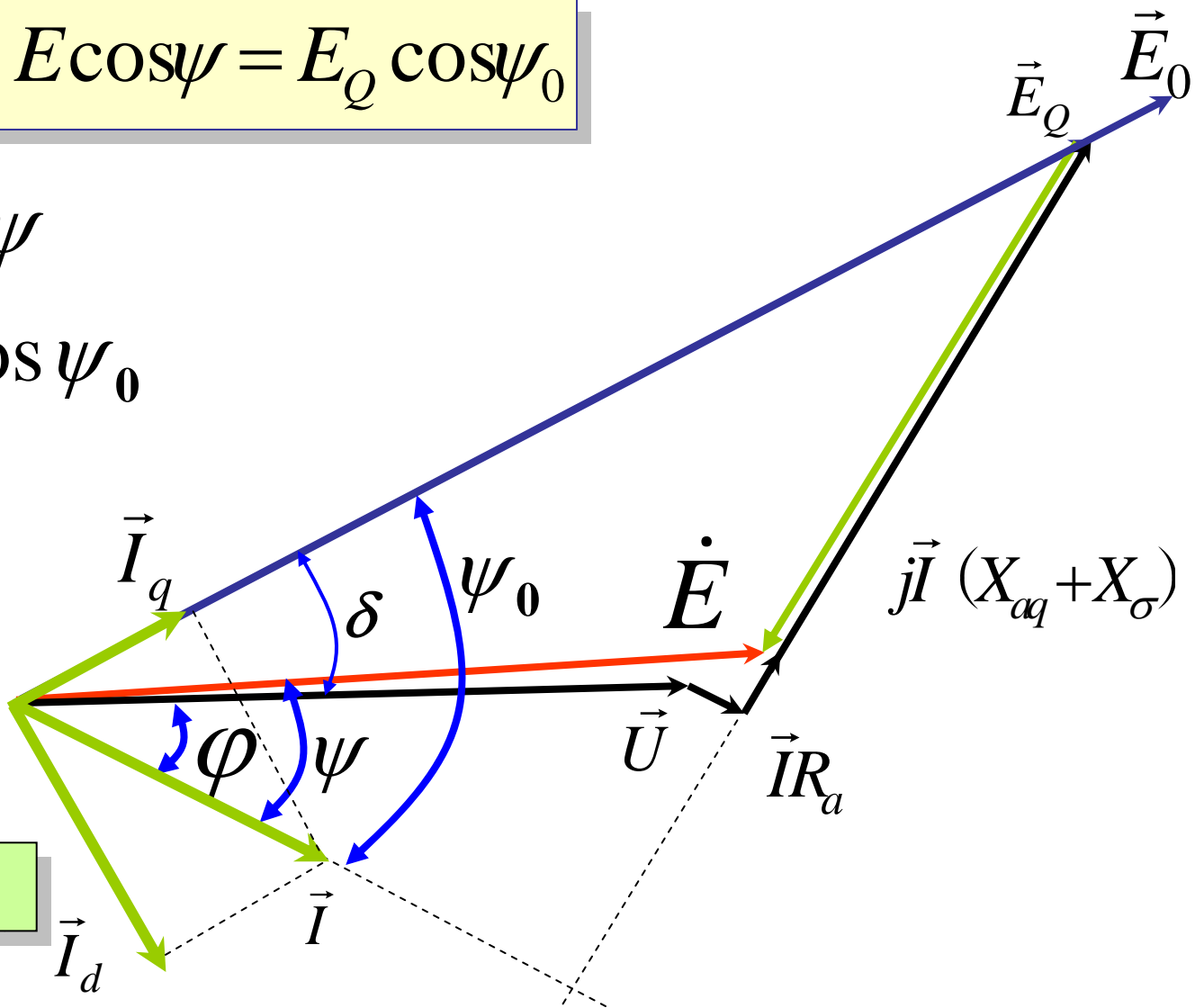
$$P_e = mUI \cos \varphi + mI^2 R_a = mI (U \cos \varphi + IR_a)$$

$$U \cos \varphi + IR_a = E \cos \psi = E_Q \cos \psi_0$$

$$\begin{aligned} P_e &= mEI \cos \psi \\ &= mE_Q I \cos \psi_0 \\ &= mE_Q I_q \end{aligned}$$

$$I_q = 0 \quad P_e = 0$$

凸极发电机向量图



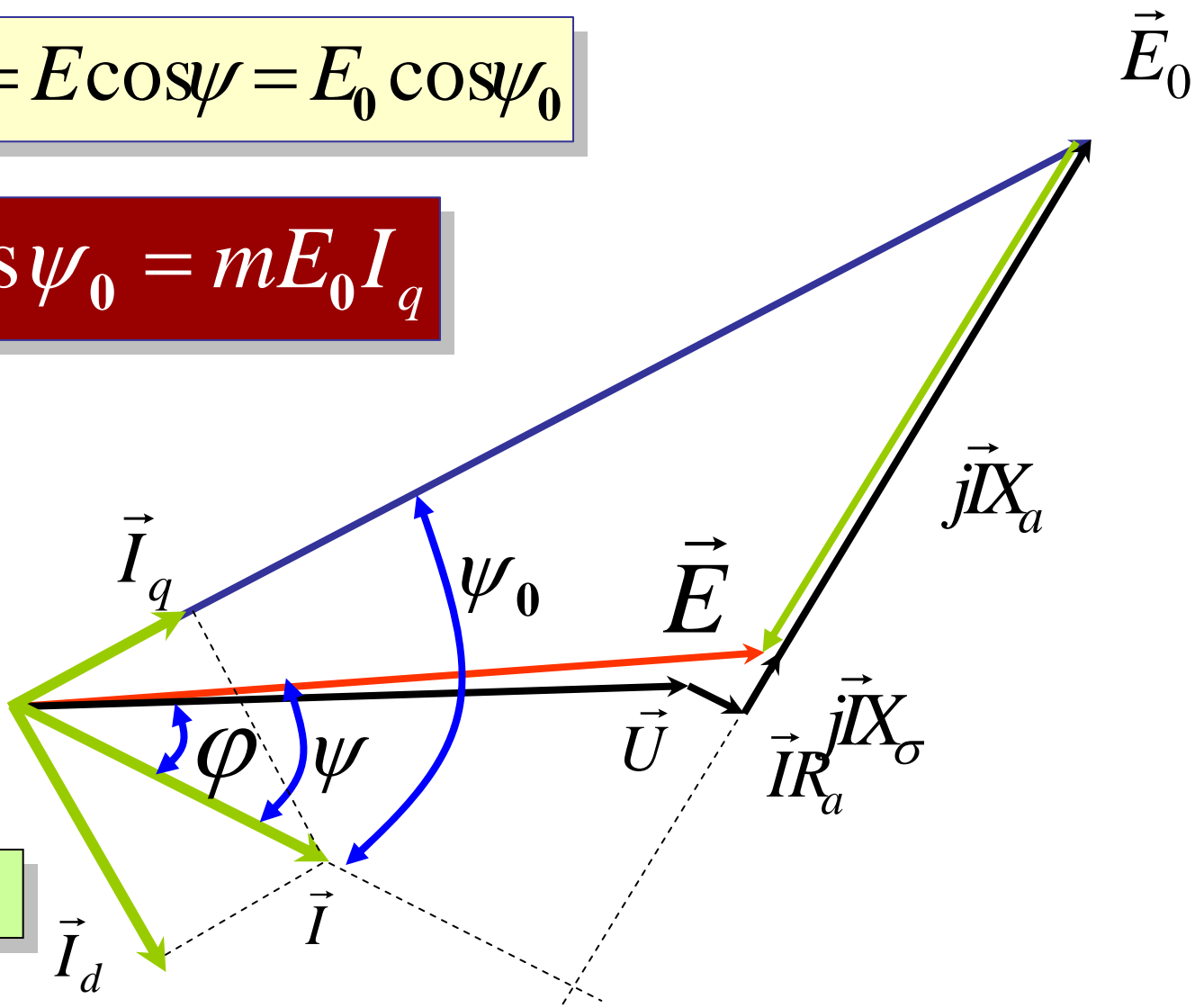
$$P_e = mUI \cos \varphi + mI^2 R_a = mI (U \cos \varphi + IR_a)$$

$$U \cos \varphi + IR_a = E \cos \psi = E_0 \cos \psi_0$$

$$P_e = mE_0 I \cos \psi_0 = mE_0 I_q$$

$$I_q = 0 \quad P_e = 0$$

隐极发电机向量图



结论

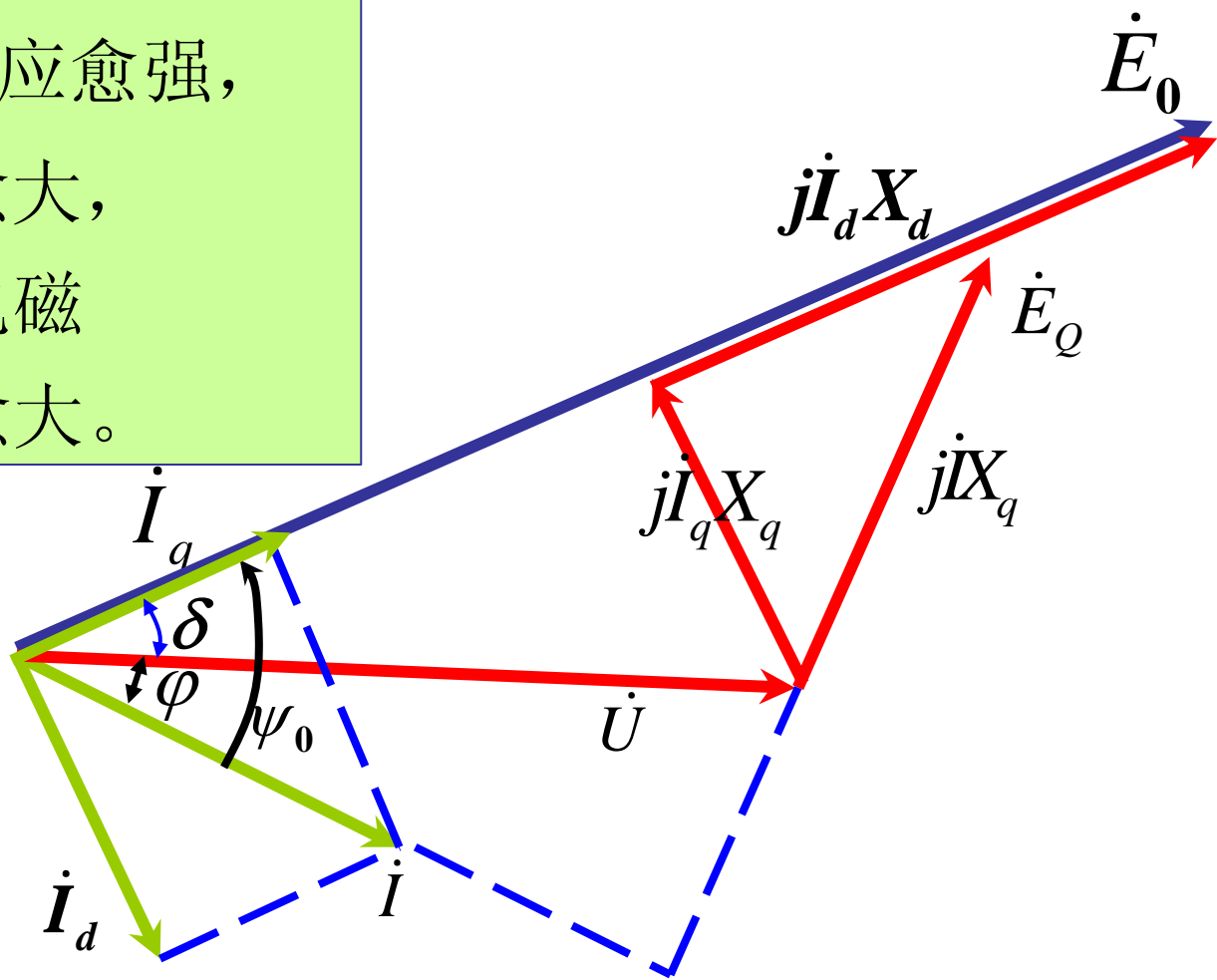
要进行能量转换，电枢电流中必须要有交轴电流分量 I_q 。

在发电机中，交轴电枢反应使主极磁场超前于气隙合成磁场，使主极受到一个制动性质的电磁转矩；

在旋转过程中，原动机的驱动转矩克服制动的电磁转矩而做功，同时通过电磁感应在电枢绕组内产生电动势并向电网送出有功电流，使机械能转换为电能。

激磁电动势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 之间的夹角 δ 称为功率角。

I_q 愈大，交轴电枢反应愈强，功率角 δ 就愈大， δ 愈大，在一定的范围内，电磁转矩和电磁功率亦愈大。

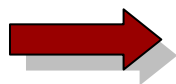


二、转矩方程

把功率方程 $P_1 = p_{\Omega} + p_{Fe} + P_e$ 除以同步角速度 Ω_s 得转矩方程：

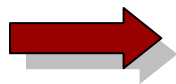
$$T_1 = T_0 + T_e$$

$$T_1 = \frac{P_1}{\Omega_s}$$



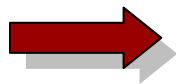
原动机的驱动转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s}$$



电磁转矩

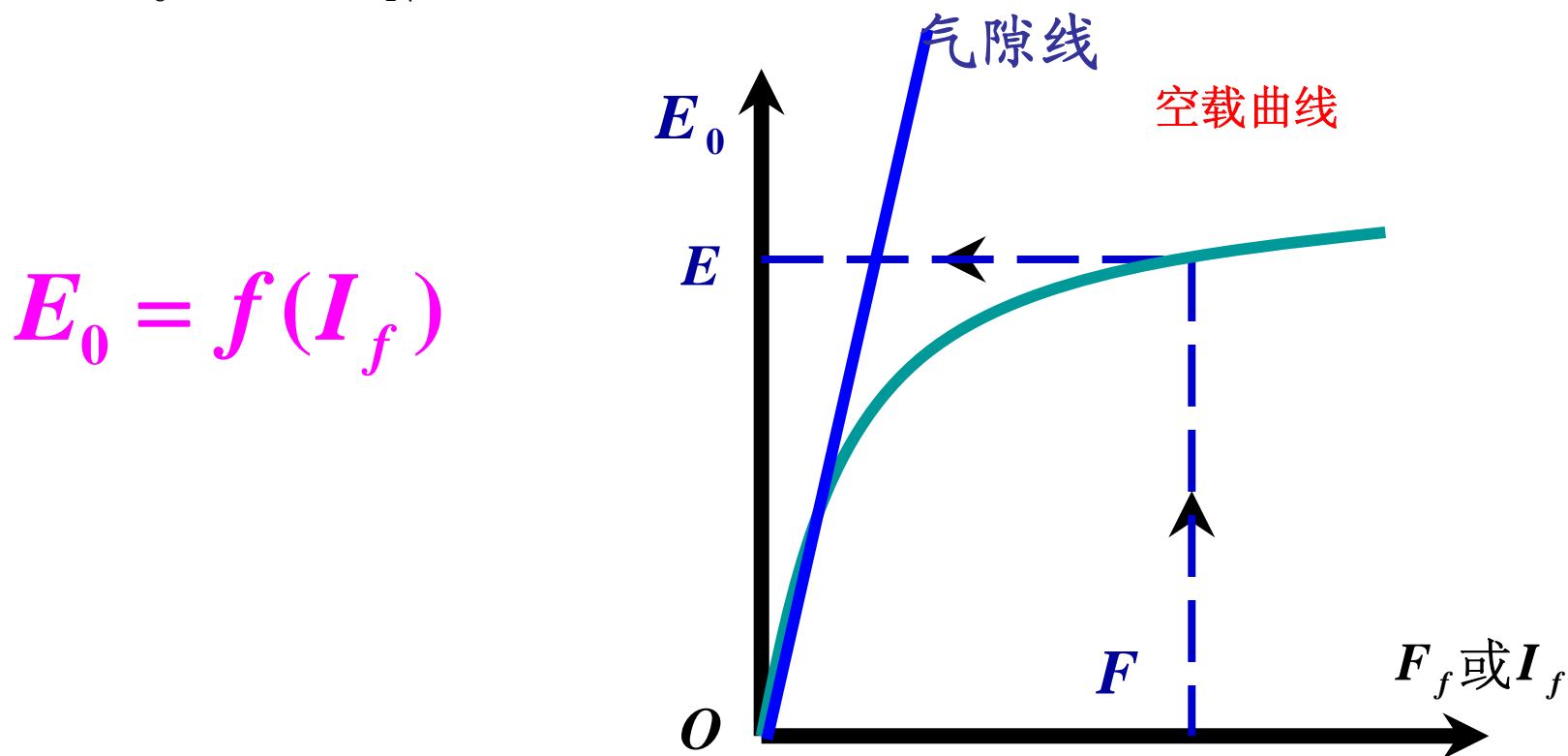
$$T_0 = \frac{p_{\Omega} + p_{Fe}}{\Omega_s}$$



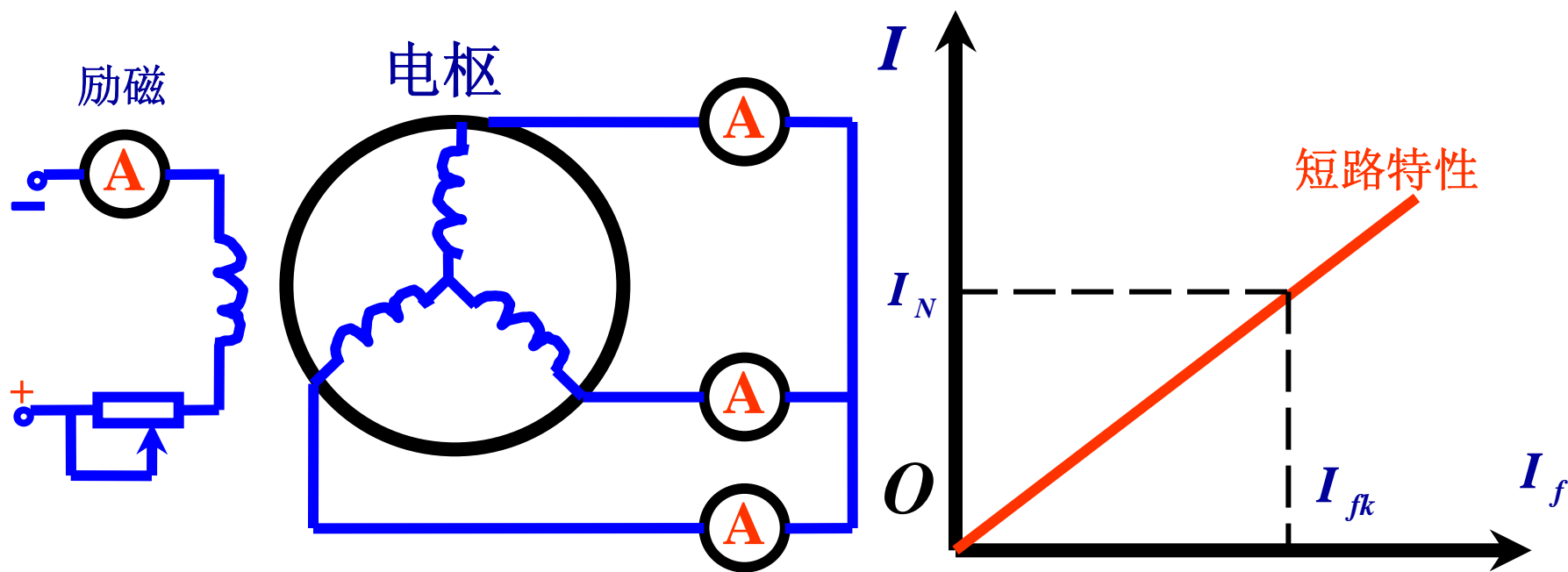
发电机的空载转矩

6.6 同步电机参数的测定

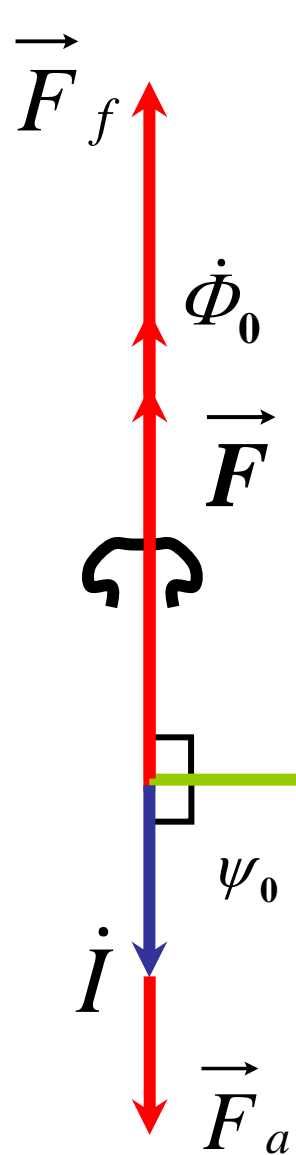
- 一、用空载特性和短路特性确定 X_d
- 空载特性可以用空载试验测出。试验时，电枢开路(空载)，用原动机把被试同步电机拖动到同步转速，改变励磁电流 I_f ，并记取相应的电枢端电压 U_0 (空载时即等于 E_0 ，直到 $U_0 \approx 1.25U_N$ 左右，可得空载特性曲线。



将被试同步电机的电枢端点三相短路，用原动机拖动被试电机到同步转速，调节励磁电流 I_f 使电枢电流 I 从零起一直增加到 $1.2I_N$ 左右，便可得到**短路特性曲线**，如图6—24b所示。



短路时，端电压 $U=0$



$$\psi_0 \approx 90^\circ \quad \dot{I}_q \approx 0$$

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

Approximations shown in the diagram:

- $\dot{U} \approx 0$ (green box)
- $\dot{I}R_a \approx 0$ (blue box)
- $j\dot{I}_q X_q \approx 0$ (yellow box)

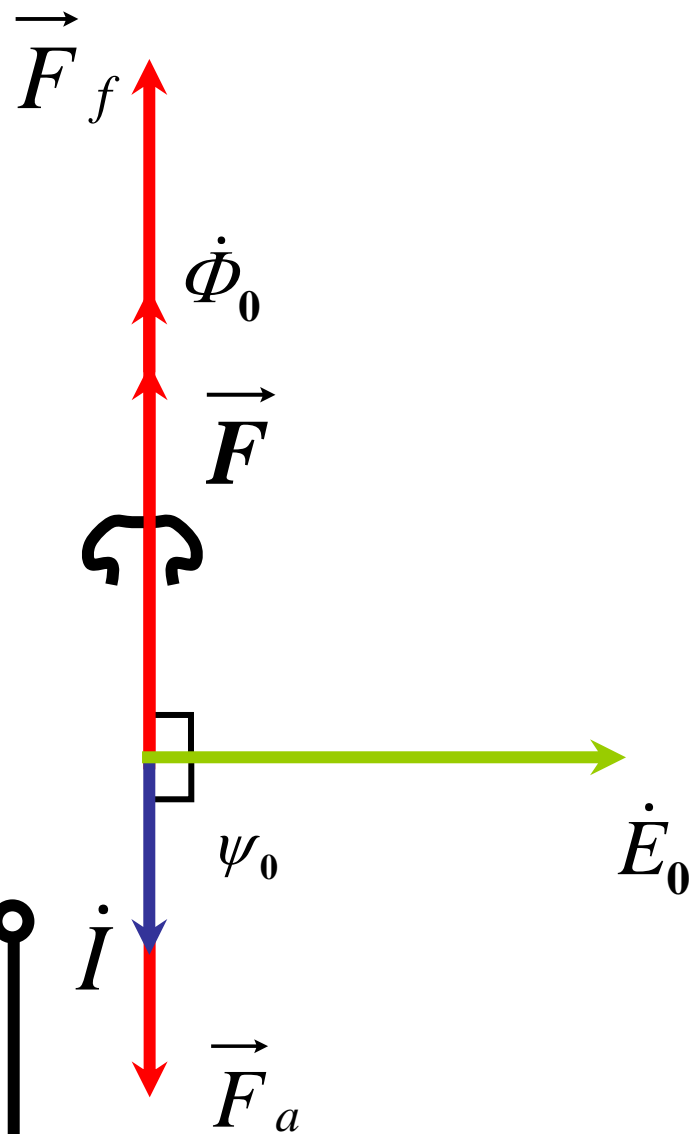
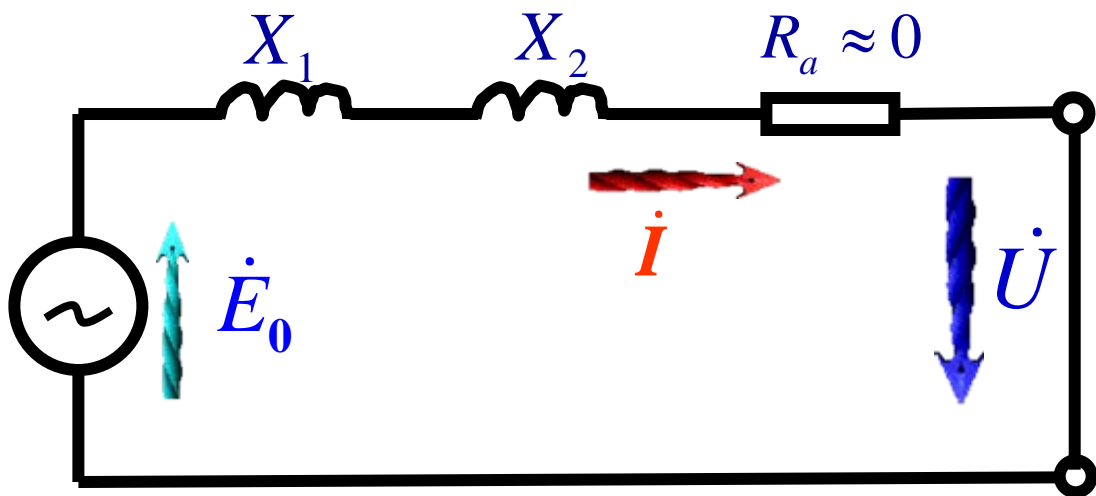
$$\dot{I} \approx \dot{I}_d$$

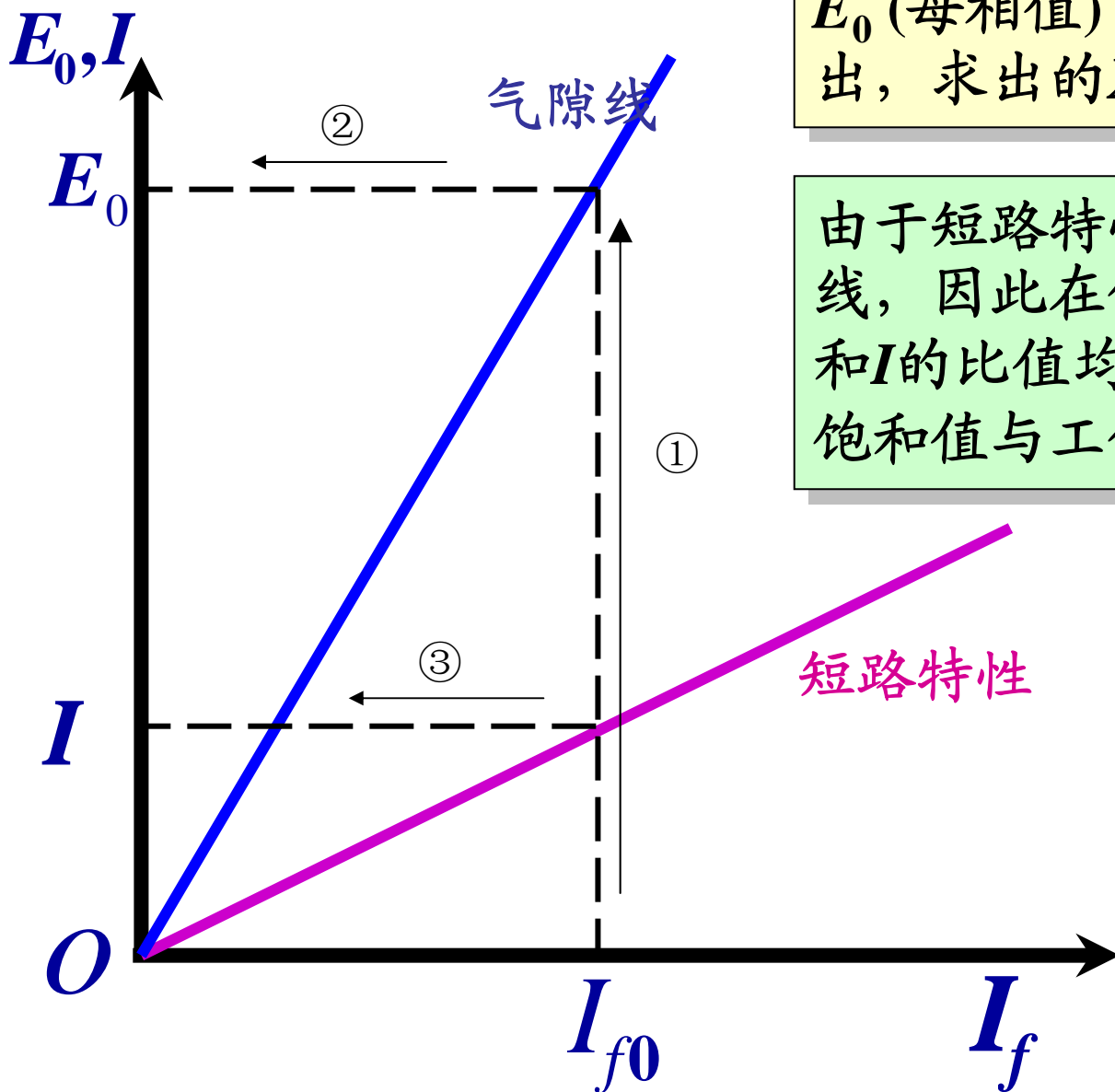
$$X_d = \frac{E_0}{I}$$

短路时，端电压 $U=0$ ，短路电流仅受电机本身阻抗的限制。

通常电枢电阻远小于同步电抗，因此短路电流可认为是**纯感性**，此时电枢磁动势接近于**纯去磁性的**直轴磁动势，因而电机的磁路处于不饱和状态，故短路特性是一条直线。

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





因为短路试验时磁路为不饱和， E_0 (每相值) 应从气隙线上查出，求出的 X_d 值为不饱和值

由于短路特性和气隙线都是直线，因此在任一非零励磁点， E_0 和 I 的比值均相等。表明 X_d 的不饱和值与工作点无关

$$X_d = \frac{E_0}{I}$$

X_d 的饱和值与主磁路的饱和情况有关。主磁路的饱和程度取决于实际运行时作用在主磁路上的合成磁动势，因而取决于相应的气隙电动势；如果不计漏阻抗压降，则可近似认为取决于电枢的端电压，所以通常用对应于额定电压时的 X_d 值作为其饱和值。为此，从空载曲线上查出对应于额定端电压 U_N 时的励磁电流 I_{f0} ，再从短路特性上查出与该励磁电流相应的短路电流，如图6—26所示，这样即可求出 X_d (饱和)

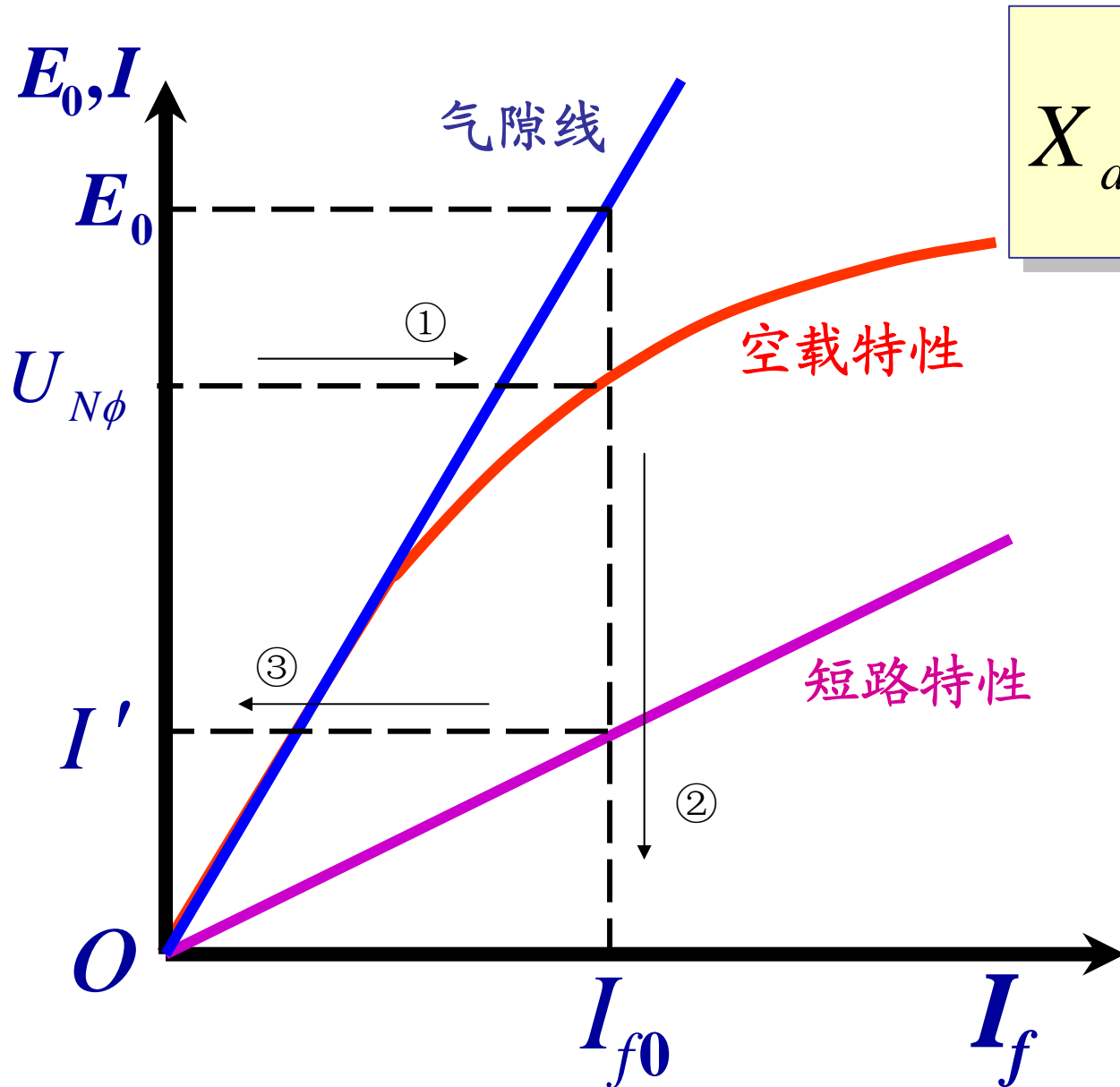
$$X_{d(\text{饱和})} \approx \frac{U_{N\phi}}{I'}$$

来自于空载特性曲线

来自于短路特性曲线

共同点在于相同的励磁

X_d (饱和) 的确定



$$X_{d(\text{饱和})} \approx \frac{U_{N\phi}}{I'}$$

$$X_d = \frac{E_0}{I'}$$

例题

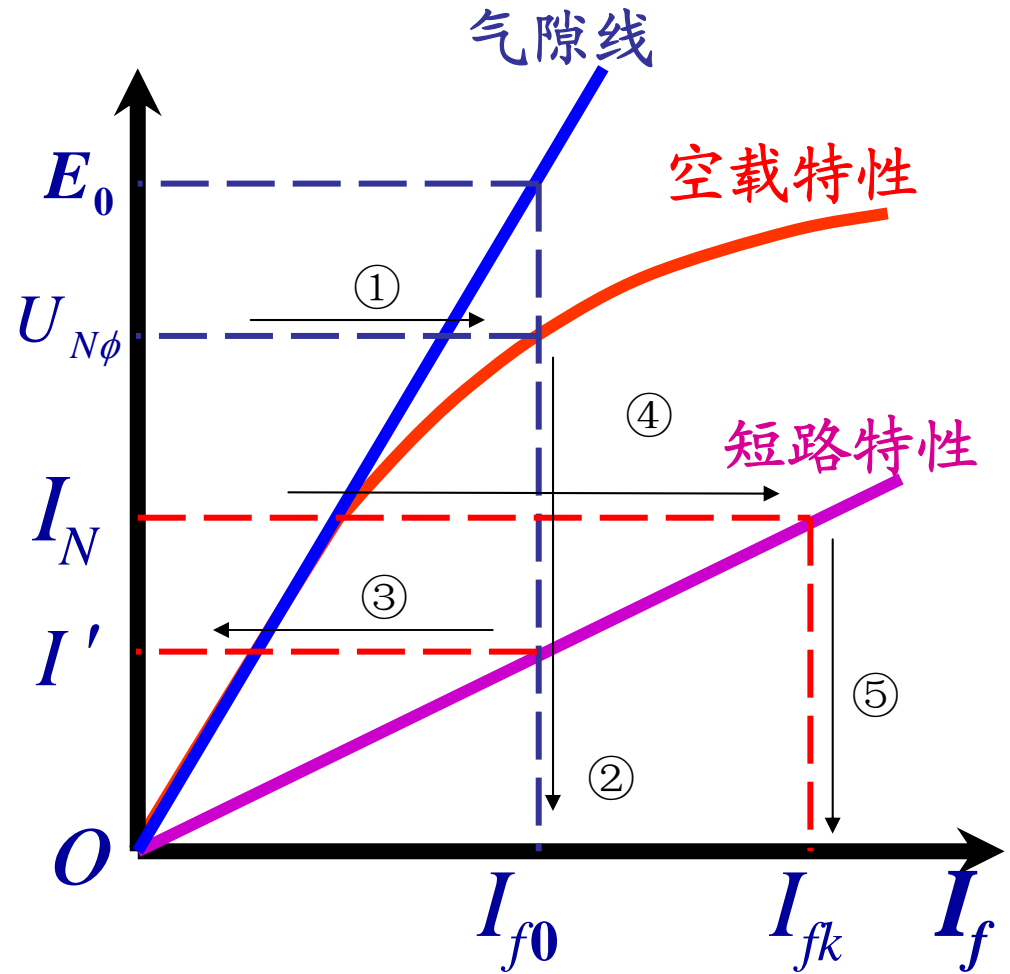
$$X_{d(\text{饱和})}^* = \frac{U_{N\phi}^*}{I'^*} = \frac{1}{I'^*}$$

又因为：

$$\frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I'}{I_N} = I'^*$$

所以：

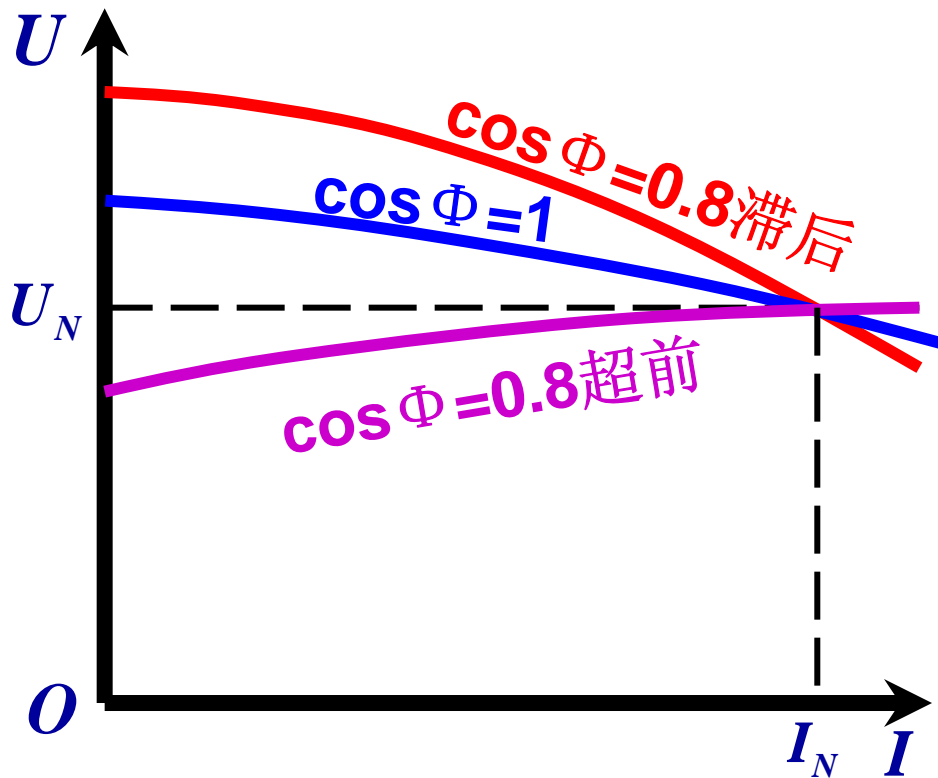
$$X_{d(\text{饱和})}^* = \frac{I_{fk}(I=I_N)}{I_{f0}(U=U_{N\phi})}$$



6.7 同步发电机的运行特性

同步发电机的稳态运行特性包括外特性、调整特性和效率特性

1. 外特性: 即 $n = n_s$, $I_f = \text{常值}$, $\cos \phi = \text{常值}$ 时, $U = f(I)$ 。



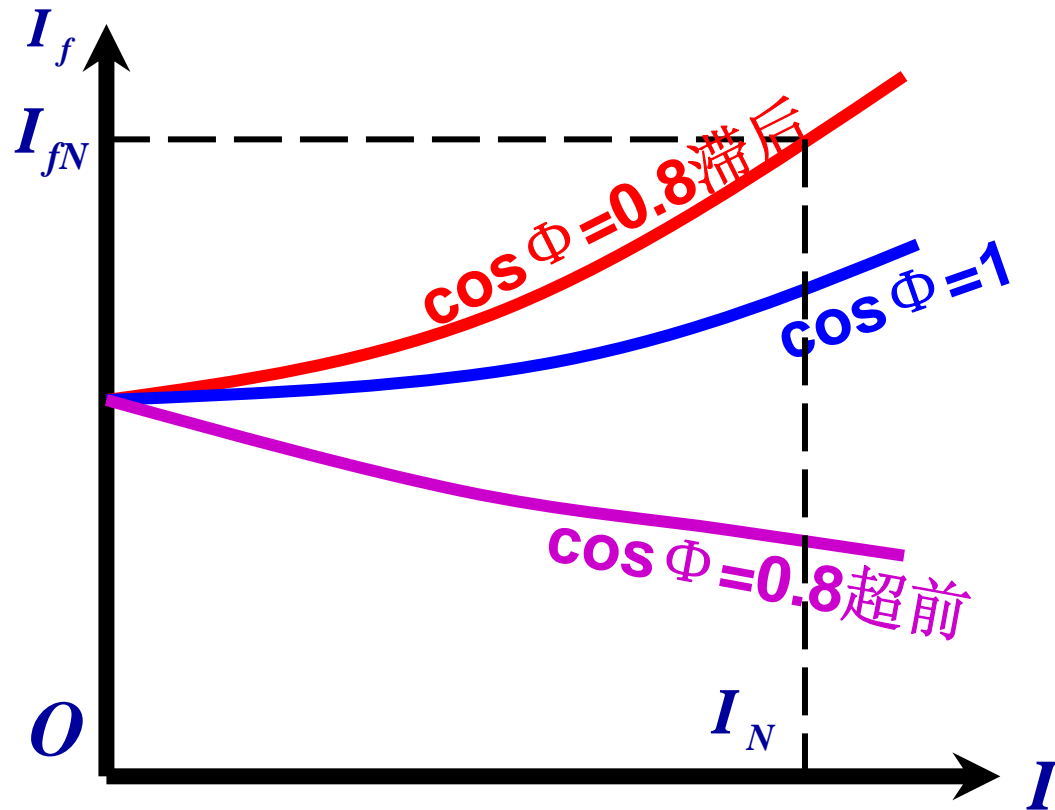
电压调整率:

$$\Delta u = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} \times 100\%$$

凸极机: 18-30% ;

隐极机: 30-48%

- 2. 调整特性 : $n = n_S$, $U = U_{N\Phi}$, $\cos \phi = \text{常值}$ 时, $I_f = f(I)$ 。



- **效率特性**: $n=n_s$, $U=U_{N\Phi}$, $\cos \phi = \cos \phi_N$
时, $\eta=f(P_2)$ 。

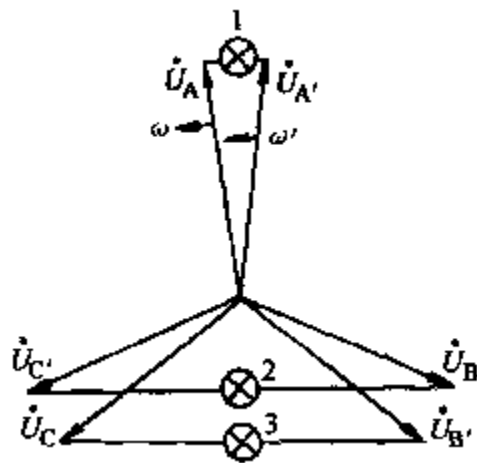
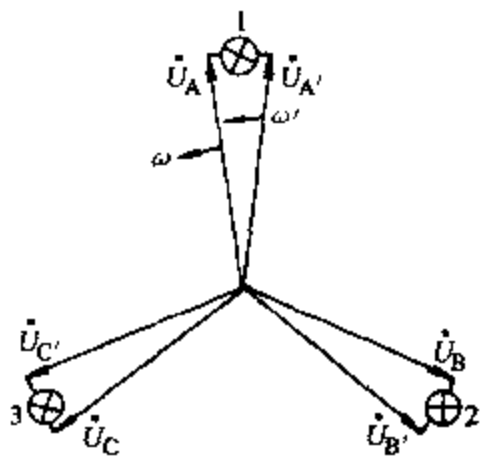
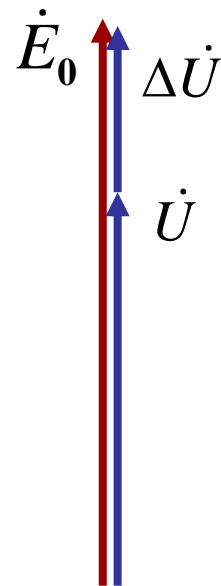
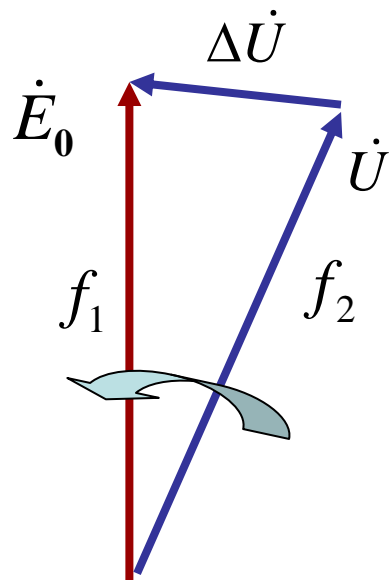
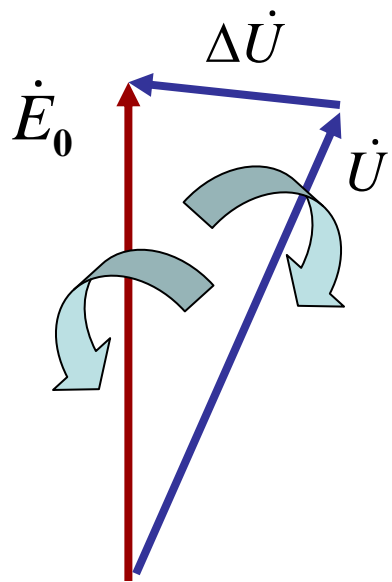
$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$$

6.8 同步发电机与电网的并联运行

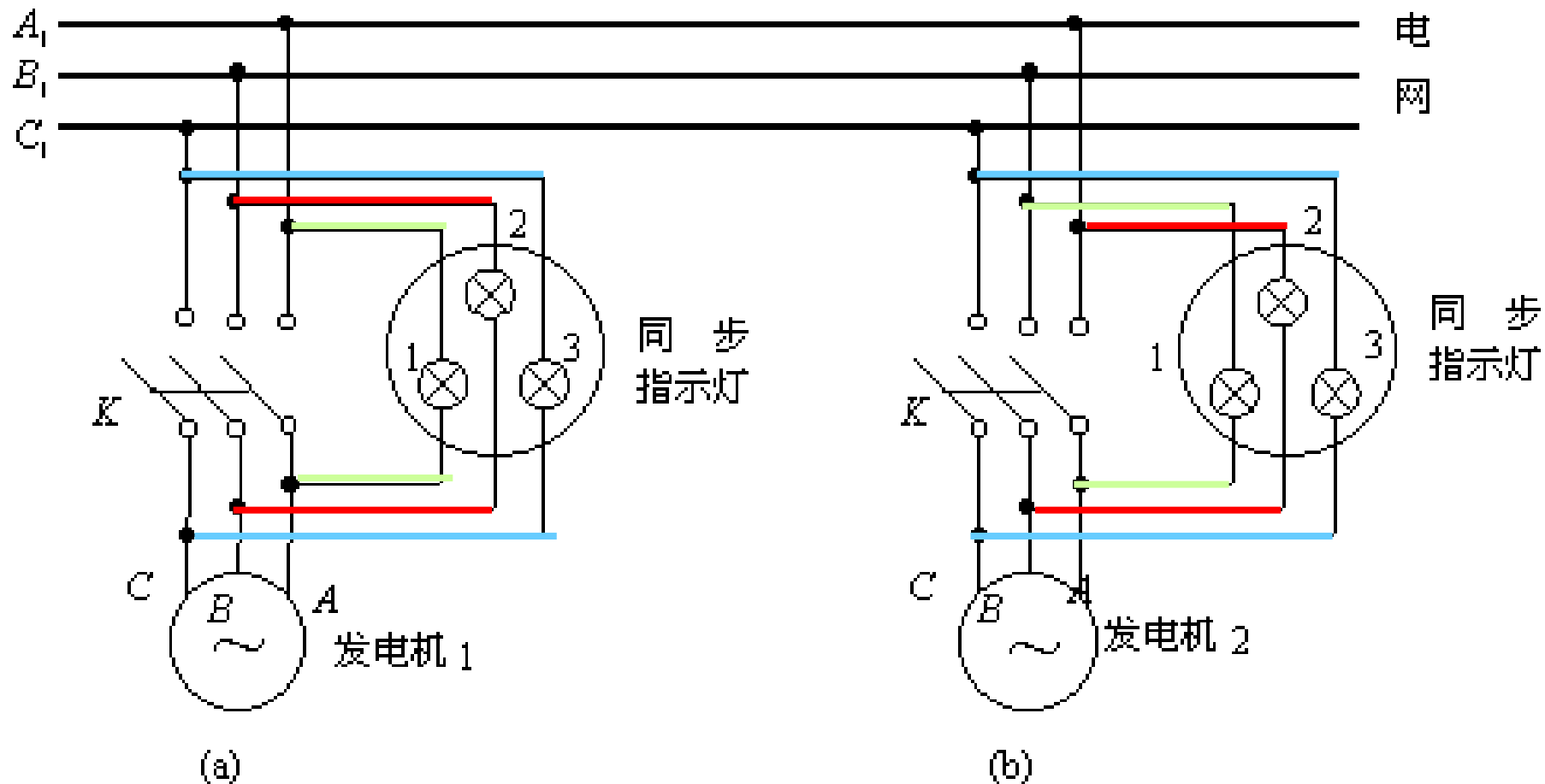
把同步发电机并联至电网的过程称为投入并联，或称为**并列**、**并车**、**整步**。在并车时必须避免产生巨大的冲击电流，以防止同步发电机受到损坏、电网遭受干扰

并车前必须检查发电机和电网是否适合以下条件：

- ① **相序一致**
- ② **频率相同**
- ③ **发电机激磁电势与电网电压大小、相位相同**



投入并网的方法一：准确整步法



三相同步发电机整步

(a) 灯光明暗法

(b) 灯光旋转法

自整步法

- 在相序一致的情况下将励磁绕组通过适当的电阻短接，再用原动机把发电机拖动到接近同步转速(相差2~5%)，在没有接通励磁电流的情况下将发电机接入电网，再接通励磁，依靠定子磁场和转子磁场之间的电磁转矩将转子拉入同步转速，并车过程即告结束。

二、与电网并联运行时的功角特性

强调：要区分同步发电机是单机运行还是并网运行

若为单机运行，其电压和频率有可能发生变化，并且功率因数是由负载决定的。

若为并网运行，因受电网的制约，所以电压的大小与频率同电网严格保持一致，理论上认为不变，即电压和频率为常量。并网时同步发电机的功率因数是可以调节的

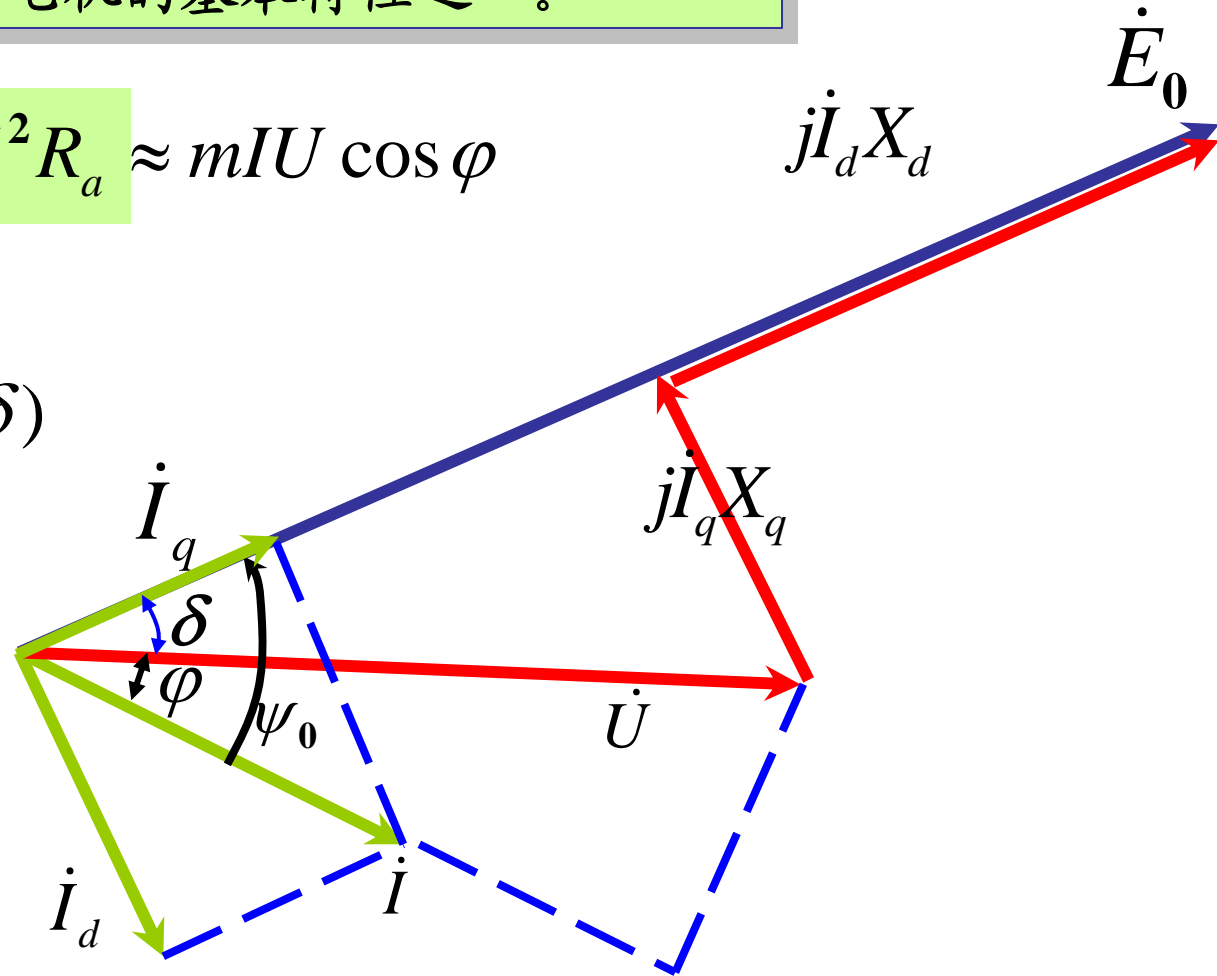
功角特性

当激磁电动势 E_0 和端电压保持不变时，发电机发出的电磁功率与功率角 δ 之间的关系 $P_e = f(\delta)$ ，称为功角特性。功角特性是同步电机的基本特性之一。

$$P_e = mUI \cos \varphi + mI^2 R_a \approx mIU \cos \varphi$$

$$\varphi = \psi_0 - \delta$$

$$P_e \approx mIU \cos(\psi_0 - \delta)$$



$$P_e \approx mIU \cos(\psi_0 - \delta) = mU (I_q \cos \delta + I_d \sin \delta)$$

$$I_q X_q = U \sin \delta \Rightarrow I_q = U \sin \delta / X_q$$

$$I_d X_d = E_0 - U \cos \delta \Rightarrow I_d = (E_0 - U \cos \delta) / X_d$$

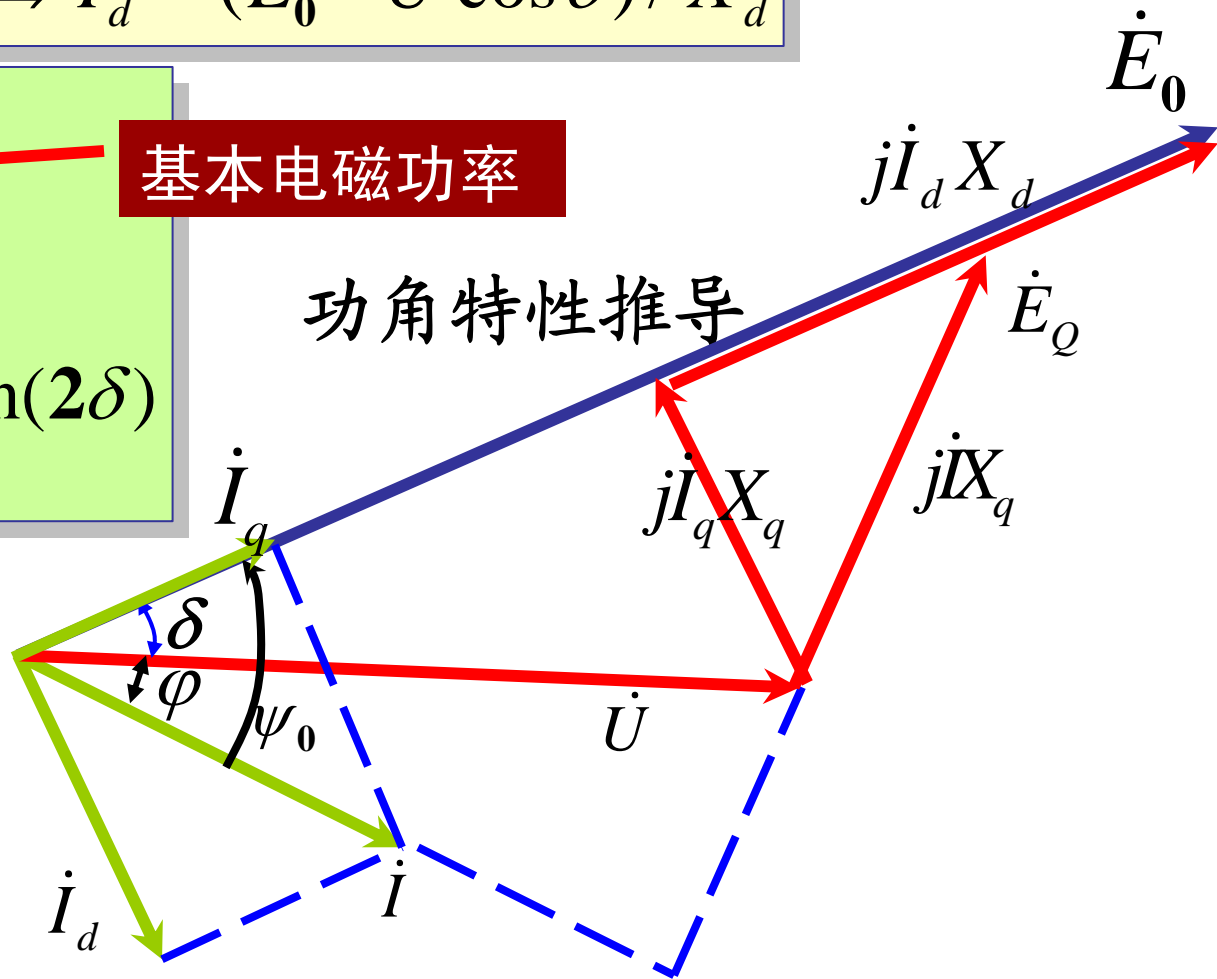
$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$$

基本电磁功率

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

附加电磁功率
磁阻功率

功角特性推导



凸极机

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

E_0 激磁电势

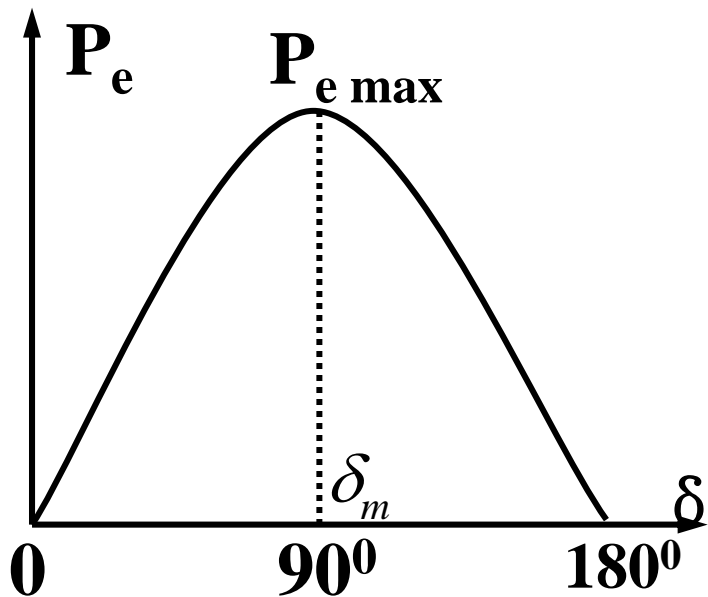
U 电网电压

隐极机

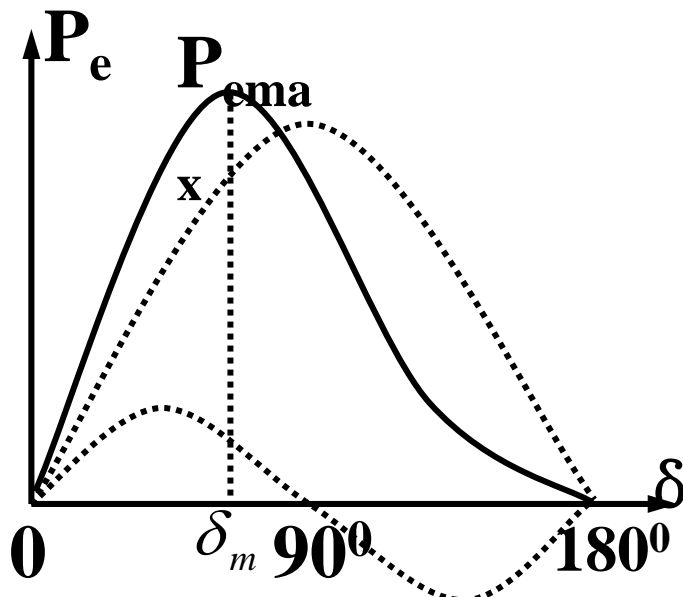
$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta$$

如：恒定激磁电势 E_0 不变, 恒定电网电压 U 不变, 电磁功率的大小只取决于功角 δ , 故 $P_e = f(\delta)$ 称为同步电机的功角特性

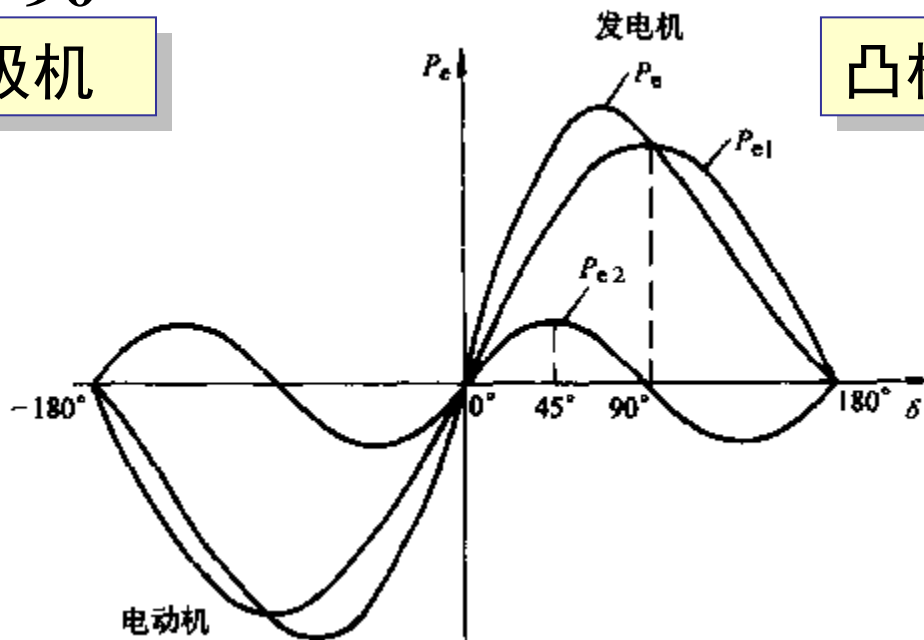
功角特性



隐极机



凸极机



【例 6-3】 有一台 70000kVA、13.8kV（星形联结）、 $\cos\varphi_N=0.85$ （滞后）的三相水轮发电机直接与电网相接，已知电机的参数为： $X_d=2.72\Omega$ ， $X_q=1.90\Omega$ ，电枢电阻忽略不计，试求额定负载时发电机的功率角和激磁电动势，以及保持该励磁不变时发电机的最大电磁功率（不计磁饱和）。

解 先按式（6-13）算出额定负载时的 ψ_0 角。由于

$$\text{额定相电压 } U = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3}} \text{V} = 7968 \text{V},$$

$$\text{额定相电流 } I = \frac{70000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3} \text{A} = 2929 \text{A},$$

$$\varphi = \arccos 0.85 = 31.79^\circ, \quad \sin\varphi = 0.5268$$

于是

$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin\varphi + IX_q}{U \cos\varphi} = \arctan \frac{7968 \times 0.5268 + 2929 \times 1.9}{7968 \times 0.85} = 55.25^\circ$$

$$\text{功率角为 } \delta = \psi_0 - \varphi = 55.25^\circ - 31.79^\circ = 23.46^\circ$$

$$\text{激磁电动势为 } E_0 = U \cos\delta + I_d X_d = [7968 \cos 23.46^\circ + (2929 \sin 55.25^\circ) \times 2.72] \text{V} = 13855 \text{V}$$

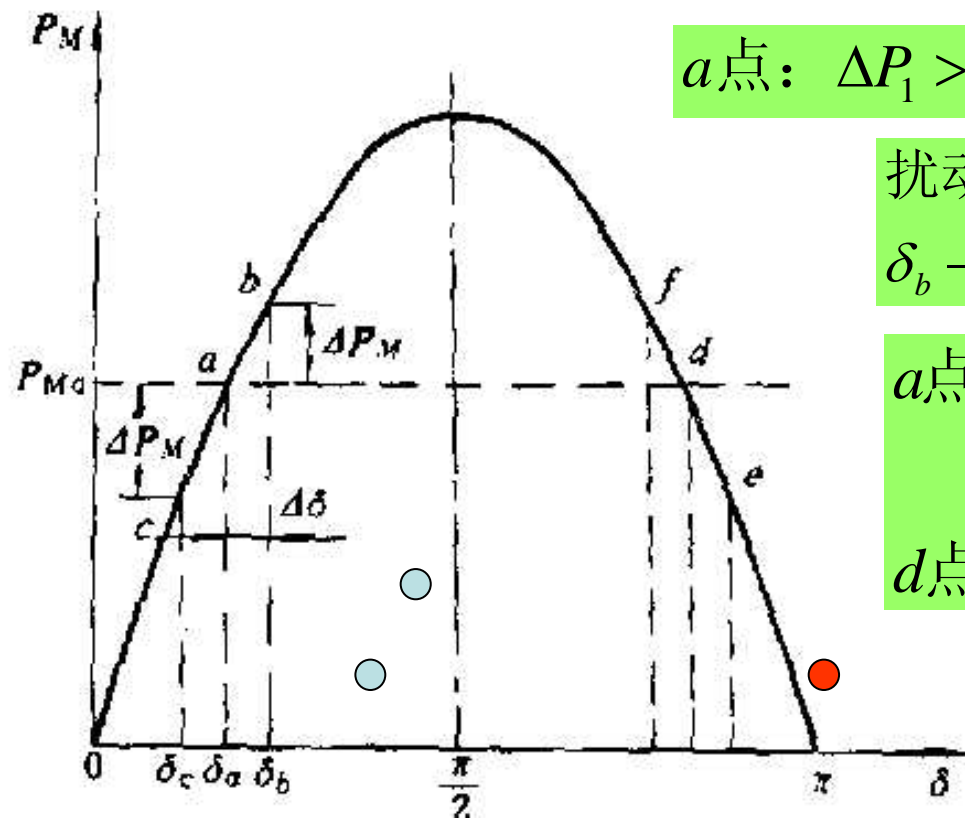
保持该 E_0 不变时， $P_{e1(\max)}$ 和 $P_{e2(\max)}$ 分别为

$$P_{e1(\max)} = m \frac{E_0 U}{X_d} = 3 \times \frac{13855 \times 7968}{2.72} \text{W} = 121.8 \times 10^3 \text{kW}$$

$$P_{e2(\max)} = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = 3 \times \frac{7968^2}{2} \left(\frac{1}{1.90} - \frac{1}{2.72} \right) \text{W} = 15.11 \times 10^3 \text{kW}$$

静态稳定

- 扰动——发电机输入功率的微动
- 静态稳定——瞬时扰动消除后继续保持原来的平衡运行状态



a 点: $\Delta P_1 > 0$, 转子加速, $\delta_a + \Delta\delta = \delta_b$, ΔP_M

扰动消失后, $P_1 < P_{Mb} + P_0$, 转子减速
 $\delta_b - \Delta\delta = \delta_a$, 达到原有的功率平衡

a 点正常工作点

过载能力:

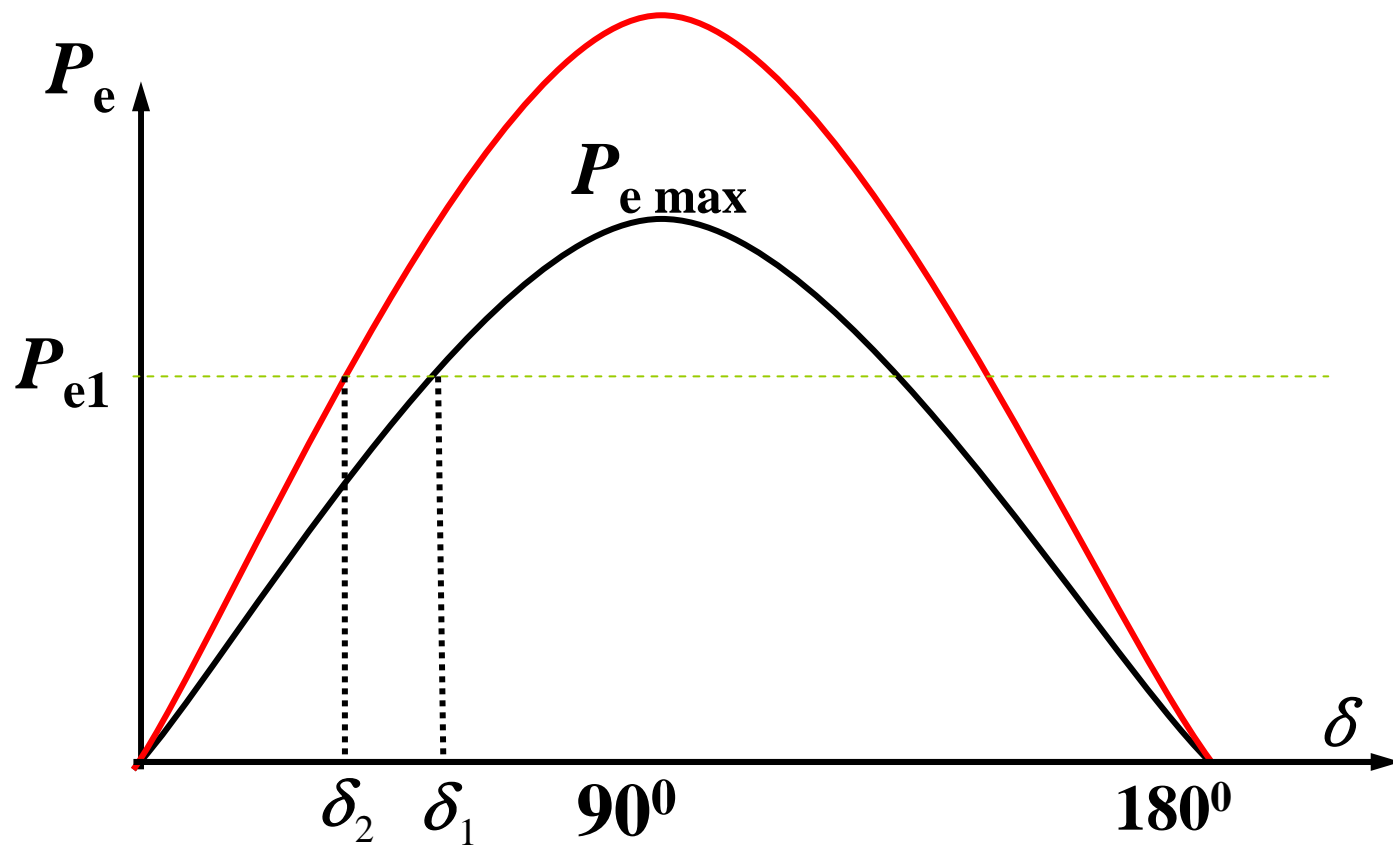
d 点静态不稳定

$$k_p = \frac{P_M}{P_N} = \frac{1}{\sin \delta_N}$$

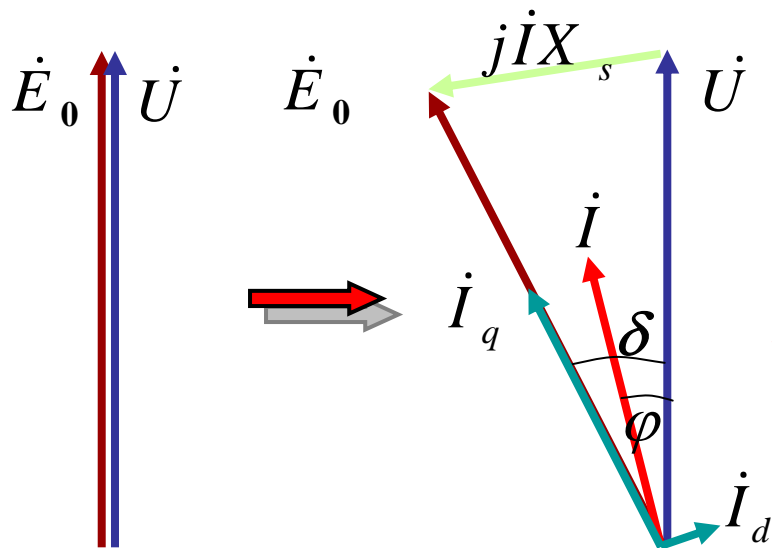
结论: 处于功角特性的曲线上升部分的工作点, 是静态稳定的, 即 $\frac{dP_M}{d\delta} > 0$

增强系统的静态稳定性:

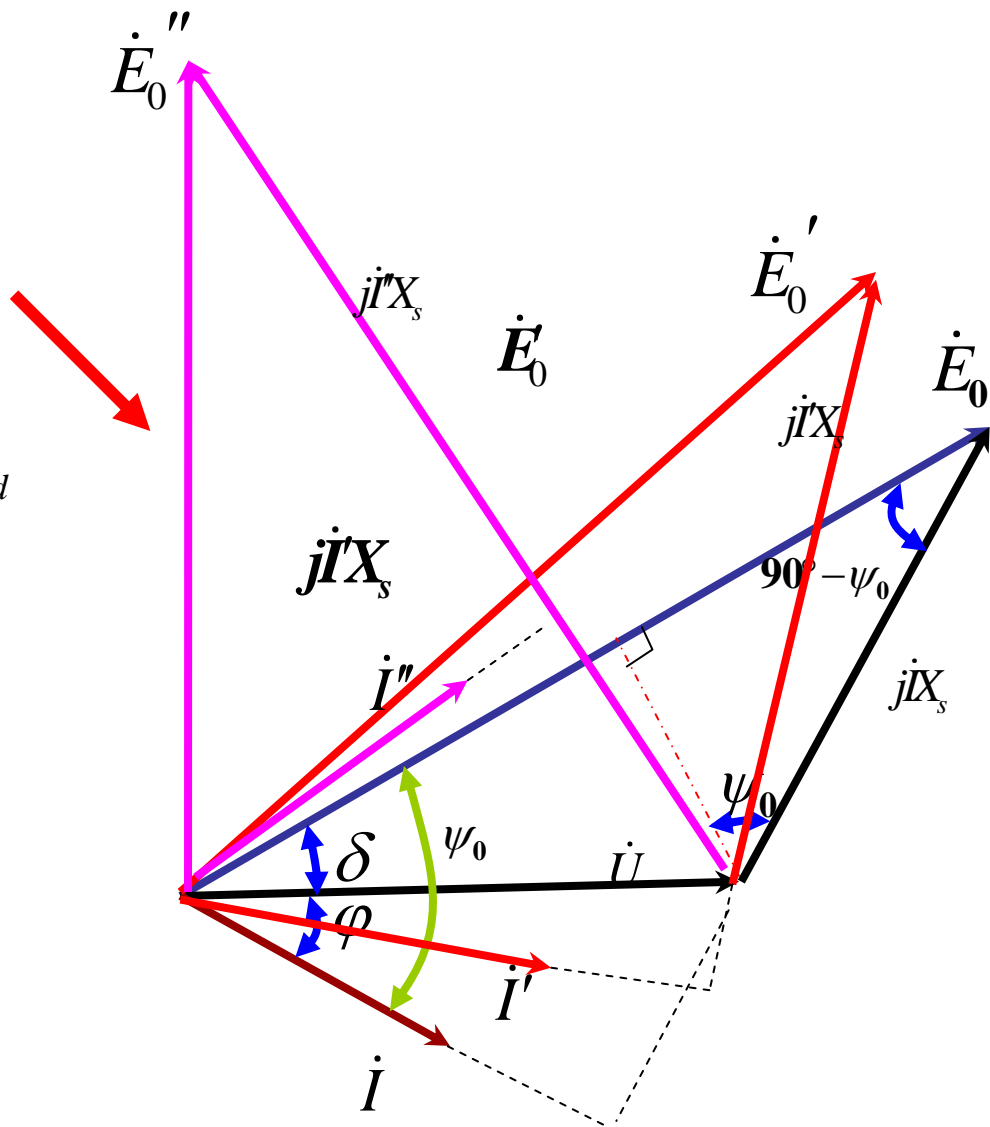
$$P_{e(\max)} = m \frac{E_0 \uparrow U}{X_s \downarrow}$$



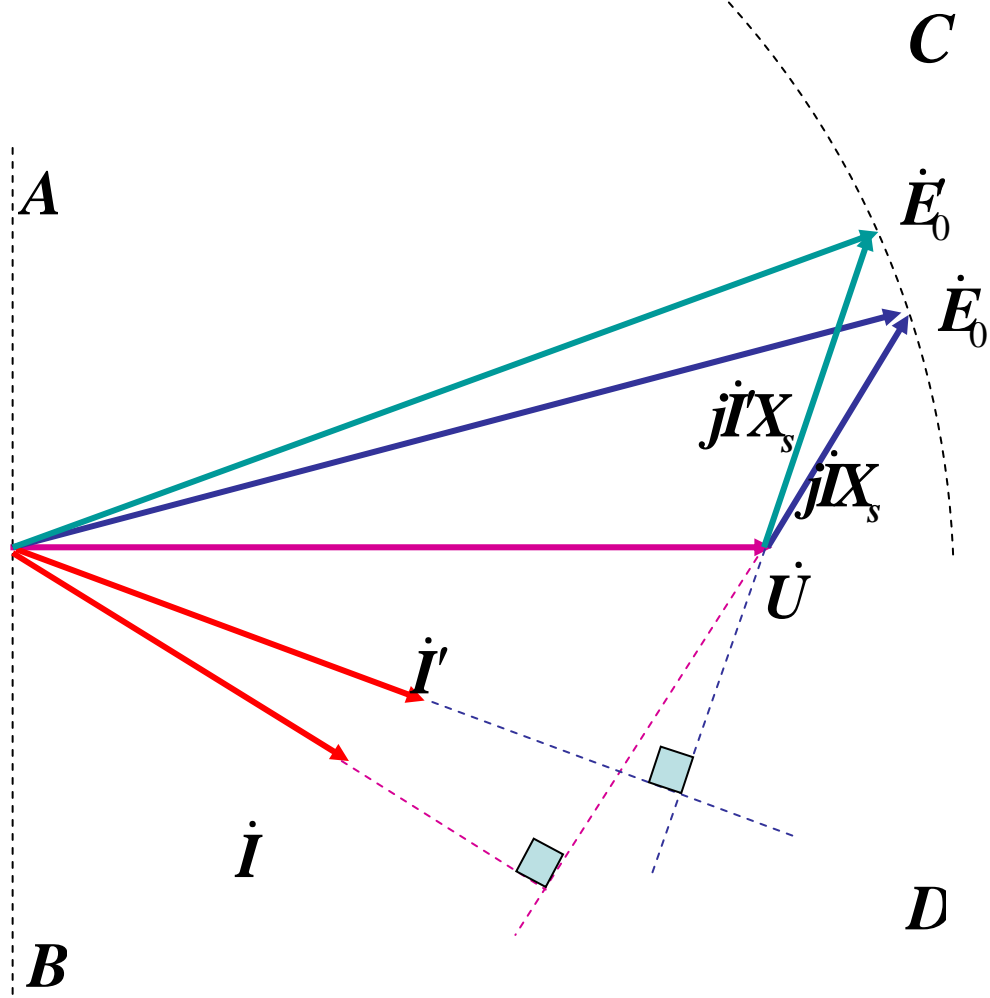
有功功率的调节



输出超前无功功率
吸收滞后无功功率



增大有功，保持励磁不变的相量图



四、无功功率的调节

调节励磁时原动机的输入有功功率保持不变。

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta = \text{const}$$



$$E_0 \sin \delta = \text{const}$$

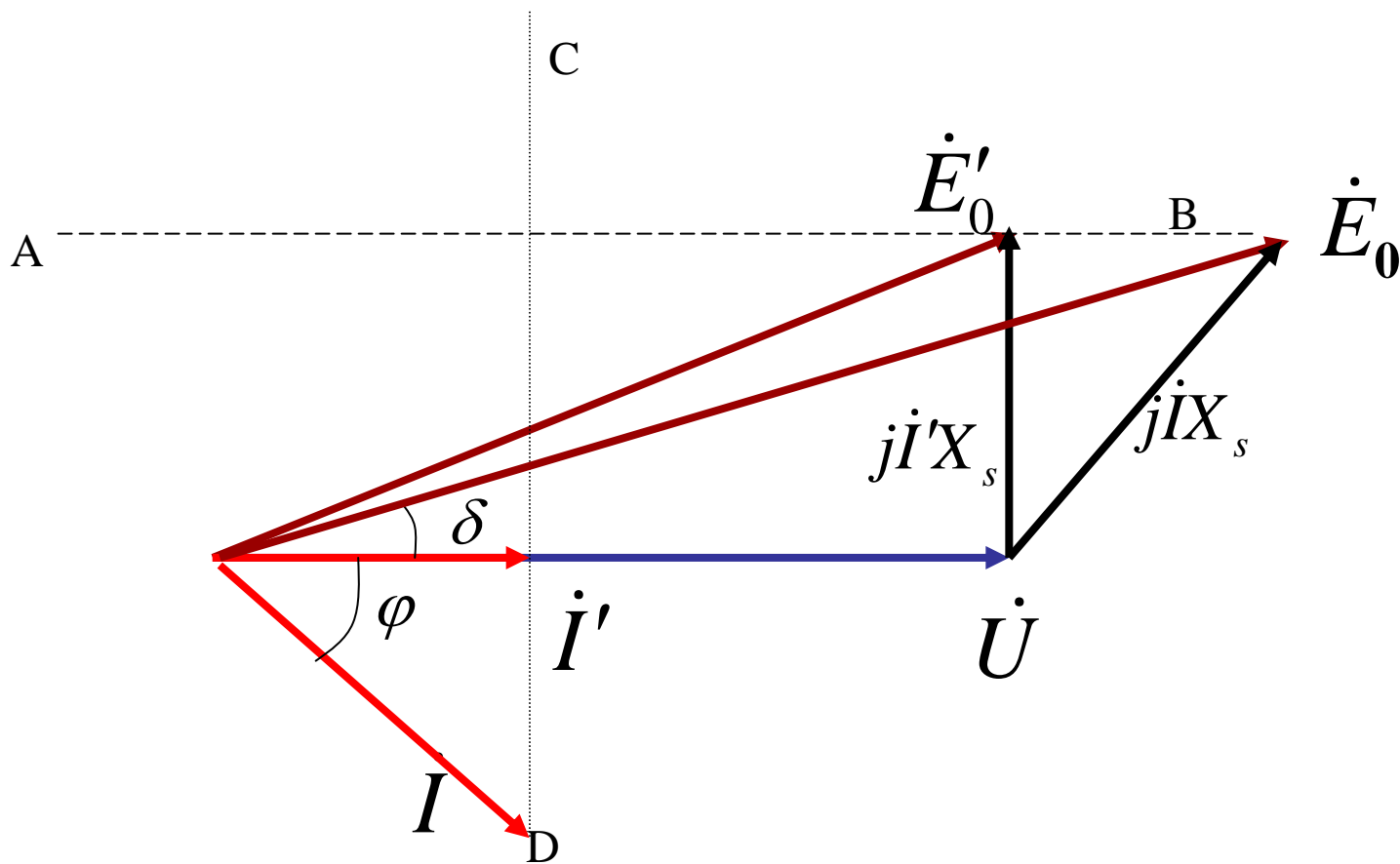
$$P_2 = mUI \cos \varphi = \text{const}$$



$$I \cos \varphi = \text{const}$$

四、无功功率的调节

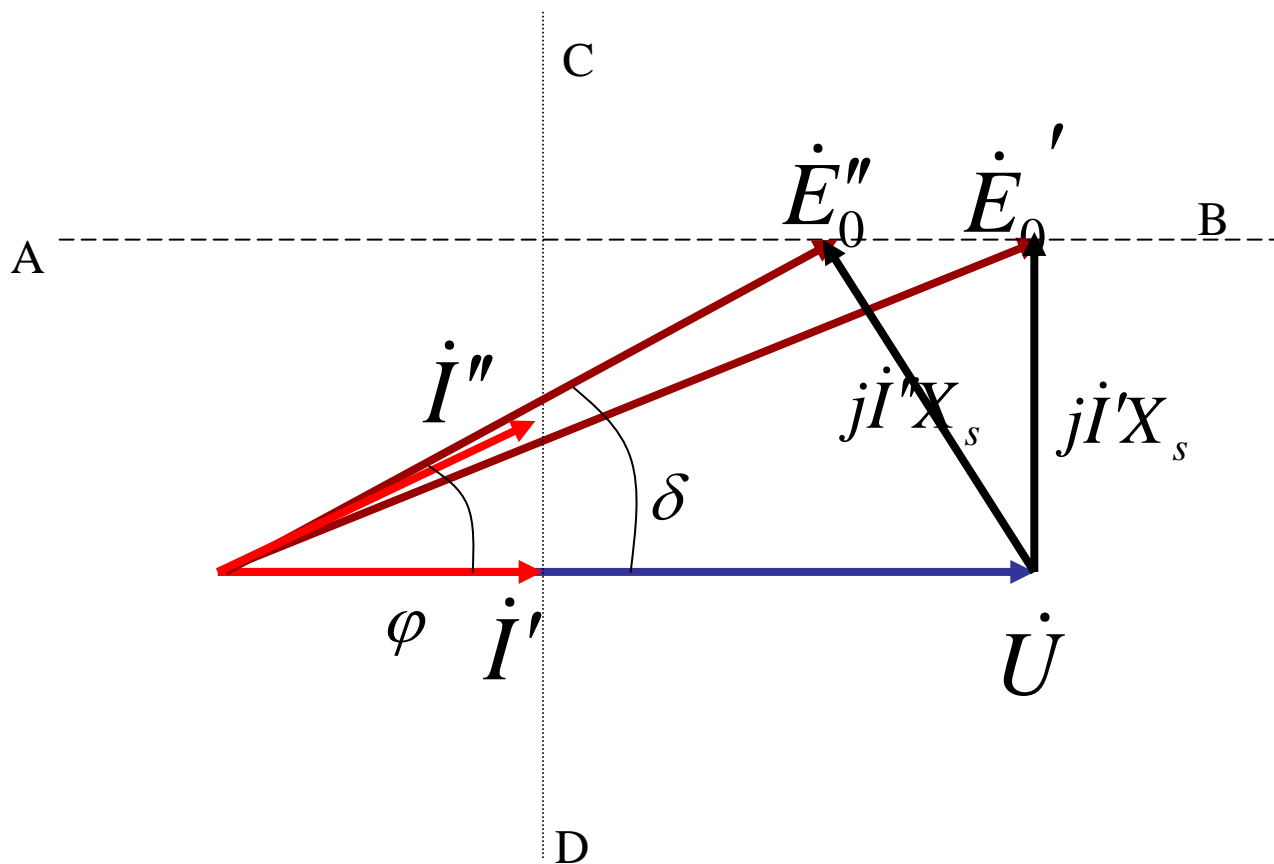
$$E_0 \sin \delta = \text{const}$$



$$I \cos \varphi = \text{const}$$

四、无功功率的调节

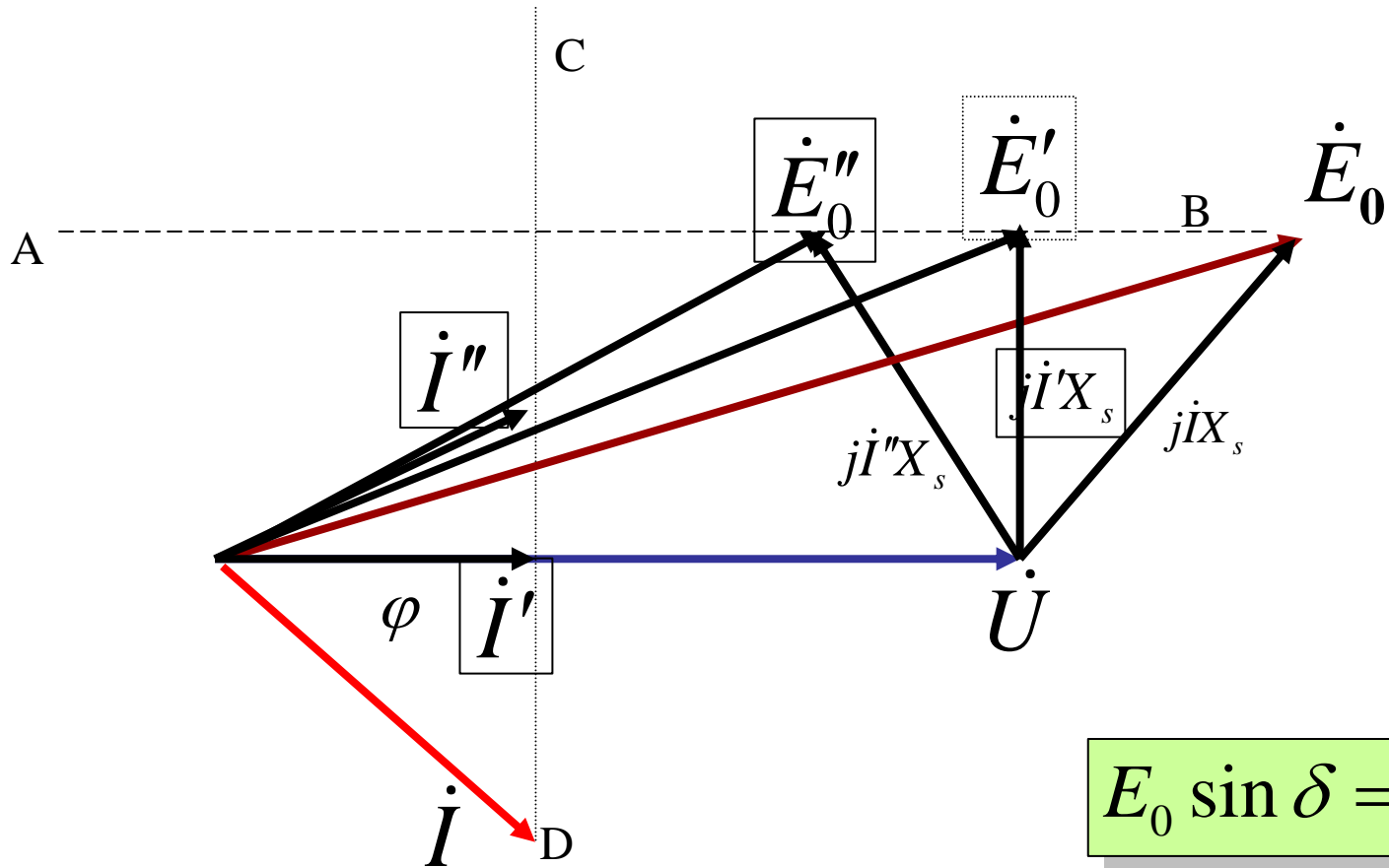
$$E_0 \sin \delta = \text{const}$$



欠励
掌握结论!!

$$I \cos \varphi = \text{const}$$

四、无功功率的调节



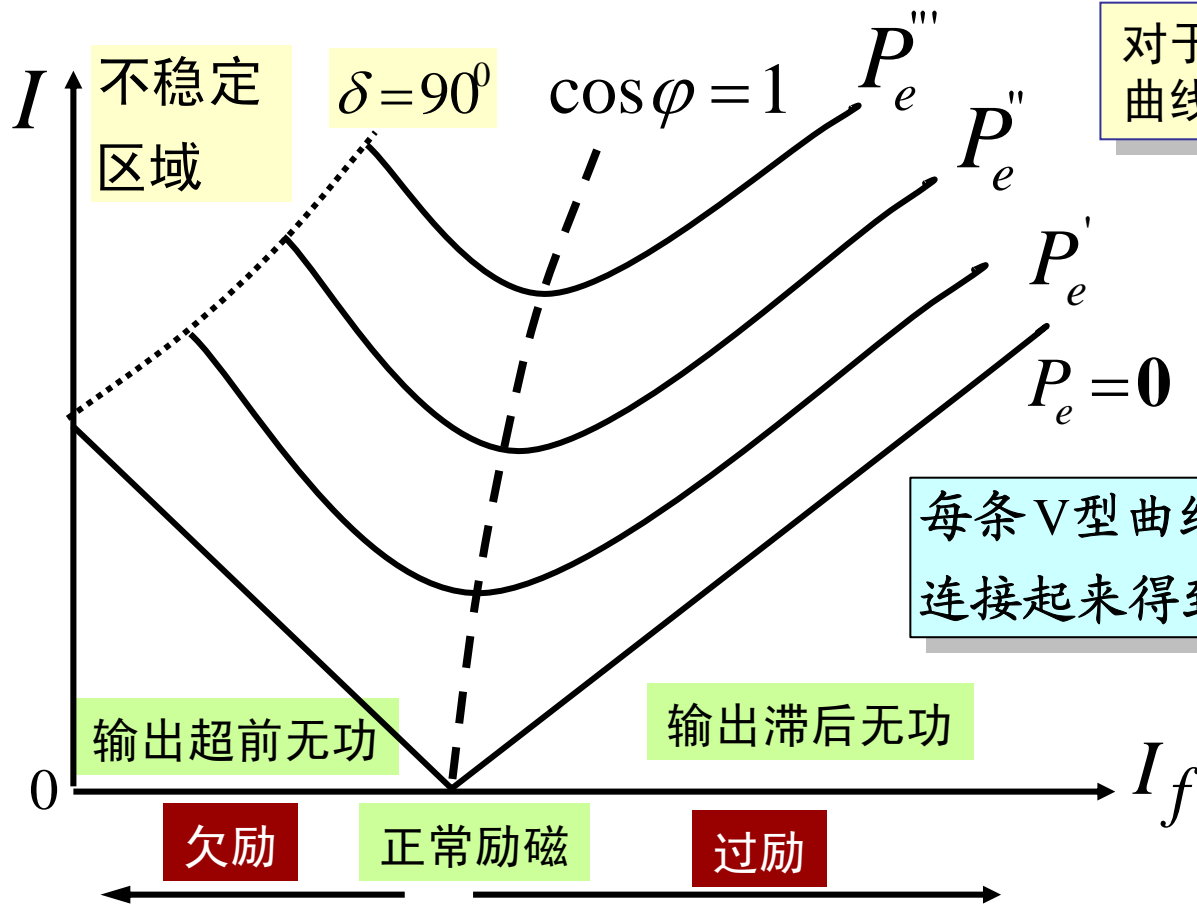
$$E_0 \sin \delta = \text{const}$$

$$I \cos \varphi = \text{const}$$

- 随着励磁的增大，功角在减小；

同步发电机V型曲线

用实验方法，在保持电网电压 U 和电磁功率 P_e 不变的情况下，改变 I_f 测量 I ，得到 $I = f(I_f)$ 曲线，其形状与字母“V”相似，故称为V型曲线

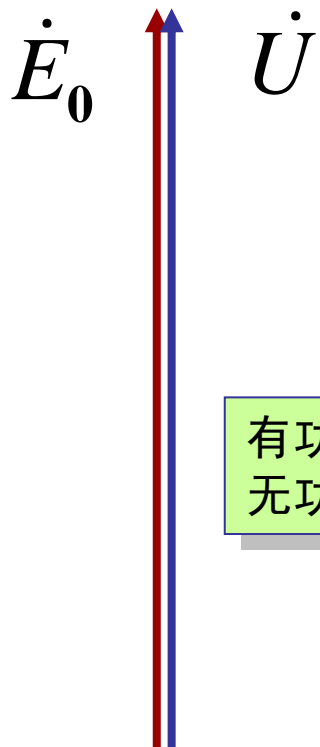
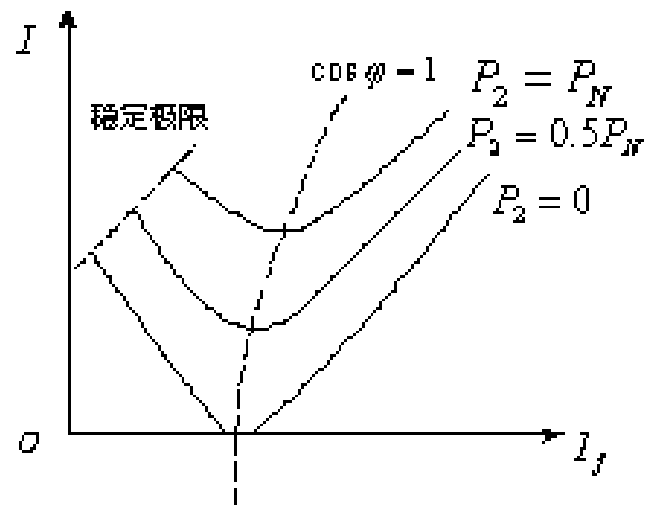


对于每一个 P_e 都可以测出一条V型曲线， P_e 愈大，则曲线愈上移

$$P_e''' > P_e'' > P_e' > 0$$

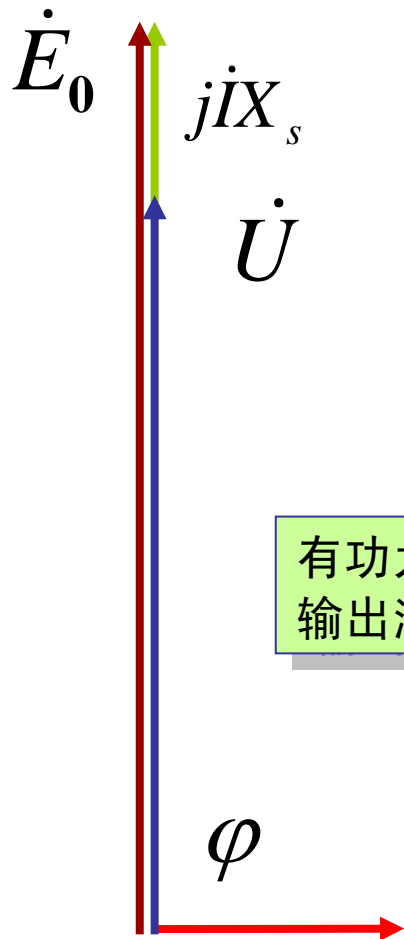
每条V型曲线的最低点，表示 $\cos \varphi = 1$ ，连接起来得到一条倾斜的曲线

同步发电机V型曲线 $P_2=0$



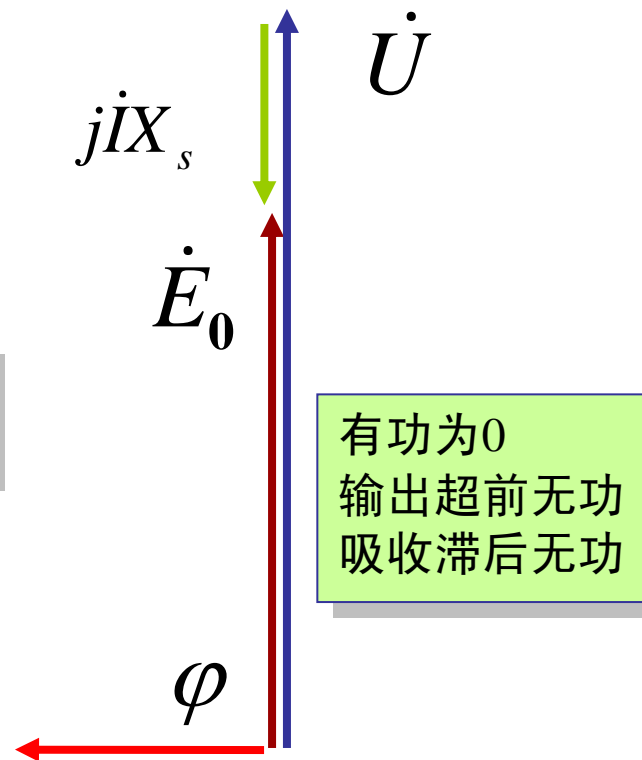
有功为0
无功为0

正常励磁



有功为0
输出滞后无功

过励



有功为0
输出超前无功
吸收滞后无功

欠励

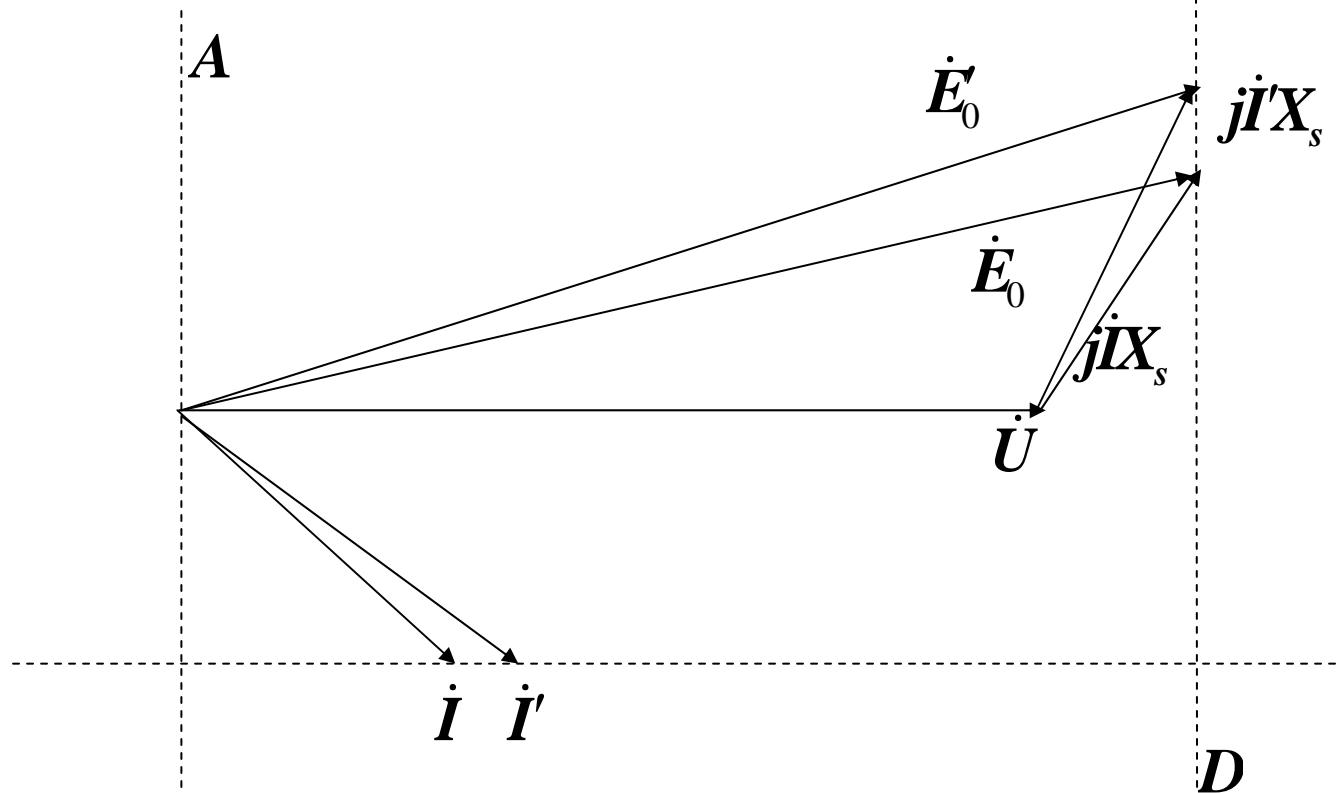
现象解释

- 调节励磁就可以调节无功功率这一现象，可用**磁动势平衡**关系来解释。
- 发电机和无穷大电网并联时，其端电压恒为常值，所以无论励磁如何变化，**电枢绕组的合成磁通不变**。
- 当增加励磁电流并达到“过励”时，主磁通增多，为维持电枢绕组的合成磁通不变，电机应**输出滞后**电流，使去磁性的电枢反应增加，以补偿过多的主磁通。
- 反之，减少励磁电流而变为“欠励”时，主磁通减少，发电机必须**输出超前(吸收滞后)**电流，以减少去磁性的电枢反应，甚至使电枢反应变为增磁性以**补偿主磁通的不足**。

增大有功，调节励磁保持无功不变

$$Q_2 = m \frac{E_0 U}{X_s} \cos \delta - m \frac{U^2}{X_s} = \text{const} \quad \longrightarrow \quad E_0 \cos \delta = \text{const}$$

$$Q_2 = mUI \sin \varphi = \text{const} \quad \longrightarrow \quad I \sin \varphi = \text{const} \quad C$$



结论^B: 有功增大，无功不变时，功角增大

6.9 同步电动机与同步补偿机

同步电动机的特点是，稳态运行时，转速与负载大小无关，始终保持为同步转速，且其功率因数可以调节。

在恒转速负载及需要改善功率因数的场合，常常优先选用同步电动机。

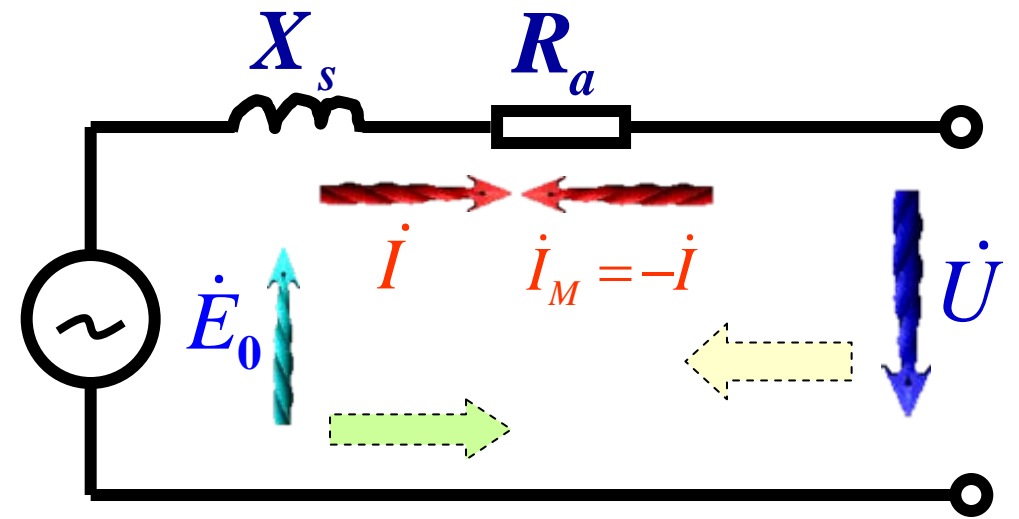
同步补偿机则是一种专门用来补偿电网无功功率和功率因数的同步电机

1. 隐极同步电动机的电压方程和向量图

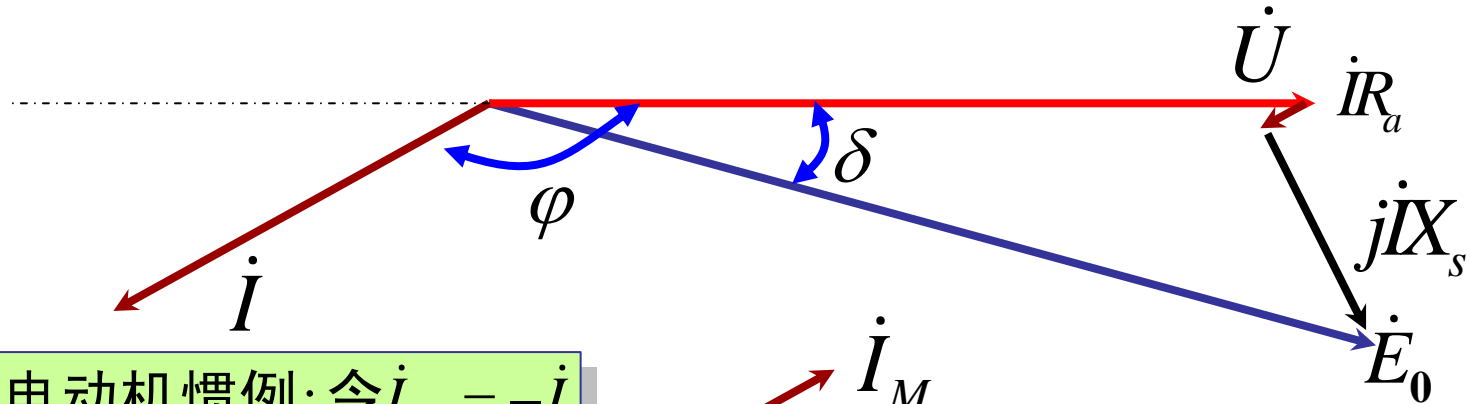
采用发电机惯例： \dot{E}_0 超前 \dot{U} 时 δ 为正，此时 δ 为负值

电磁转矩为制动转矩，
电机从电网吸收电功率

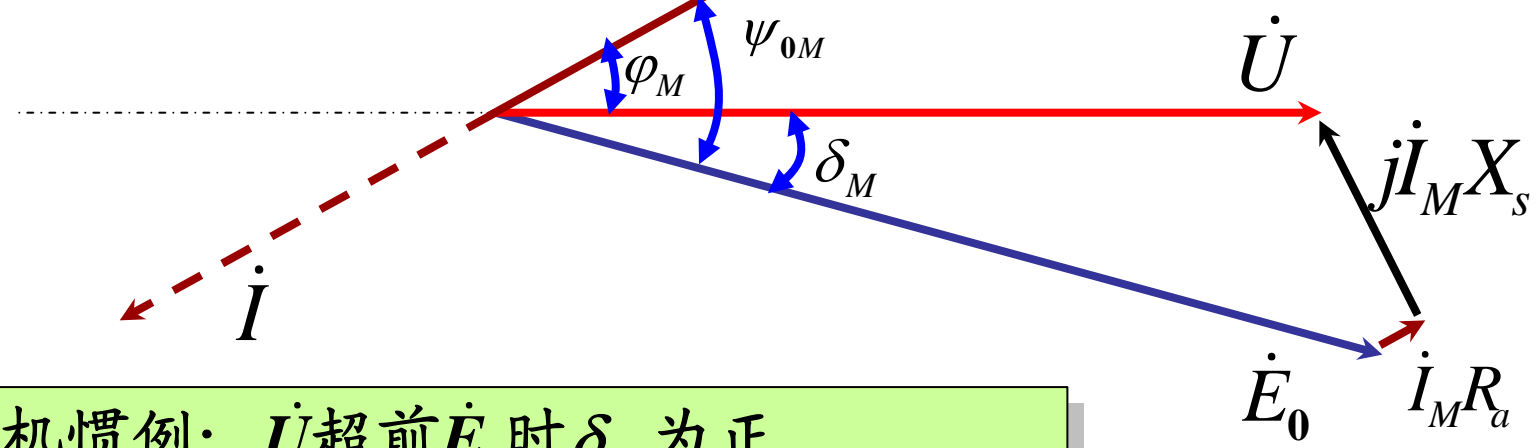
更改为电动机惯例：
令 $\dot{I}_M = -\dot{I}$



1. 隐极同步电动机的电压方程和向量图



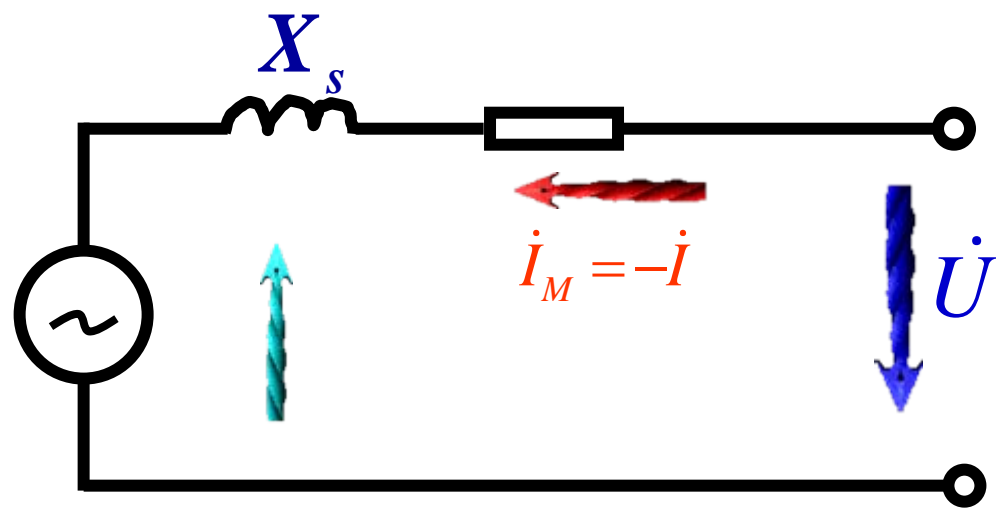
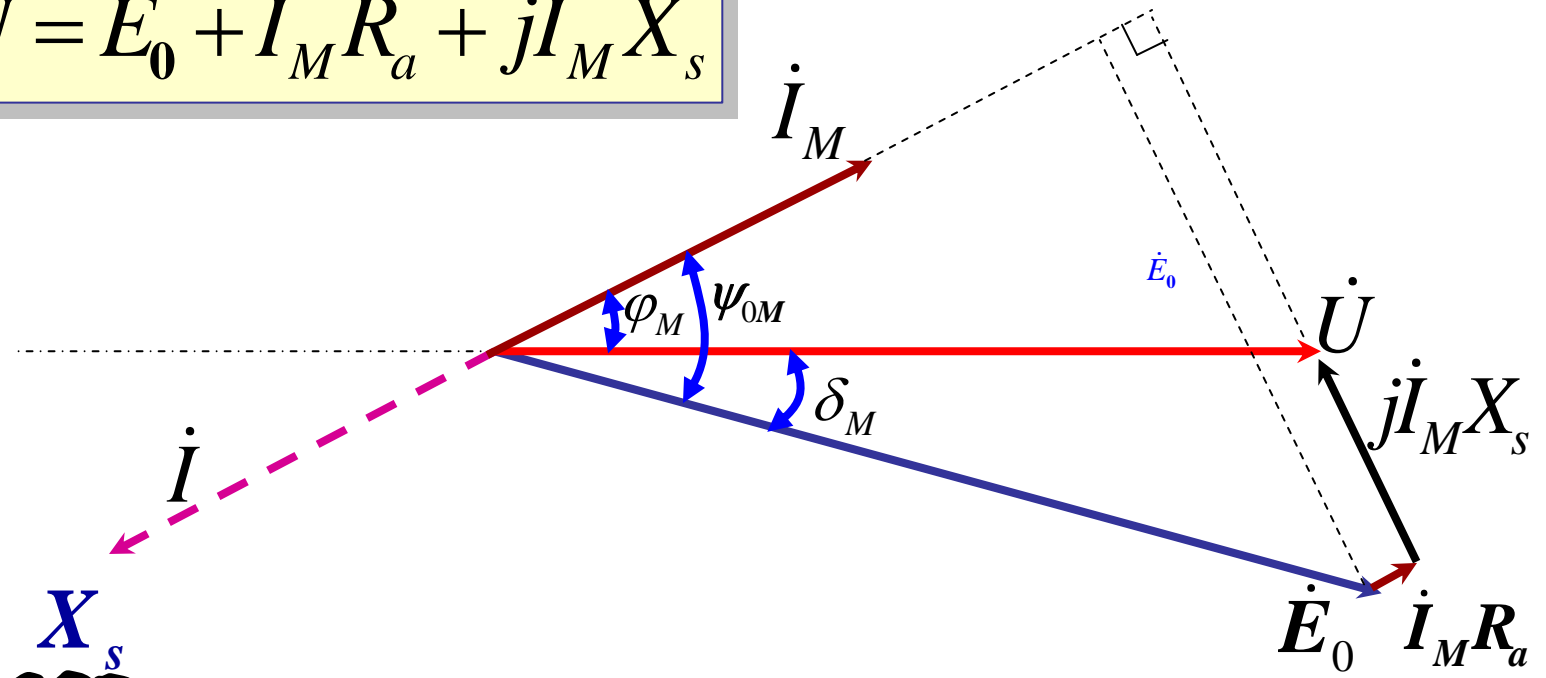
更改为电动机惯例: 令 $\dot{I}_M = -\dot{i}$



电动机惯例: \dot{U} 超前 \dot{E}_0 时 δ_M 为正,
 \dot{I}_M 超前 \dot{U} 时 φ_M 为正, \dot{I}_M 超前 \dot{E}_0 时 ψ_{0M} 为正
 φ_M 和 ψ_{0M} 定义在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之内。

1. 隐极同步电动机的电压方程和向量图

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



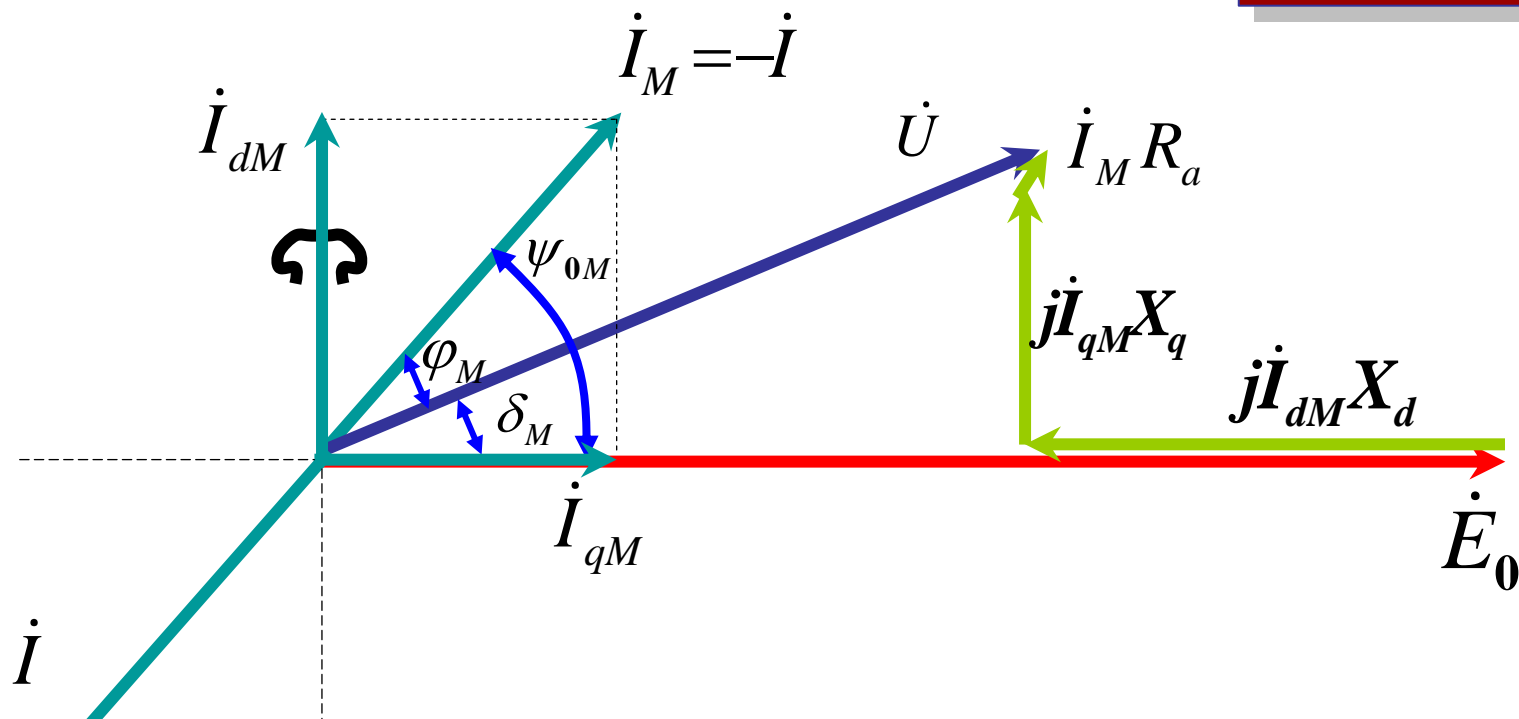
$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_q}{U \cos \varphi - I R_a}$$

2.凸极同步电动机的电压方程和向量图

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_{dM} X_d + j\dot{I}_{qM} X_q$$

绘制凸极同步电动机向量图时，与发电机一样，需要先确定 ψ_{0M} 角

$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_q}{U \cos \varphi - I R_a}$$



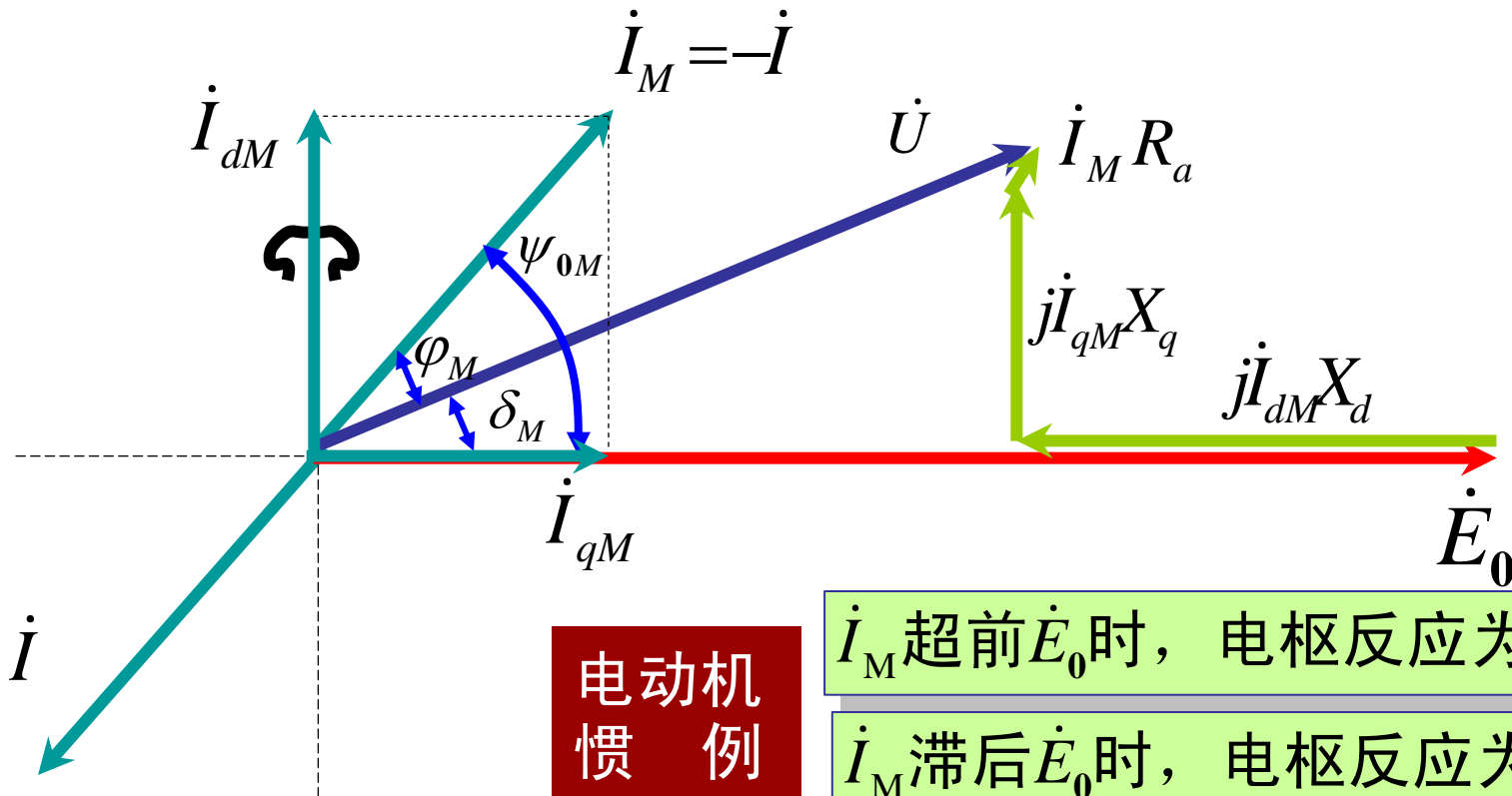
2. 凸极同步电动机的电压方程和向量图

在分析电枢反应的性质时，也要注意是采用哪种惯例。

发电机
惯例

i 滞后 E_0 时，电枢反应为去磁

i 超前 E_0 时，电枢反应为助磁



电动机
惯例

\dot{I}_M 超前 \dot{E}_0 时，电枢反应为去磁

\dot{I}_M 滞后 \dot{E}_0 时，电枢反应为助磁

二、同步电动机的功角特性、功率方程和转矩方程

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

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

驱动转矩

$$P_1 = p_{cua} + P_e$$

$$P_e = p_{Fe} + p_{\Omega} + P_2$$

注意：电动机从电功率角度是讲吸收！！

三、同步电动机的运行特性

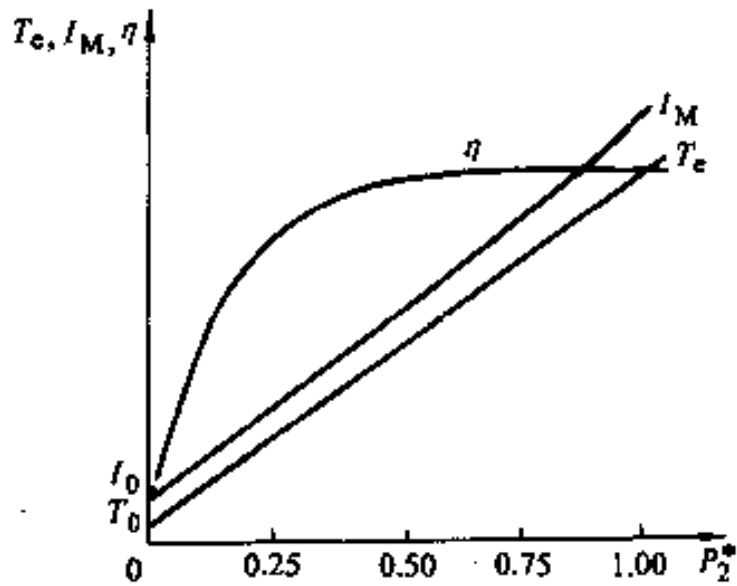
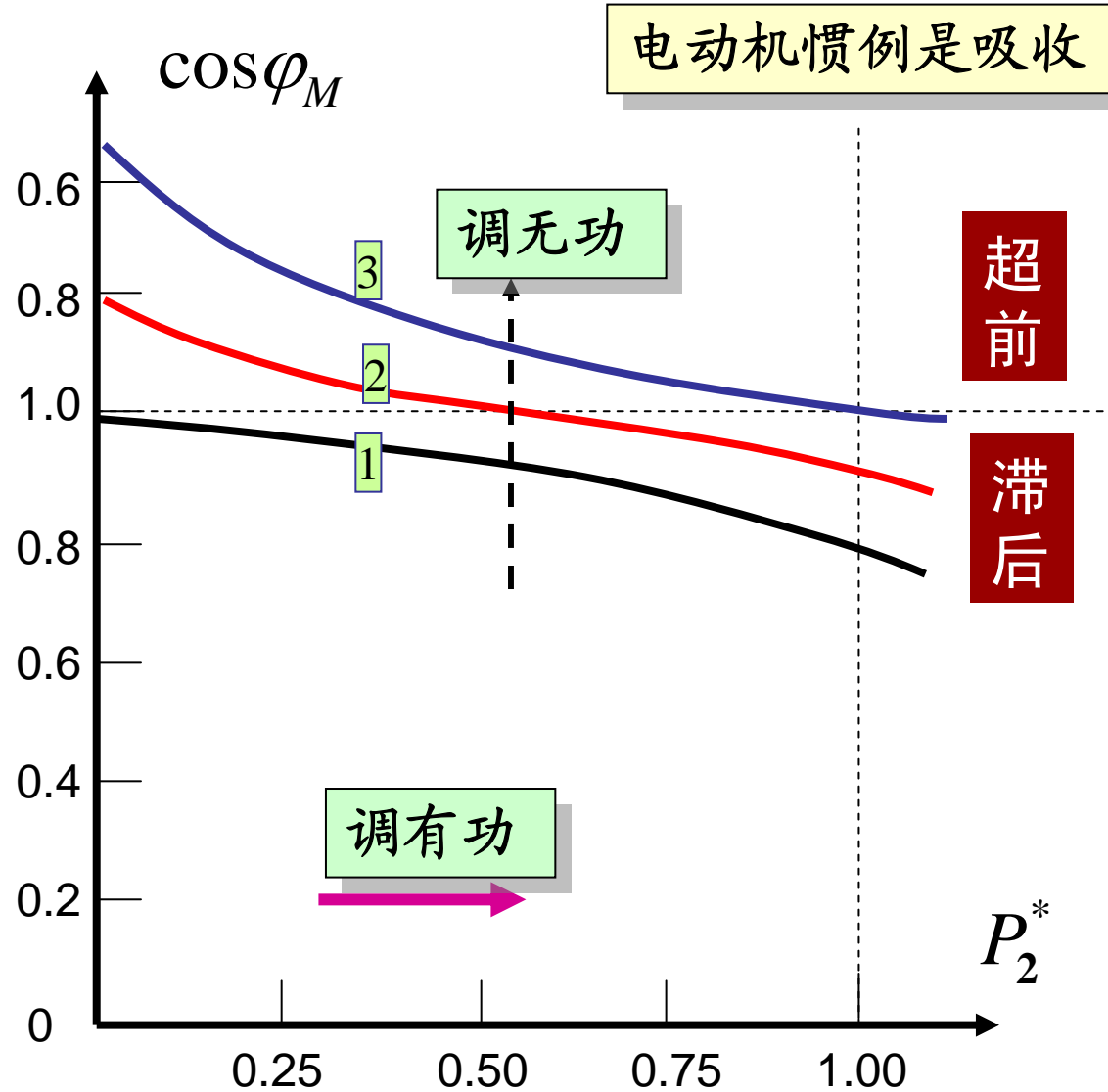
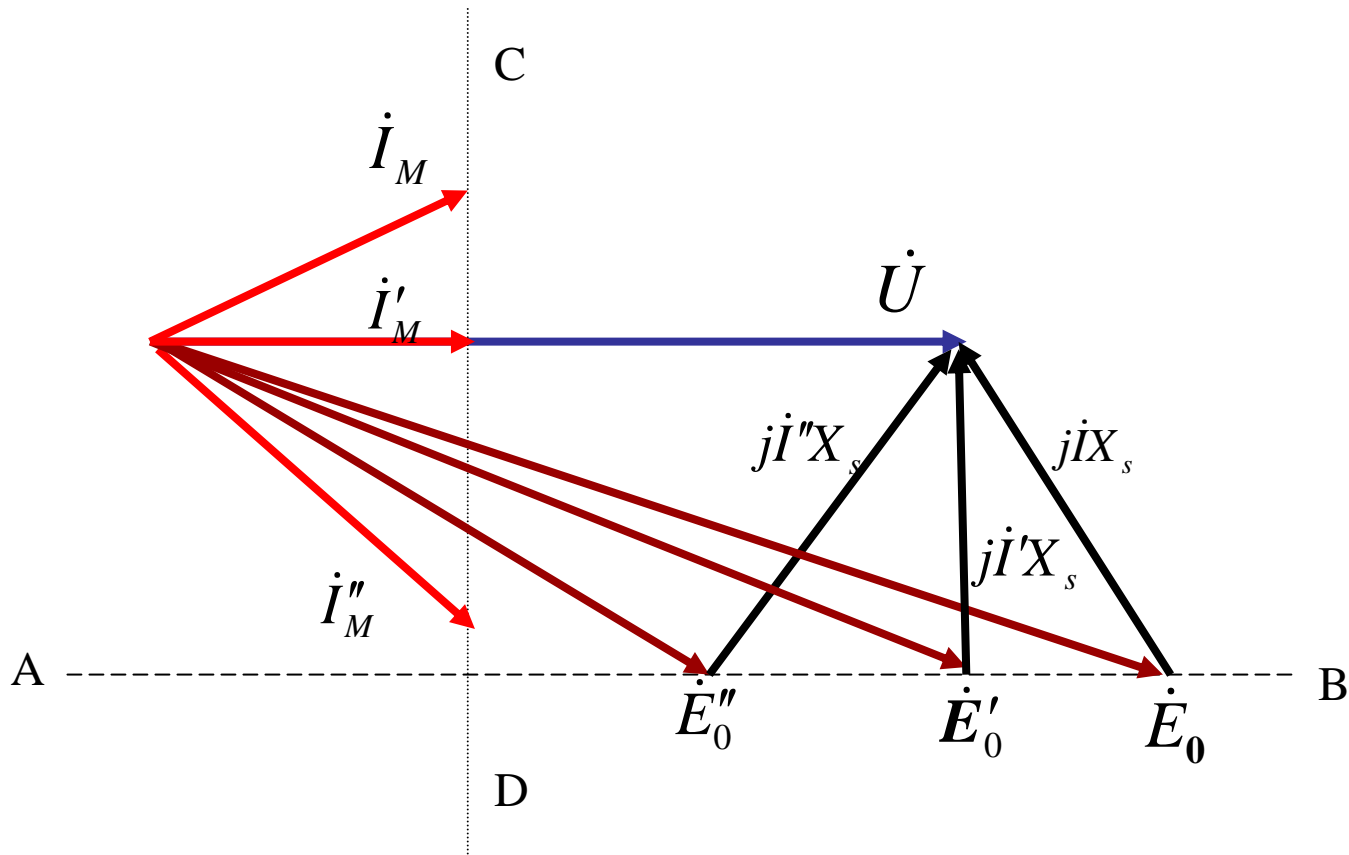


图 6-48 同步电动机的工作特性

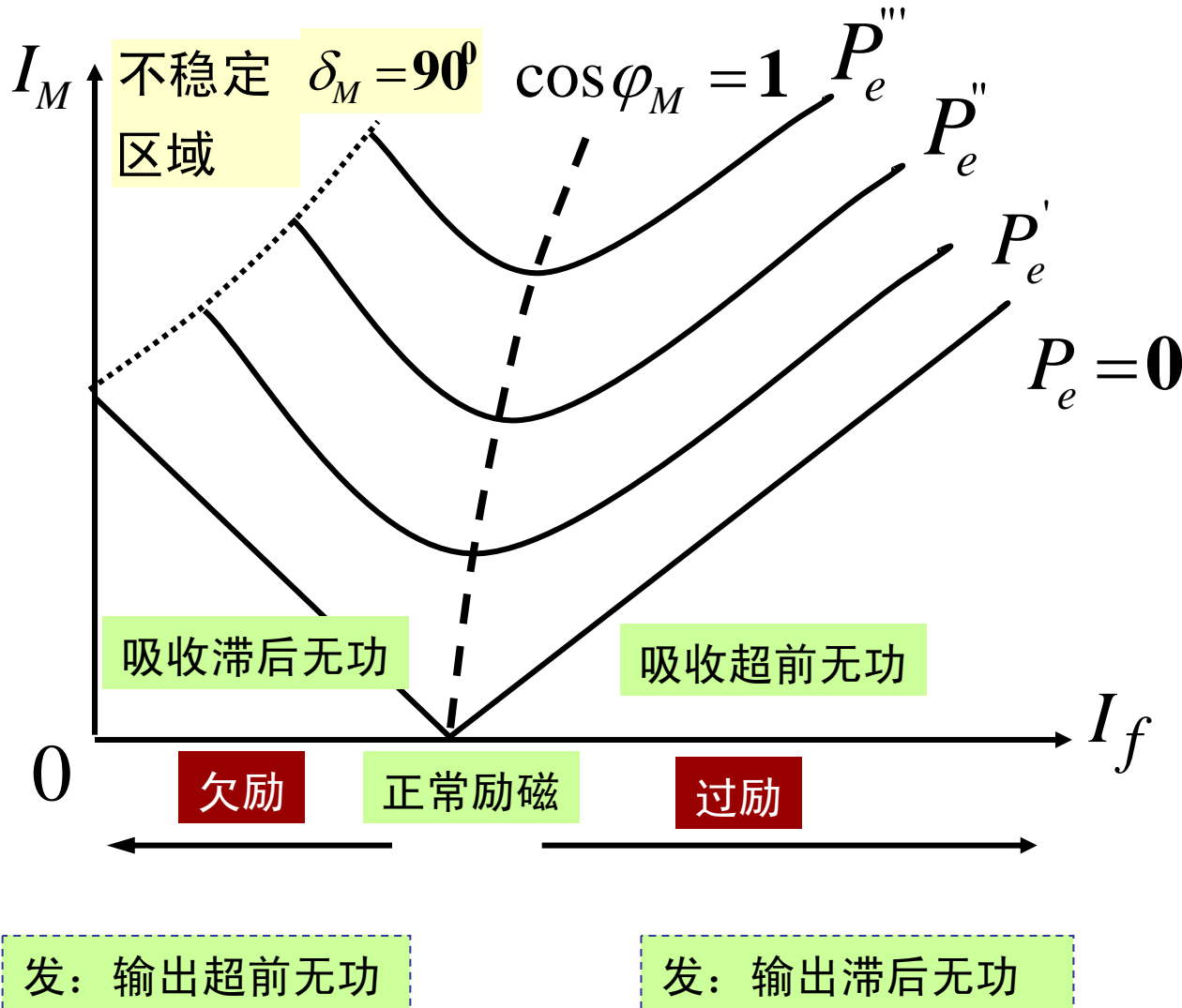




- 感应电机需从电网吸取滞后的无功功率用于励磁,致使电网的功率因数降低.
- 而同步电机运行时,可以调节其励磁电流来改善电网的功率因数.

同步电动机V型曲线

注意站在电动机的角度是吸收



【例 6-4】 有一台凸极同步电动机接在无穷大电网上运行，电动机的额定功率因数 $\cos\varphi_M=1$ ，电动机的参数为 $X_d^*=0.8$ ， $X_q^*=0.5$ ，电枢电阻和磁饱和忽略不计，试求：

(1) 该机在额定电流、 $\cos\varphi_M=1$ 的情况下运行时，激磁电动势的标么值和该激磁电动势下的功角特性；

(2) 若负载转矩不变，励磁增加 20%，问电枢电流和功率因数将变成多少？

解 采用标么值计算。

(1) 取电动机的端电压为参考相量， $\dot{U}^*=1.0\angle 0^\circ$ 。由于 $\cos\varphi_M=1$ ，故电枢电流 $\dot{I}_M^*=1.0\angle 0^\circ$ ，于是内功率因数角 ψ_{0M} 为

$$\psi_{0M} = \arctan \frac{U^* \sin\varphi_M + I_M^* X_q^*}{U^* \cos\varphi_M} = \arctan \frac{0.5}{1} = 26.57^\circ$$

由于 $\varphi_M=0^\circ$ ，故功率角为

$$\delta_M = \psi_{0M} = 26.57^\circ$$

于是，电流的直轴和交轴分量为

$$I_{dM}^* = I_M^* \sin\psi_{0M} = \sin 26.57^\circ = 0.4473$$

$$I_{qM}^* = I_M^* \cos\psi_{0M} = \cos 26.57^\circ = 0.8944$$

激磁电动势 E_o^* 为

$$E_o^* = U^* \cos\delta_M + I_{dM}^* X_d^* = 1 \times \cos 26.57^\circ + 0.4473 \times 0.8 = 1.252$$

将有关数据代入功角特性的表达式，可得

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

$$\frac{1.252 \times 1}{0.8} \sin \delta_M + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) = 1.565 \sin \delta_M + 0.375 \sin 2\delta_M$$

注意，用标么值表示时，上式中无相数 m ，且以电动机的额定视在功率作为功率基值。

(2) 若励磁增加 20%，不计磁饱和时， $E_0'^* = 1.2E_0^* = 1.2 \times 1.252 = 1.502$ ，此时功角特性为

$$P_c^* = 1.878 \sin \delta_M' + 0.375 \sin 2\delta_M'$$

因负载转矩不变，故 P_c^* 仍保持为 1，用试探法求 δ_M' ，可得 $\delta_M' = 22.91^\circ$ 。于是从相量图可知，电枢电流的直轴、交轴分量和电枢电流分别为

$$I_{dM}'^* = \frac{E_0'^* - U^* \cos \delta_M'}{X_d^*} = \frac{1.502 - \cos 22.91^\circ}{0.8} = 0.7261$$

$$I_{qM}'^* = \frac{U^* \sin \delta_M'}{X_q^*} = \frac{\sin 22.91^\circ}{0.5} = 0.7786$$

$$I_M'^* = \sqrt{(I_{dM}'^*)^2 + (I_{qM}'^*)^2} = \sqrt{(0.7261)^2 + (0.7786)^2} = 1.064$$

内功率因数角为

$$\psi_{0M}' = \arccos \frac{I_{dM}'^*}{I_M'^*} = \arccos \frac{0.7786}{1.064} = 42.97^\circ$$

功率因数为

$$\varphi_M' = \psi_{0M}' - \delta_M' = 42.97^\circ - 22.91^\circ = 20.06^\circ$$

$$\cos \varphi_M' = \cos 20.06^\circ = 0.9393 \text{ (超前)}$$

即过励时功率因数将从 1 变为超前。

【例 6-5】 某工厂电力设备所消耗的总功率为 2400kW, $\cos\varphi=0.8$ (滞后), 今欲添置功率为 400kW 的电动机。现有 400kW、 $\cos\varphi=0.8$ (滞后)的感应电动机和 400kW、 $\cos\varphi=0.8$ (超前)的同步电动机可供选用, 试问在这两种情况下, 工厂的总视在功率和功率因数各为多少(电动机的损耗略去不计)?

解 工厂原来所耗功率情况为

有功功率 $P = 2400\text{kW}$

视在功率 $S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{2400}{0.8}\text{kVA} = 3000\text{kVA}$

由于 $\cos\varphi=0.8$ (滞后), 故 $\sin\varphi=0.6$, 于是无功功率为

$$Q = S\sin\varphi = 3000 \times 0.6\text{kVAr} = 1800\text{kVAr}$$

(1) 选用感应电动机时

总有功功率 $P' = (2400 + 400)\text{kW} = 2800\text{kW}$

总无功功率 $Q' = \left(1800 + \frac{400}{0.8} \times 0.6\right)\text{kVAr} = 2100\text{kVAr}$ (滞后)

总视在功率 $S' = \sqrt{P'^2 + Q'^2} = \sqrt{2800^2 + 2100^2}\text{kVA} = 3500\text{kVA}$

总功率因数不变, $\cos\varphi' = 0.8$ (滞后)

(2) 选用同步电动机时

总有功功率 $P'' = (2400 + 400)\text{kW} = 2800\text{kW}$

总无功功率 $Q'' = \left(1800 - \frac{400}{0.8} \times 0.6\right)\text{kVAr} = 1500\text{kVAr}$ (滞后)

总视在功率 $S'' = \sqrt{P''^2 + Q''^2} = \sqrt{2800^2 + 1500^2}\text{kVA} = 3176\text{kVA}$

总功率因数 $\cos\varphi'' = \frac{P''}{S''} = \frac{2800}{3176} = 0.8815$ (滞后)

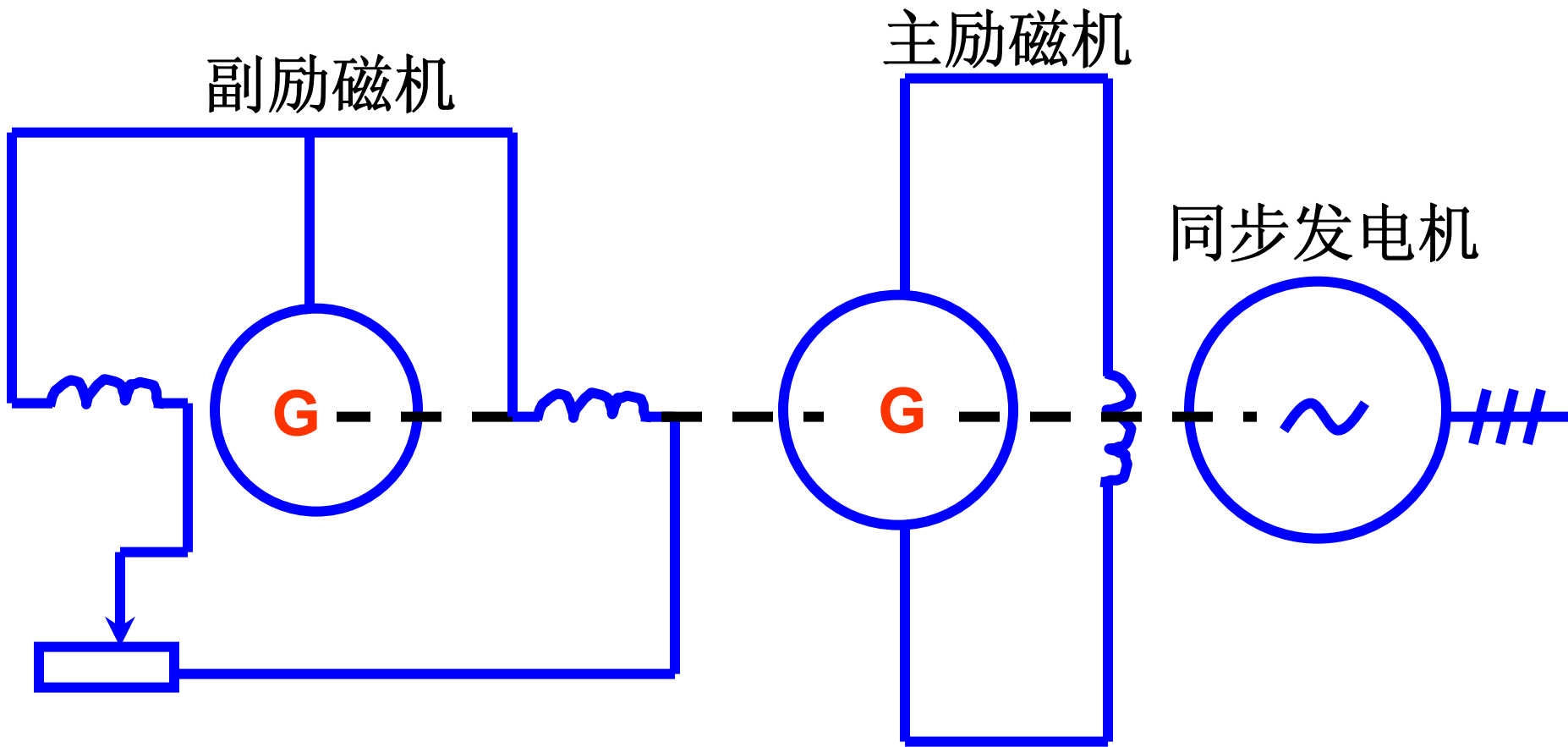
计算表明, 若选用同步电动机, 则工厂所需的总视在功率较小, 总功率因数较

- 作业:
- 6.4, 6.5, 6.7, 6.8, 6.13, 6-17, 6-18, 6.25, 6.26, 6.28

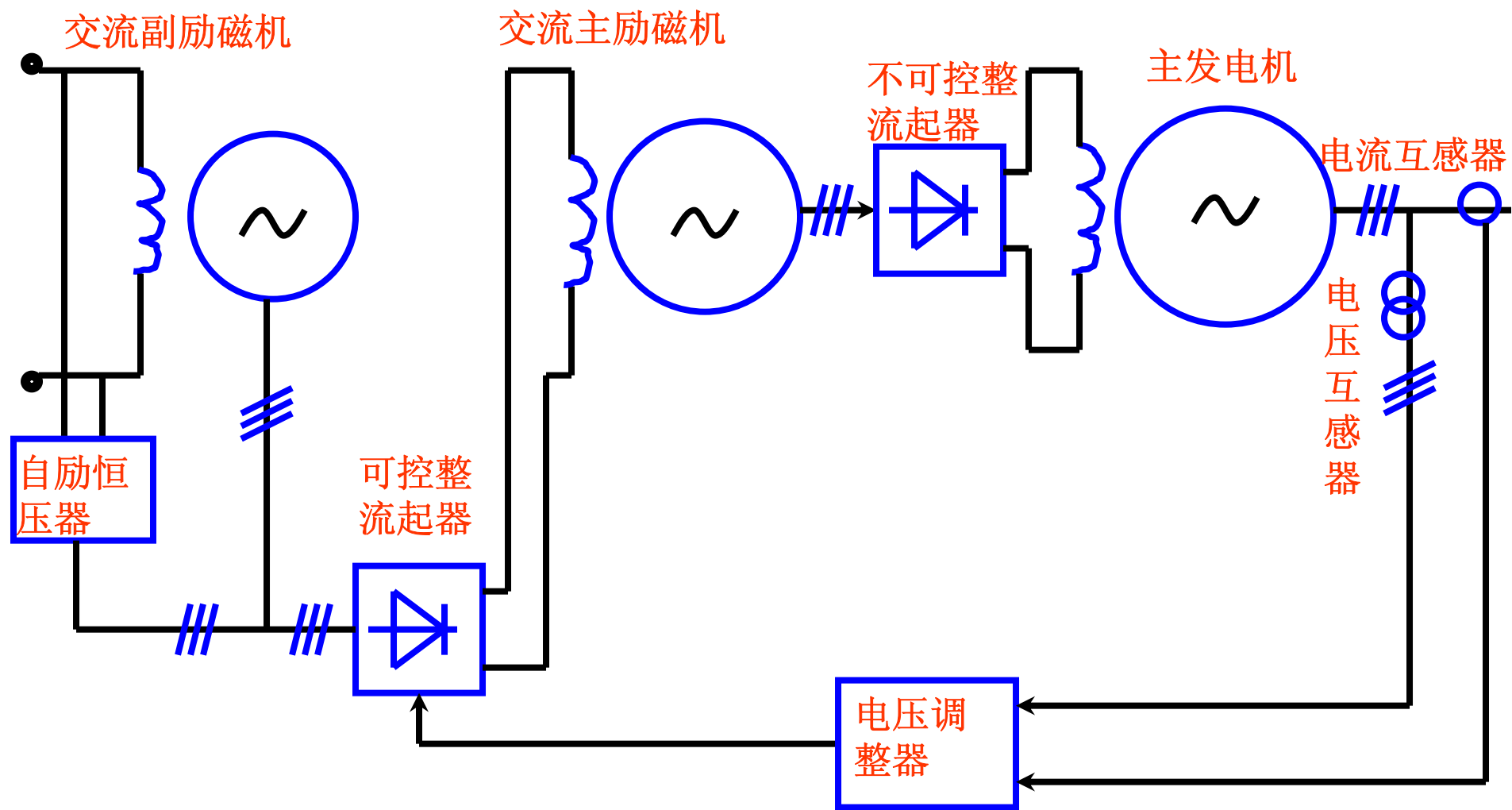
补充题:

一台 $P_N = 25000kW$, $U_N = 10.5kV$, $\cos \varphi = 0.8$ 滞后, Y接法, 同步电抗 $X_s^* = 2.13$, $R_a^* \approx 0$ 的气轮发电机, 试求:(1)额定负载下发电机的 E_0, δ, ψ_0
(2)因为线路故障, 使发电机端电压下降 20%, 为保持其静态过载能力不变, 应如何处理

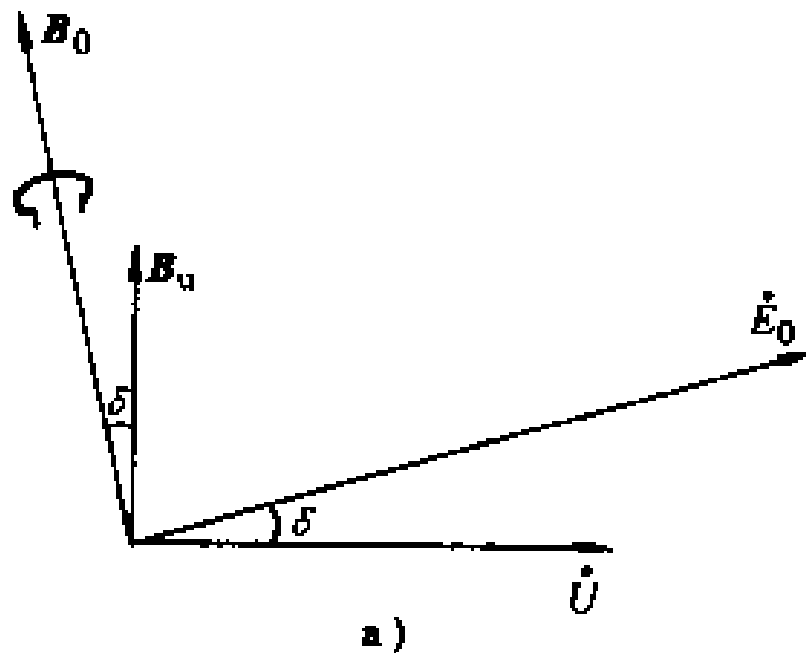
带副励磁机的励磁系统



静止整流器励磁系统



功率角的时、空间含义



与电枢合成磁场对应的磁极系统

