

第十三章 同步发电机的基本电磁关系

13-1 同步发电机的空载运行

13-2 对称负载时的电枢反应

13-3 隐极同步发电机的电动势方程式和相量图

13-4 凸极同步发电机的双反应理论及电动势相量图

小结

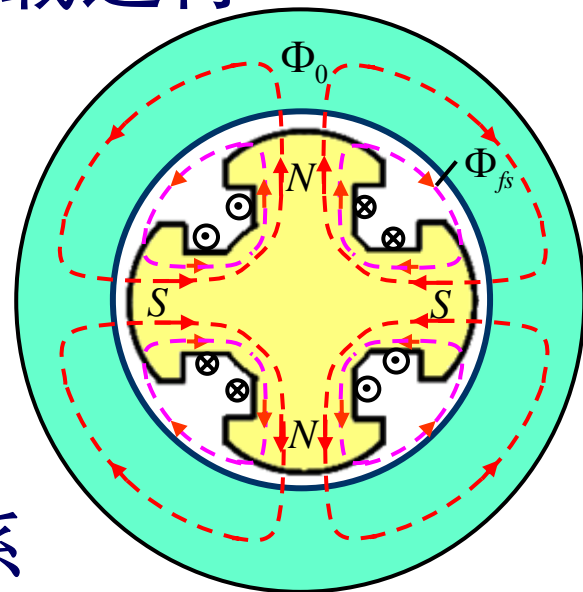
第十三章 同步发电机的基本电磁关系

■基本要求:

- 1.了解同步发电机空载运行时的电磁关系，掌握空载运行时的时空相矢量图
- 2.掌握同步发电机对称负载时的电枢反应
- 3.了解同步发电机各种电抗的物理意义
- 3.掌握隐极同步发电机的电动势方程式和电动势相量图
- 4.掌握凸极同步发电机的电动势方程式和电动势相量图

13-1 同步发电机的空载运行

■ **同步发电机的空载运行：**同步发电机被原动机拖动至同步转速，励磁绕组中通以直流励磁电流，电枢绕组开路时的运行状态。



1. 同步发电机空载运行时的电磁关系

$$i_f \longrightarrow F_\delta = F_f \longrightarrow \begin{cases} \Phi_0 \longrightarrow \text{三相对称空载电动势} \\ \dot{E}_{0A}, \dot{E}_{0B}, \dot{E}_{0C} \\ \Phi_{fs} \end{cases}$$

基波电动势： $E_0 = 4.44fN_1k_{dp1}\Phi_0$

2. 基波励磁磁动势

1) 凸极同步电机的励磁磁动势

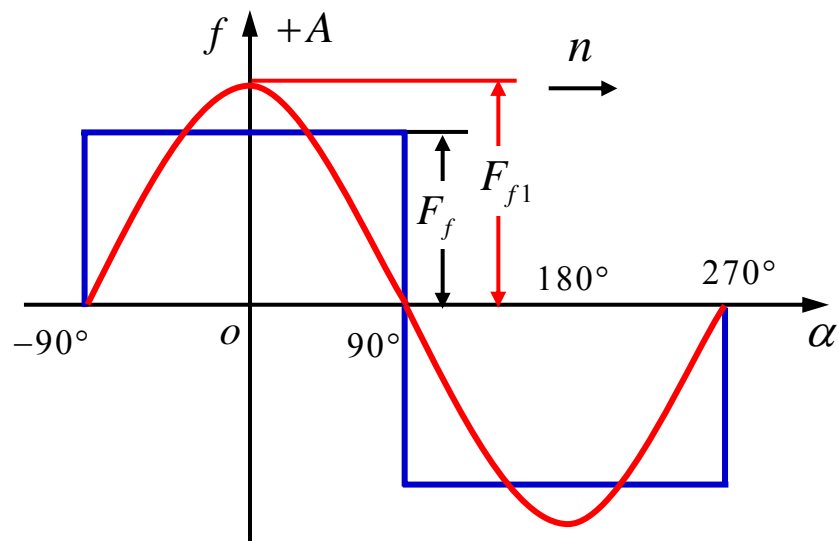
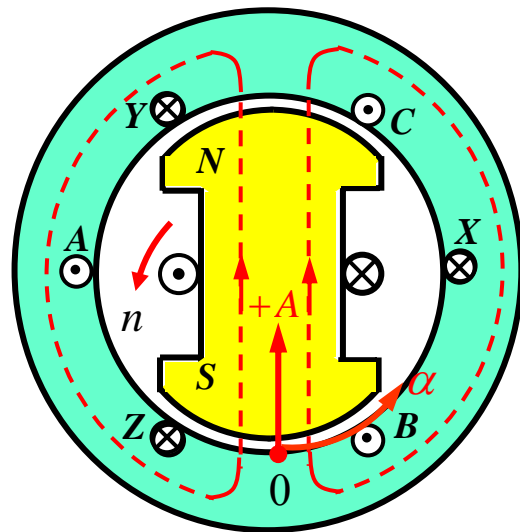
励磁磁动势的幅值 $F_f = \frac{1}{2} N_f i_f$

励磁磁动势的基波幅值

$$F_{f1} = k_f F_f$$

式中, $k_f = \frac{F_{f1}}{F_f}$ 为励磁磁动势的
波形因数。

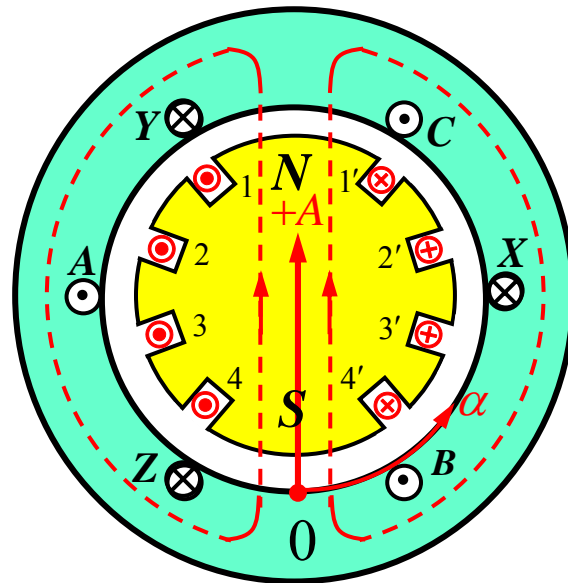
对于凸极同步电机, $k_f = \frac{4}{\pi}$ 。



2) 隐极电机的励磁磁动势

$$F_f = \frac{1}{2} N_f i_f$$

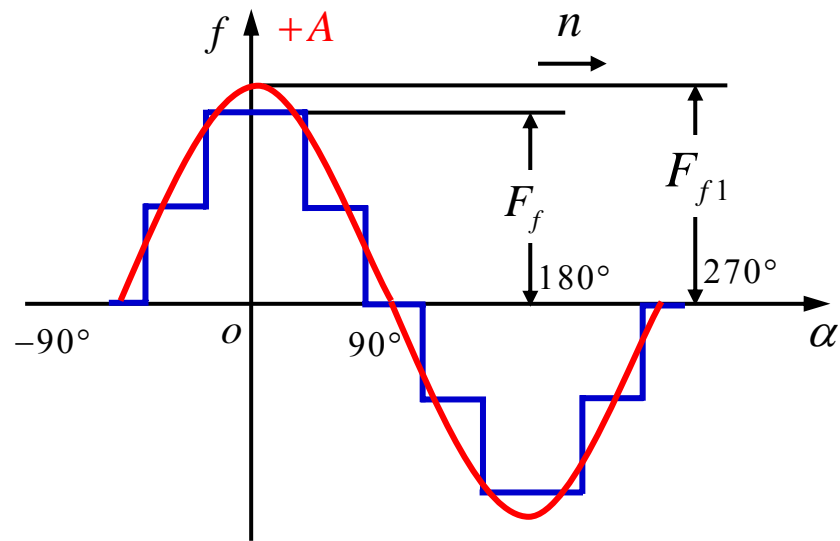
$$F_{f1} = k_f F_f$$



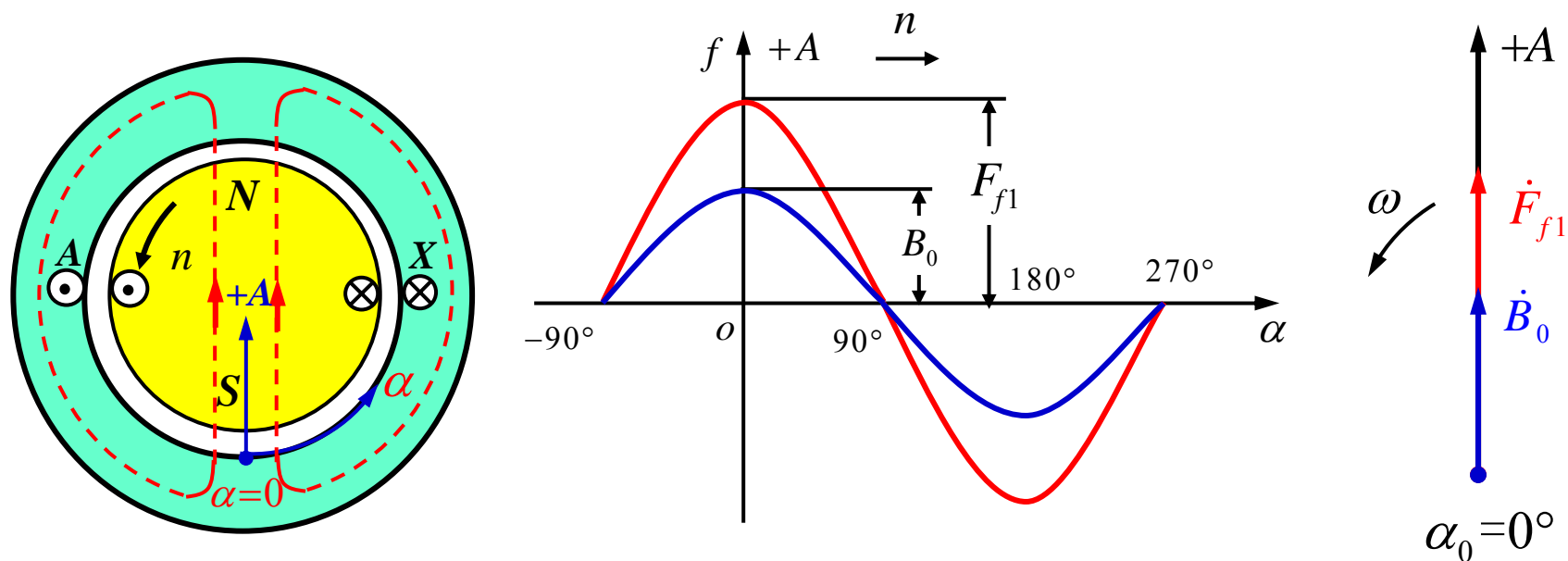
通过实际总槽数 Q_2 与沿转子表面开的等距槽的总槽数 Q_2' 的比值 γ 可查表得 k_f 。

$\gamma=0.75$ 时， $k_f=1$ 。

一般取 $\gamma=0.67\sim 0.8$ 。



3.基波励磁磁动势空间矢量

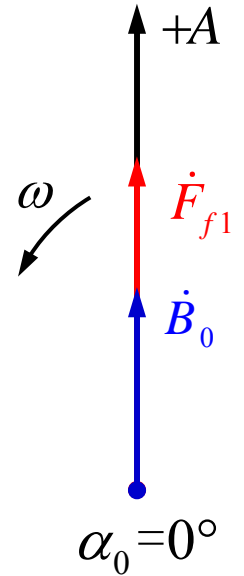
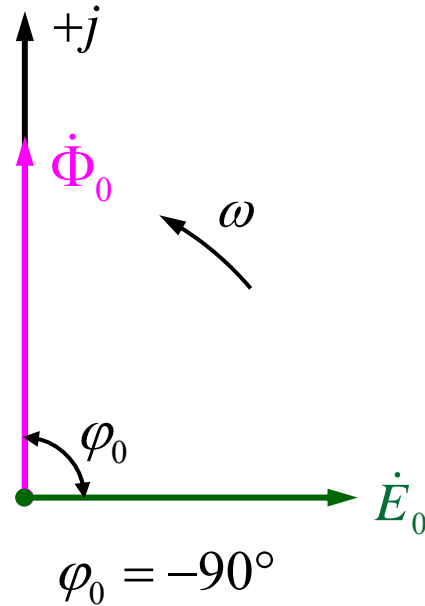
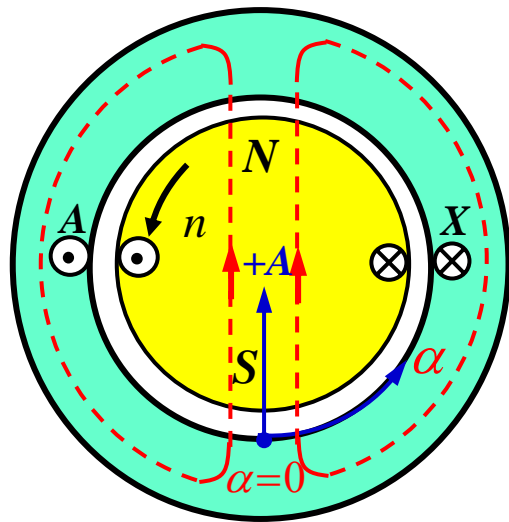


空间参考轴选在定子A相绕组轴线+A处，该处为 $\alpha=0$ 。

4.基波气隙磁通密度空间矢量

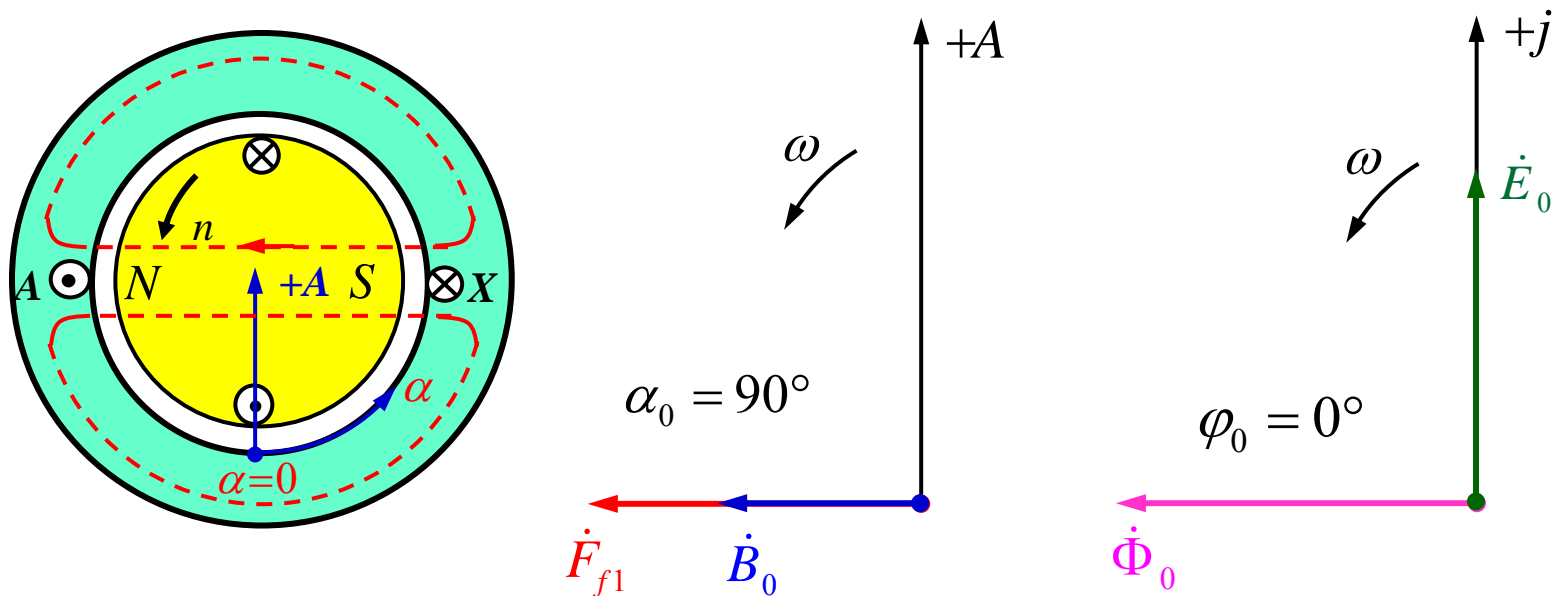
不计磁滞涡流效应，当铁心不饱和时，基波气隙磁通密度 b_{01} 和基波磁动势 F_{f1} 同相位。

5. 定子绕组一相基波感应电动势时间相量



基波气隙磁通密度 \dot{B}_0 随转子一起旋转，与定子任意一相绕组相交链的磁通量随时间按正弦变化，可用时间相量 $\dot{\Phi}_0$ 表示。

$\dot{\Phi}_0$ 在定子该相绕组中感应出的电动势随时间按正弦变化，可用时间相量 \dot{E}_0 表示。



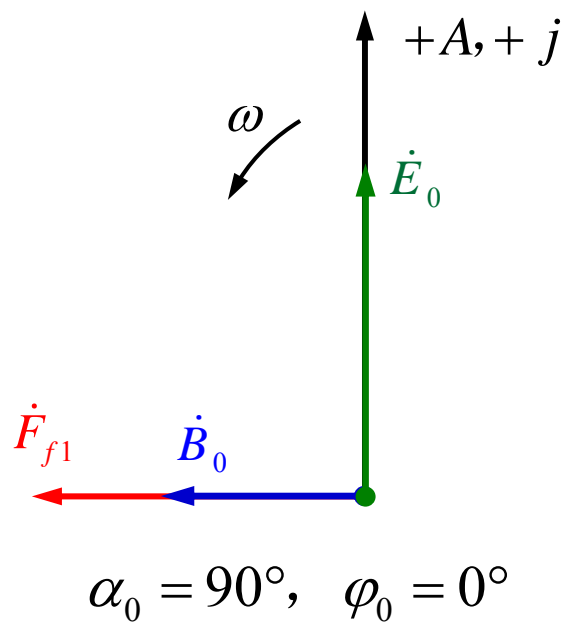
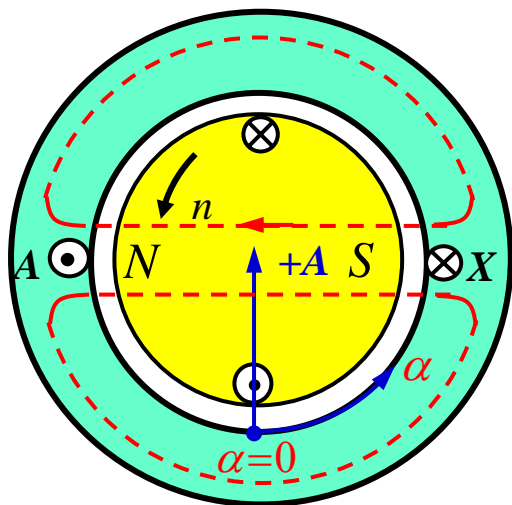
\dot{F}_{f1} 及 \dot{B}_0 在空间参考轴 $+A$ 上的相角 α_0 与 \dot{E}_0 在时间参考轴 $+j$ 上的相角 φ_0 之间的关系:

$$\varphi_0 = \alpha_0 - 90^\circ$$

- **时间相量:** 绕组的基波感应电动势、电压和电流, 交链的基波磁通量
- **空间矢量:** 基波磁动势和基波磁通密度

6.时空相-矢量图

将空间矢量参考轴+A与时间相量参考+j重合在一起，即构成时空相-矢量图。



注意：在时空相-矢量图中，时间相量 \dot{E}_0 滞后空间矢量 \dot{F}_{f1} (\dot{B}_0) 90° 电角度。

7.空载特性

$$i_f \rightarrow F_f \rightarrow B_0 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow E_0$$

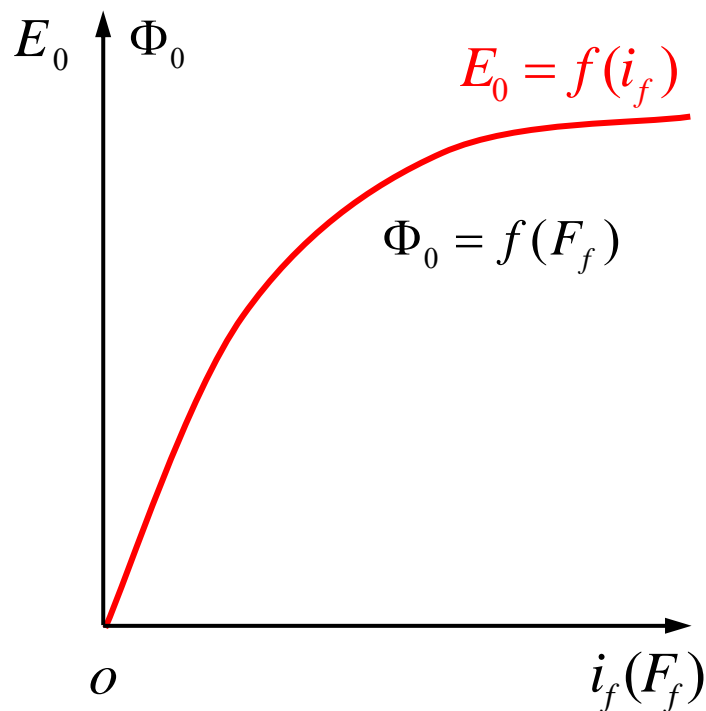
空载特性：同步发电机转速恒为 n_1 时，空载电动势 E_0 与励磁电流 i_f 之间的关系 $E_0 = f(i_f)$ 。

$$E_0 = 4.44 f N_1 k_{d p 1} \Phi_0$$

$$E_0 \propto \Phi_0 \quad i_f \propto F_f$$

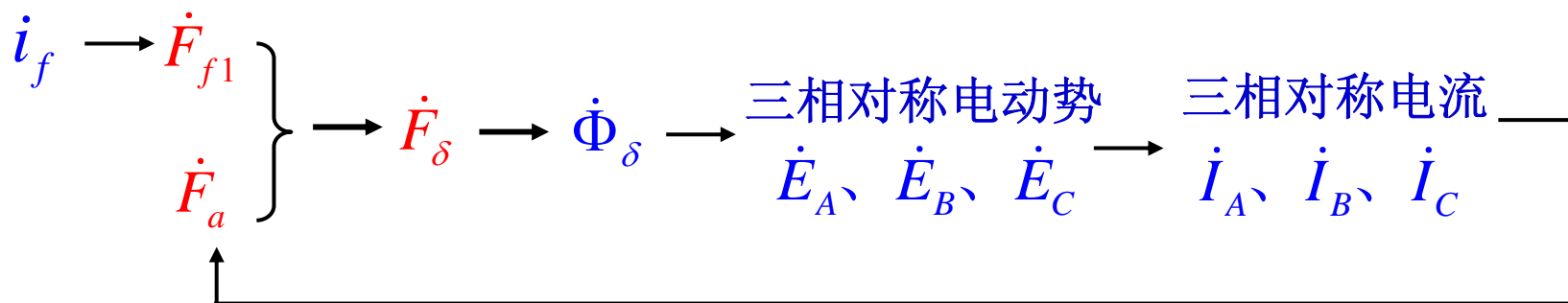
→ $E_0 = f(i_f)$ 与 $\Phi_0 = f(F_f)$
曲线相似（成比例）

$\Phi_0 = f(F_f)$ 为电机的磁化曲线



13-2 对称负载时的电枢反应

1. 电枢反应的定义



电枢反应：电枢磁动势对励磁磁动势的影响。

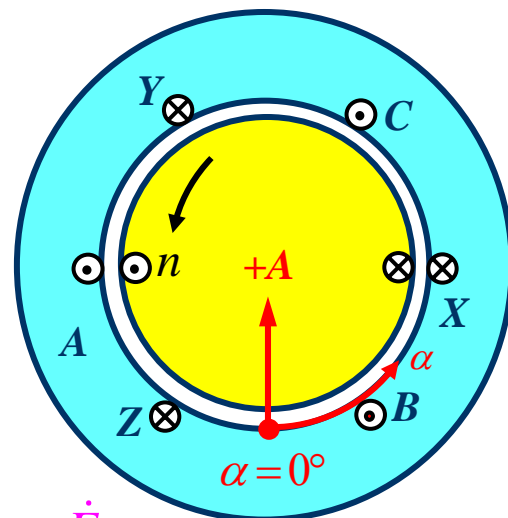
2. 磁动势分析

1) 基波励磁磁动势

• 性质：圆形旋转磁动势

• 幅值： $F_{f1} = k_f F_f$ $F_f = \frac{1}{2} N_f i_f$

- 转速：与转子转速相同
- 转向：与转子转向一致
- 极对数：和转子极对数 p 相同



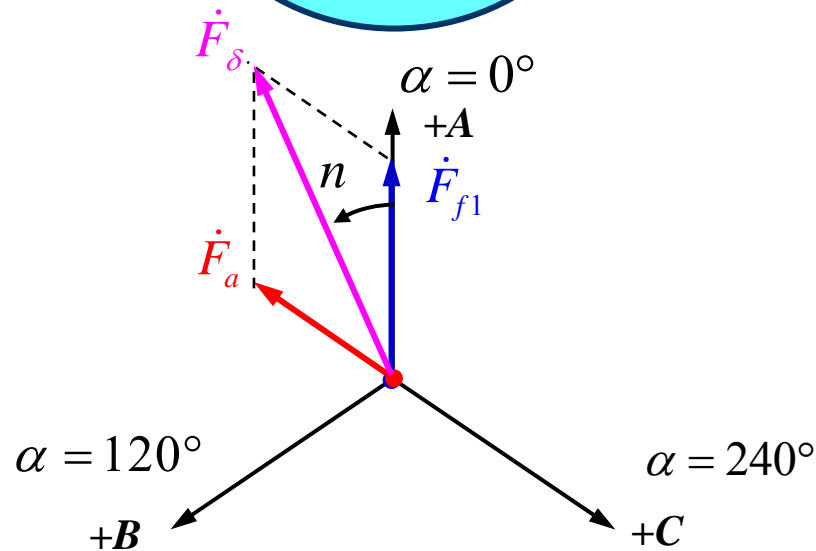
2) 基波电枢磁动势

- 性质：圆形旋转磁动势

- 幅值：
$$F_a = 1.35 \frac{N_1 I_1}{p} k_{dp1}$$

- 转速：
$$n_1 = \frac{60 f}{p} = \frac{60}{p} \cdot \frac{pn}{60} = n$$

- 转向：与转子转向一致



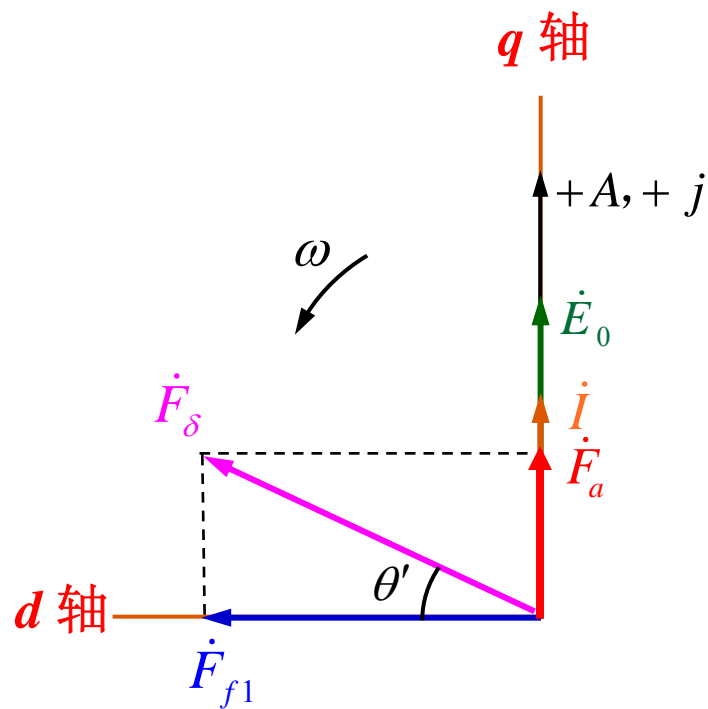
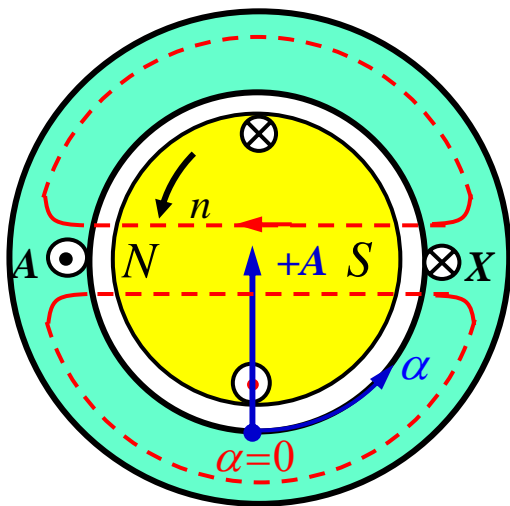
结论：基波电枢磁动势和基波励磁磁动势转向、转速、极对数都相同，两者在空间相对静止。

3.对称负载时的电枢反应

电枢反应的性质取决于励磁电动势 \dot{E}_0 和负载电流 i 之间的夹角，即内功率因数角 ψ 。

假设 $\omega t = 0$ 时， $\alpha_0 = 90^\circ$ 。

1) $\psi = 0^\circ$ 时的情况



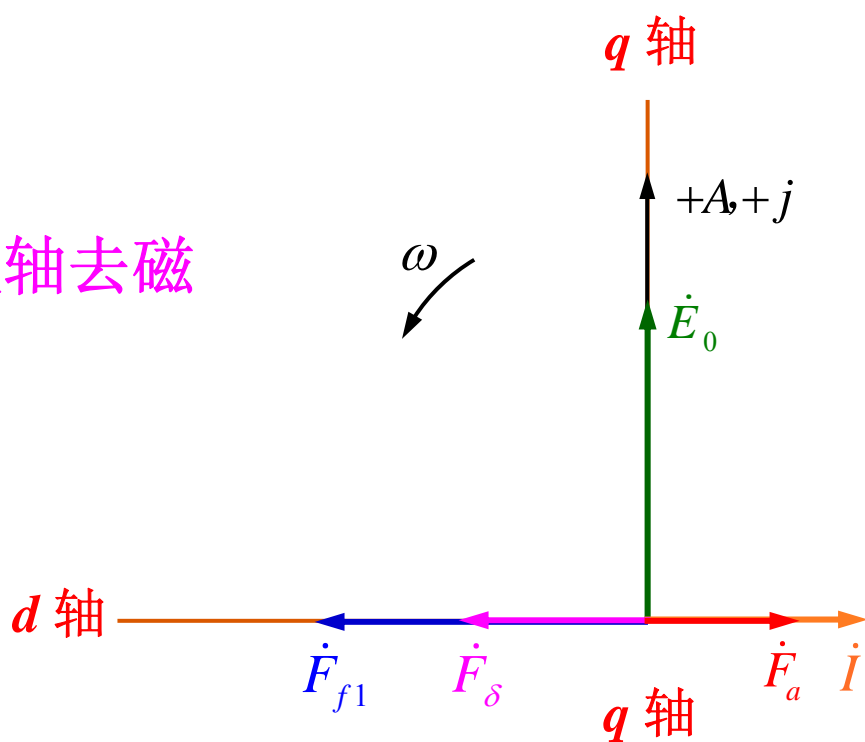
基波合成磁动势 $\dot{F}_\delta = \dot{F}_{f1} + \dot{F}_a$

\dot{F}_a 滞后于 \dot{F}_{f1} 90° ，为交轴电枢反应。

2) $\psi = 90^\circ$ 时的情况

\dot{F}_a 与 \dot{F}_{f1} 相位相反, 为直轴去磁电枢反应。

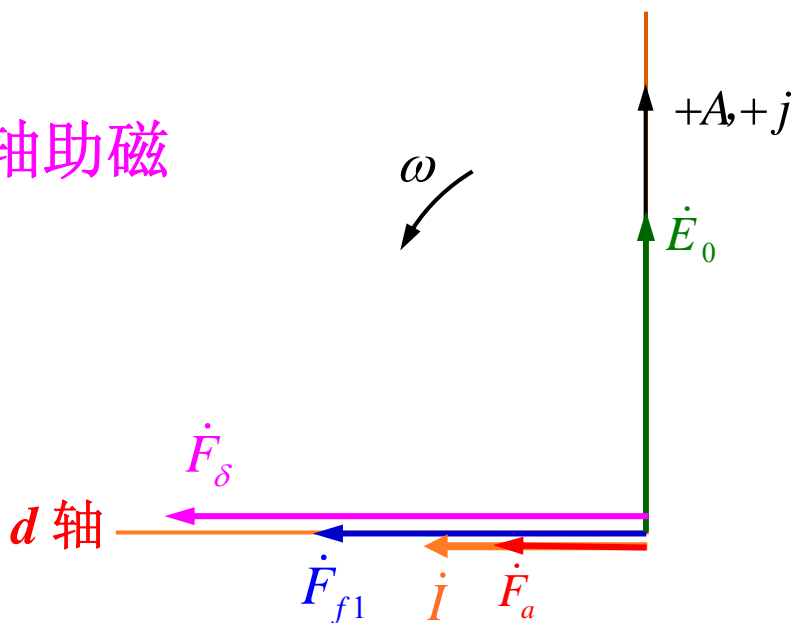
$$F_\delta = F_{f1} - F_a \quad \theta' = 0$$



3) $\psi = -90^\circ$ 时的情况

\dot{F}_a 与 \dot{F}_{f1} 相位相同, 为直轴助磁电枢反应。

$$F_\delta = F_{f1} + F_a \quad \theta' = 0$$



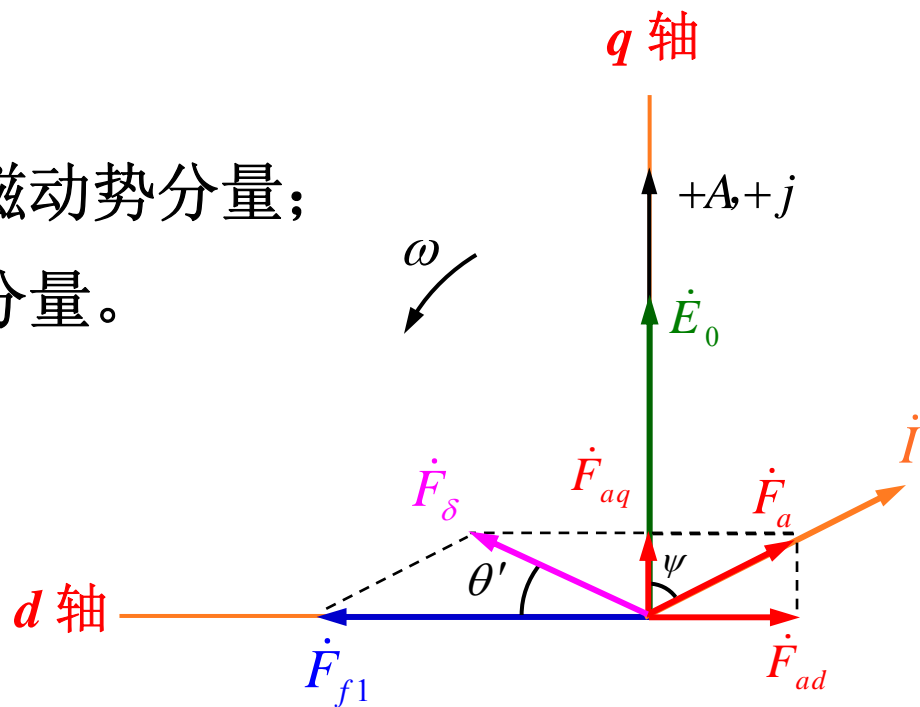
4) $\psi = \text{任意角}$ 时的情况

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

式中, \dot{F}_{ad} 为直轴电枢反应磁动势分量;

\dot{F}_{aq} 为交轴电枢反应磁动势分量。

$$\begin{cases} F_{ad} = F_a \sin \psi \\ F_{aq} = F_a \cos \psi \end{cases}$$



$0^\circ < \psi < 90^\circ$ 时电枢反应的性质:

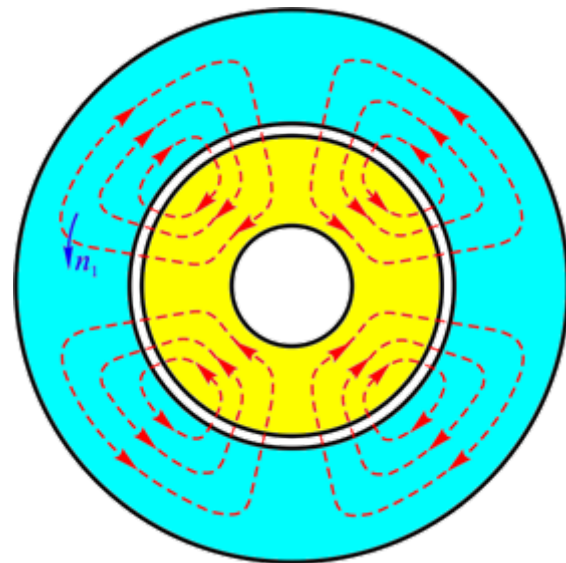
既有交轴电枢反应, 又有直轴去磁电枢反应。

13-3 隐极同步发电机的电动势方程式和相量图

1. 交流电机主磁通、漏磁通和漏电抗

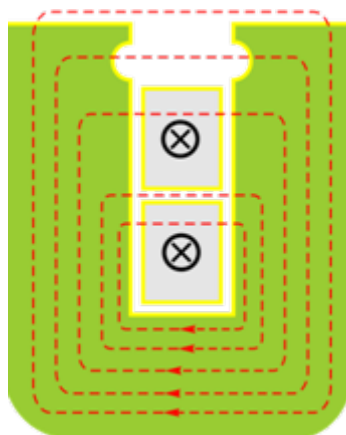
1) 主磁通

由基波旋转磁动势产生的穿过气隙与定、转子绕组同时交链的基波磁通。

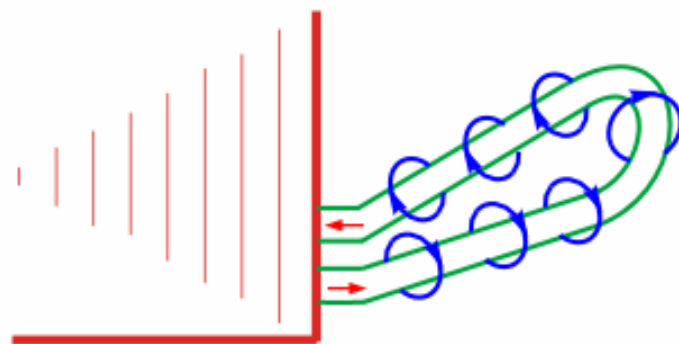


2) 定子漏磁通

- 槽漏磁通
- 端部漏磁通
- 谐波漏磁通



槽漏磁通



端部漏磁通

谐波漏磁通： 定子谐波合成磁动势产生的谐波气隙磁通。

$$\left. \begin{array}{l} p_v = vp \\ n_v = \frac{n_1}{v} \end{array} \right\} \rightarrow f_v = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{pn_1}{60} = f_1$$

谐波漏磁通=气隙总磁通-气隙基波磁通，又称为差漏磁通。

3) 定子漏电抗 $I \rightarrow \dot{\Phi}_s \rightarrow \dot{E}_s$

$$\dot{E}_s = -j4.44 f N_1 k_{dp1} \dot{\Phi}_s \quad E_s \propto \Phi_s \propto I$$

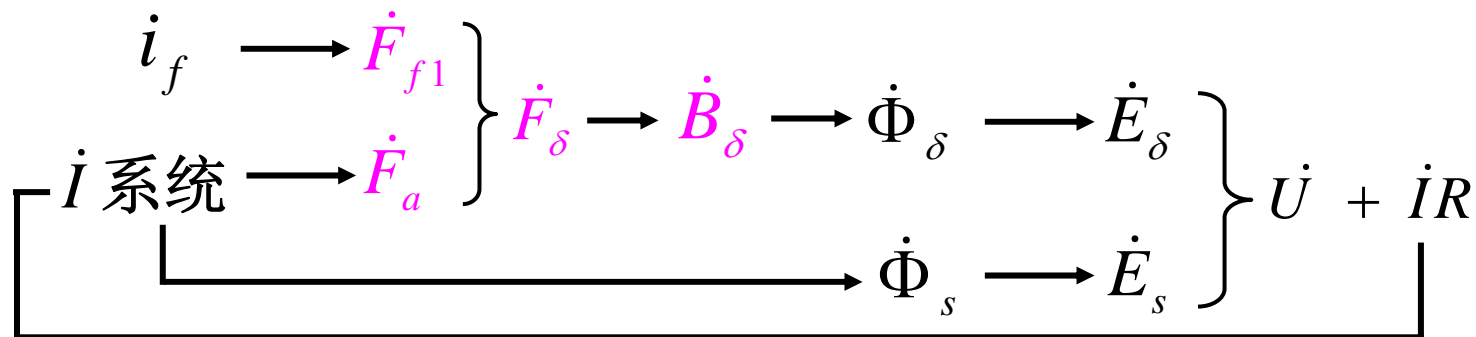
漏电动势可以用负漏抗压降来表示，即

$$\dot{E}_s = -jIX_s$$

式中， X_s 一定子绕组的每相漏电抗。

2. 负载时定子绕组的一相电压方程式

1) 电磁关系

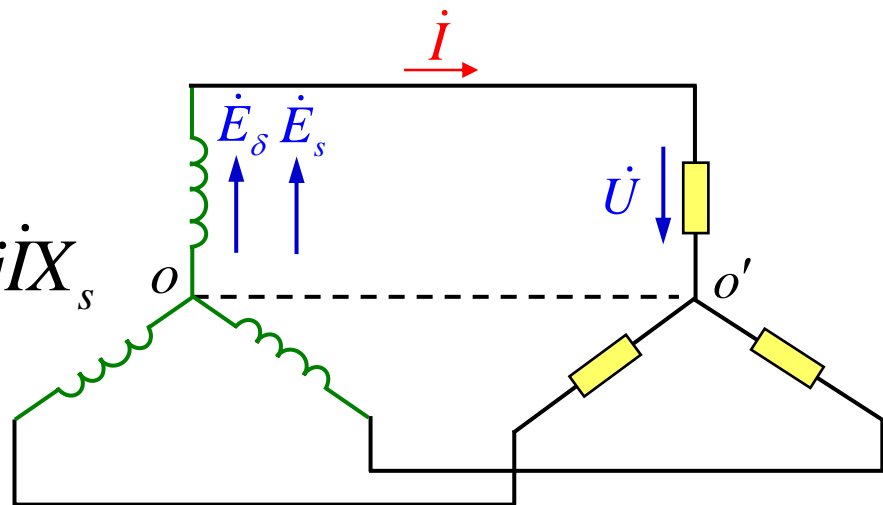


2) 电压方程式

$$\dot{E}_\delta + \dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I}R$$

$$\dot{U} = \dot{E}_\delta + \dot{E}_s - \dot{I}R = \dot{E}_\delta - \dot{I}R - j\dot{I}X_s$$

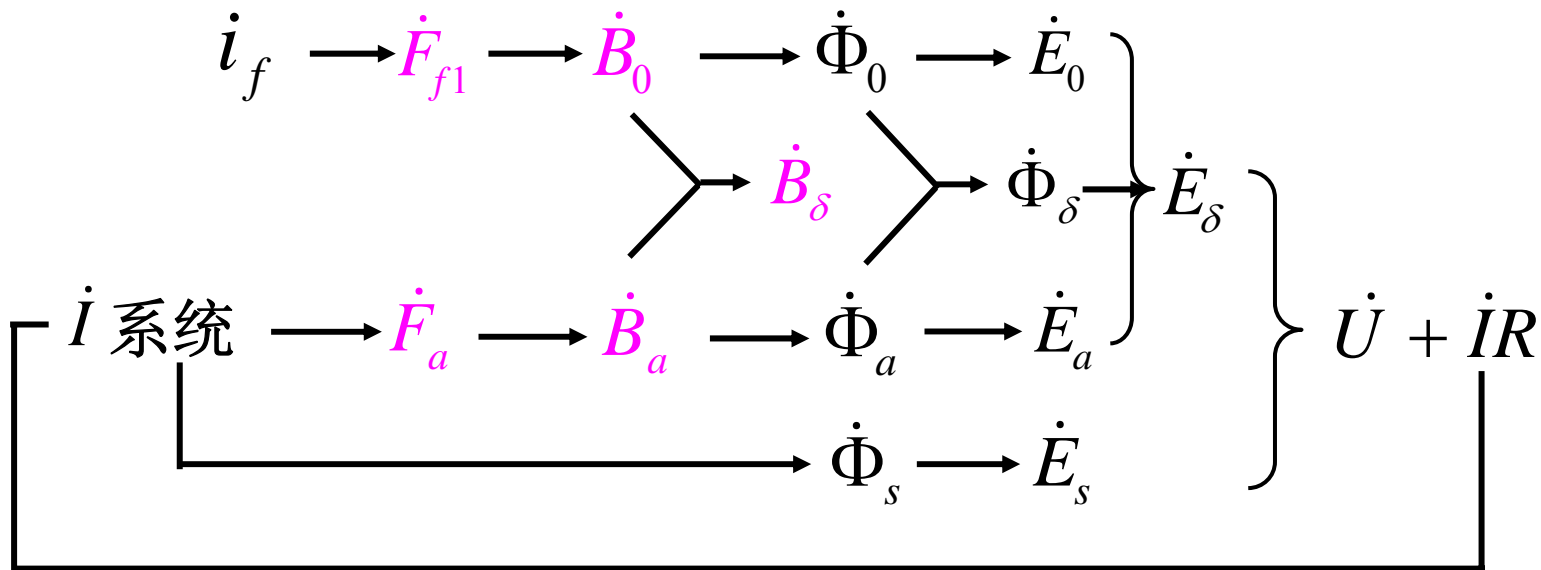
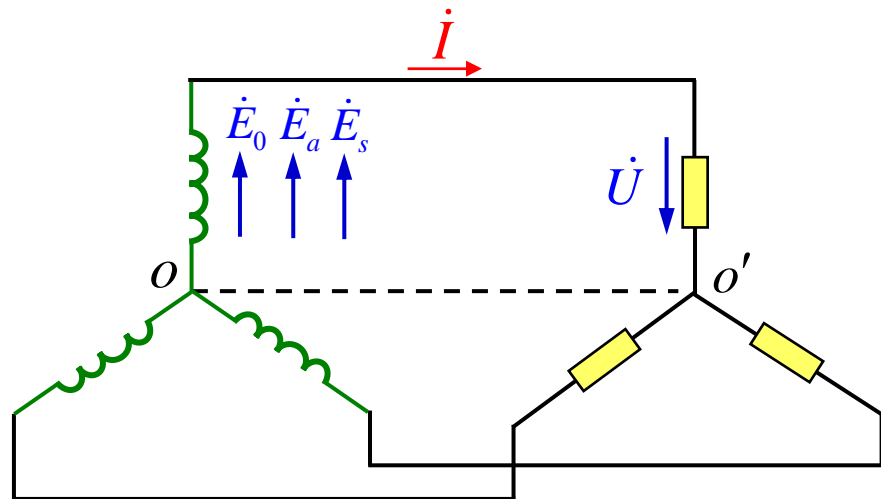
$$= \dot{E}_\delta - \dot{I}Z_s$$



式中， $Z_s = R + jX_s$ 为每相漏阻抗。

3. 不考虑磁路饱和，隐极机的电动势相量图

1) 电磁关系



2) 电枢反应电抗

$$\left. \begin{array}{l} \dot{E}_a = -j4.44 f N_1 k_{dp1} \dot{\Phi}_a, \quad E_a \propto \Phi_a \\ \text{不考虑磁路饱和时,} \quad \Phi_a \propto F_a \propto I \end{array} \right\} \rightarrow E_a \propto I$$

忽略定子铁耗， \dot{E}_a 滞后于 i 90° 电角度，于是 \dot{E}_a 可以写成负电抗压降的形式，即

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

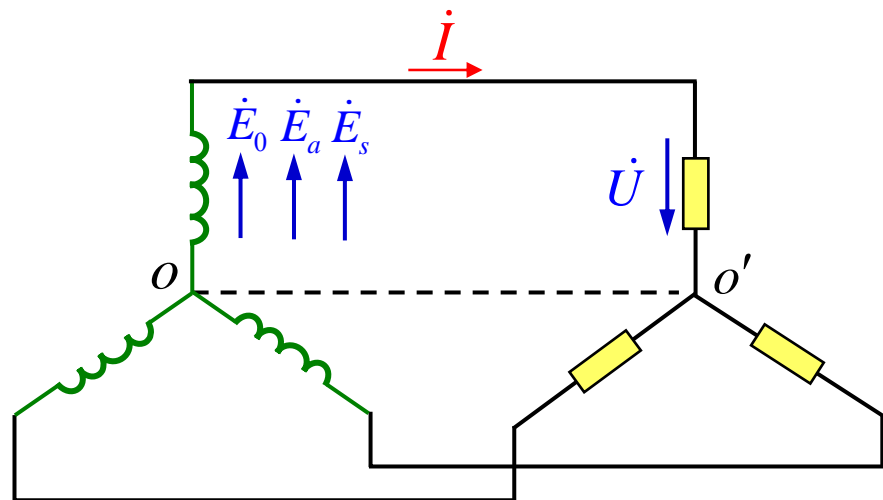
式中， X_a 称为电枢反应电抗。

■ **电枢反应电抗 X_a 的物理意义**：对称负载下三相单位电枢电流联合产生的 **电枢反应磁通** 在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

3) 电动势方程式

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I}R$$

$$\dot{E}_s = -j\dot{I}X_s \quad \dot{E}_a = -j\dot{I}X_a$$



隐极同步发电机的电动势方程式为

$$\dot{E}_0 = -\dot{E}_a - \dot{E}_s + \dot{U} + \dot{I}R = j\dot{I}X_a + j\dot{I}X_s + \dot{U} + \dot{I}R$$

$$= j\dot{I}(X_a + X_s) + \dot{U} + \dot{I}R = j\dot{I}X_c + \dot{U} + \dot{I}R$$

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

式中， $X_c = X_a + X_s$ 为隐极同步电机每相绕组的同步电抗；

$Z_c = R + jX_c$ 为隐极同步电机每相绕组的同步阻抗。

■同步电抗 X_c 的物理意义：对称负载下三相单位电枢电流联合产生的电枢总磁通（电枢反应磁通和电枢漏磁通）在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

4) 电动势相量图

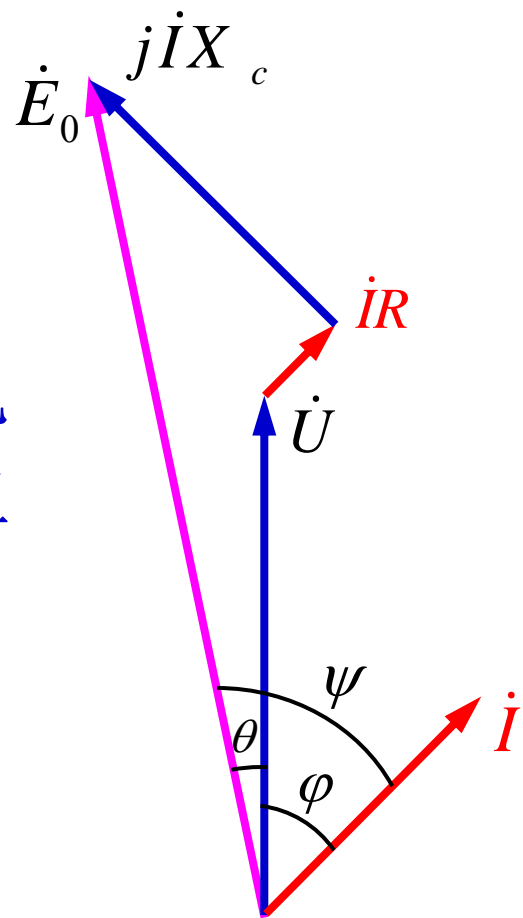
$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{U} + \dot{I}Z_c$$

已知：隐极同步发电机的端电压 U ，电枢电流 I ，负载的功率因数 $\cos\varphi$ 及同步阻抗 $Z_c=R+jX_c$ ，画电动势相量图求 \dot{E}_0 。

φ ：功率因数角， \dot{U} 和 \dot{I} 之间的夹角；

θ ：功率角， \dot{E}_0 和 \dot{U} 之间的夹角；

内功率因数角 $\psi = \varphi + \theta$



E_0 和 ψ 的解析算法:

$$\overline{oe} = U \cos \varphi + IR \quad \overline{ce} = U \sin \varphi + IX_c$$

$$\psi = \arctan \frac{\overline{ce}}{\overline{oe}} = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_c}{U \cos \varphi + IR}$$

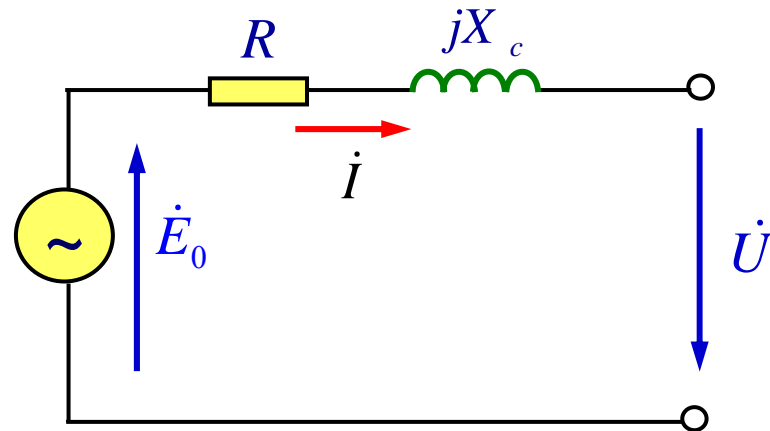
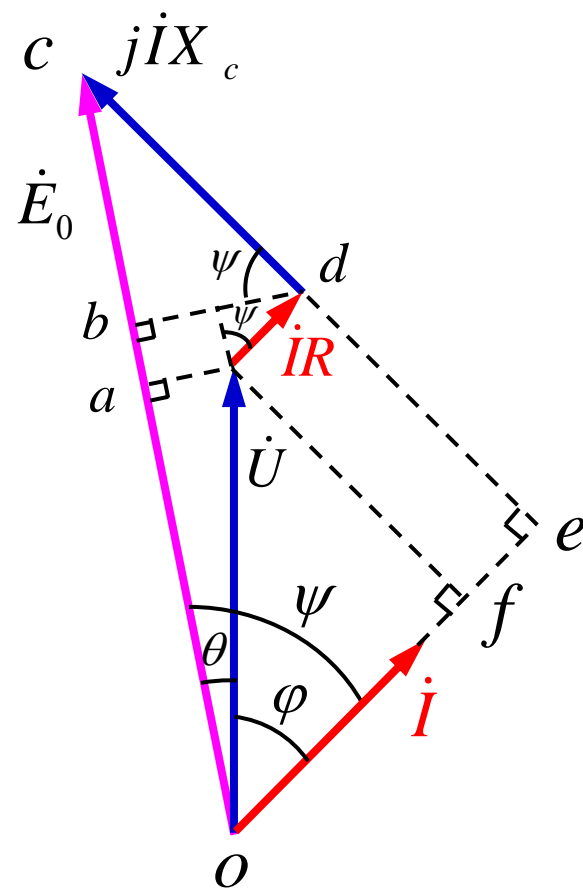
$$E_0 = \sqrt{(U \cos \varphi + IR)^2 + (U \sin \varphi + IX_c)^2}$$

$$\theta = \psi - \varphi$$

$$E_0 = \overline{oa} + \overline{ab} + \overline{bc}$$

$$= U \cos \theta + IR \cos \psi + IX_c \sin \psi$$

5) 等效电路



例13-1 一台三相汽轮发电机， $S_N=2500\text{kVA}$ ， $U_N=6.3\text{kV}$ ，星形联结，每相同步电抗 $X_c=10.4\Omega$ ，电枢电阻 $R=0.071\Omega$ ，求该发电机带 $\cos\varphi=0.8$ （滞后）的额定负载时的空载电动势 E_0 、功率角 θ 及电压调整率 ΔU 。

解：可以利用电动势方程式或电动势相量图求解。

$$U_{N\phi} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637(\text{V})$$

$$I_{N\phi} = I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 6.3} = 229.1(\text{A})$$

$$\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

1.利用电动势方程式求解

$$X_c=10.4\Omega, \quad R=0.071\Omega$$

设 $\dot{U} = 3637\angle 0^\circ\text{V}$, 则 $\dot{I} = 229.1\angle -36.87^\circ\text{A}$,

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_c \\ &= 3637\angle 0^\circ + 229.1\angle -36.87^\circ \times (0.071 + j10.4) \\ &= 3637\angle 0^\circ + 2382.64\angle 52.74^\circ = 5422\angle 20.47^\circ(\text{V})\end{aligned}$$

$$E_0 = 5422\text{V}$$

$$\theta = 20.47^\circ$$

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\% = \frac{5422 - 3637}{3637} \times 100\% = 49\%$$

2.利用电动势相量图的几何关系求解 $X_c=10.4\Omega$, $R=0.071\Omega$

$$\psi = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_c}{U \cos \varphi + IR}$$

$$= \arctan \frac{3637 \times \sqrt{1 - 0.8^2} + 229.1 \times 10.4}{3637 \times 0.8 + 229.1 \times 0.071} = 57.34^\circ$$

$$\theta = \psi - \varphi = 57.34^\circ - 36.87^\circ = 20.47^\circ$$

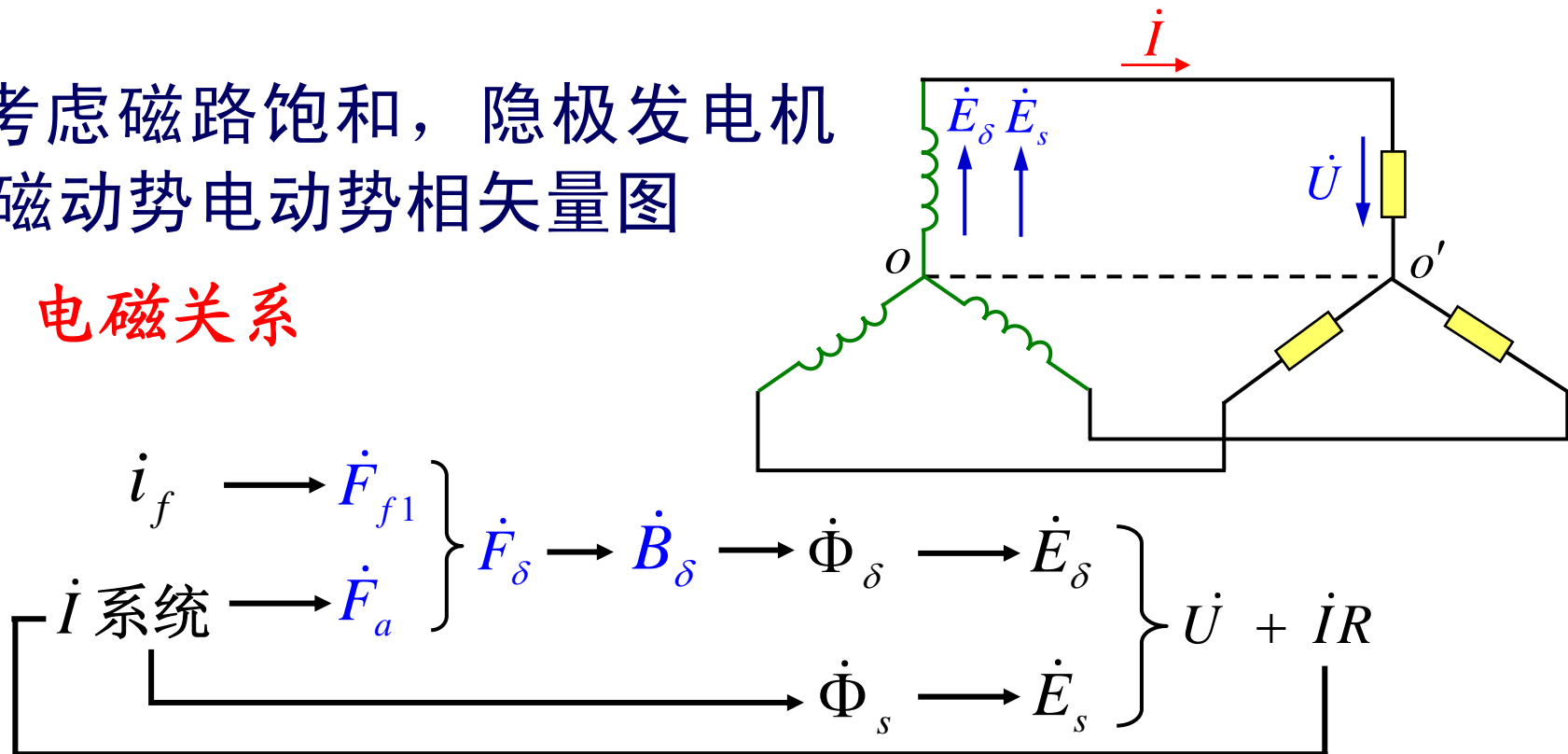
$$E_0 = \sqrt{(U \sin \varphi + IX_c)^2 + (U \cos \varphi + IR)^2}$$

$$= \sqrt{(3637 \times \sqrt{1 - 0.8^2} + 229.1 \times 10.4)^2 + (3637 \times 0.8 + 229.1 \times 0.071)^2}$$

$$= 5422(V)$$

3. 考虑磁路饱和，隐极发电机的磁动势电动势相矢量图

1) 电磁关系



2) 磁动势方程式和电动势方程式

磁动势方程式:
$$\dot{F}_\delta = \dot{F}_{f1} + \dot{F}_a$$

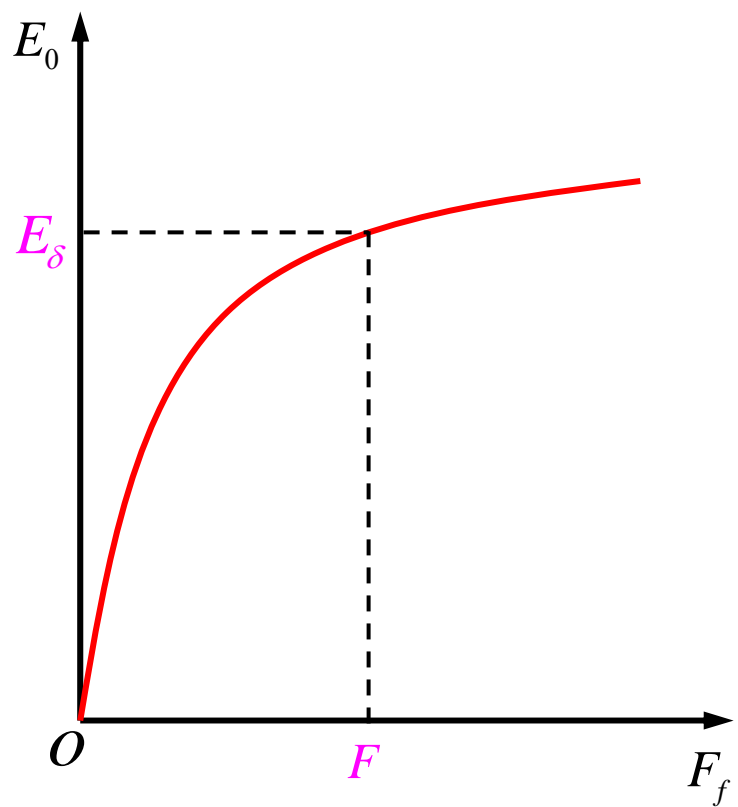
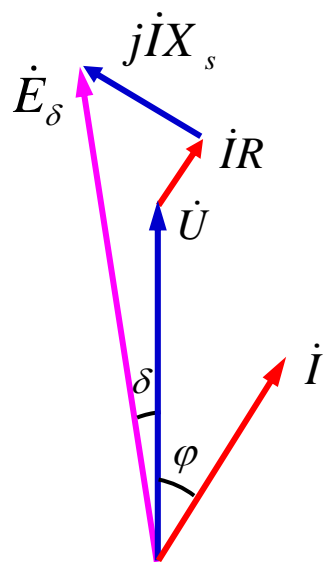
电动势方程式:
$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}Z_s = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_s)$$

3) 磁动势电动势相矢量图

已知：隐极同步发电机负载时的 U 、 I 、 $\cos\varphi$ 及电机参数 R 和 X_s ，求电机励磁磁动势幅值 F_f 及电机空载电动势 E_0 。

①用时空相矢量图求出一相气隙电动势 \dot{E}_δ ；

②利用空载特性求出合成磁动势 F_δ ；



由 E_δ 查空载特性得阶梯波磁动势 F ，折算成基波磁动势 F_δ 。

$$F_\delta = k_f F$$

式中， $k_f = \frac{F_f}{F_{f1}}$ 为励磁磁动势的波形因数。

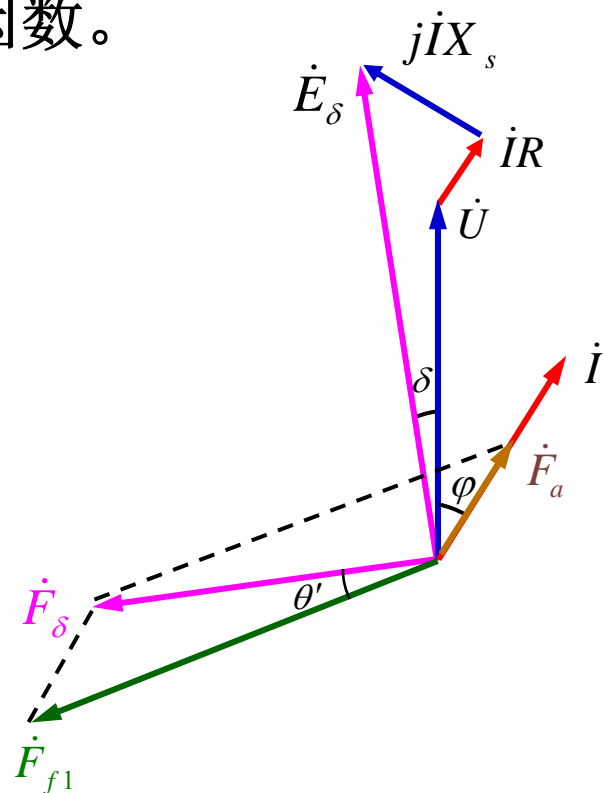
③求电枢反应磁动势 \dot{F}_a

$$F_a = 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$

在时空相矢量图上， \dot{F}_a 与 i 同相位。

④求基波励磁磁动势 \dot{F}_{f1}

$$\dot{F}_{f1} = \dot{F}_\delta - \dot{F}_a$$



⑤求阶梯波励磁磁动势的幅值 F_f

$$F_f = \frac{F_{f1}}{k_f} = k_a F_{f1}$$

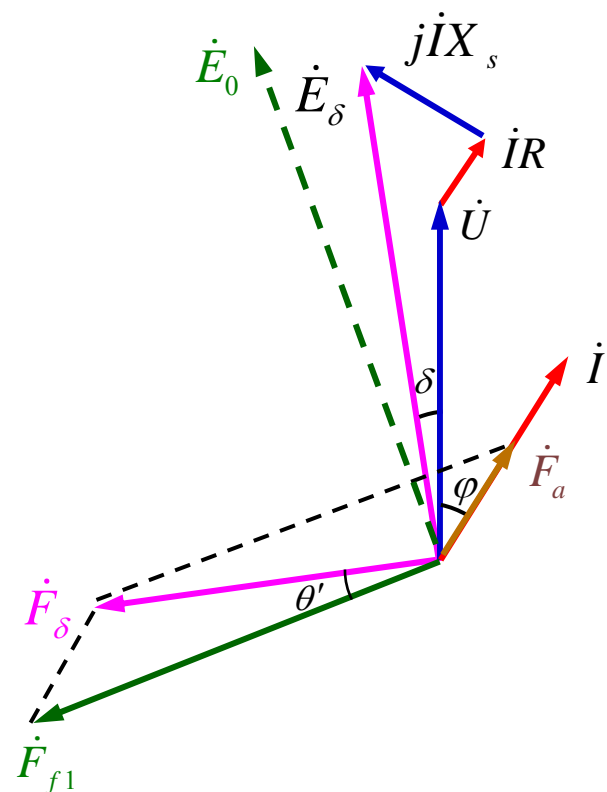
式中， $k_a = \frac{1}{k_f}$ 为电枢反应磁动势的折合因数。

⑥求同步发电机的励磁电动势 \dot{E}_0

⑦求同步发电机的电压调整率 ΔU

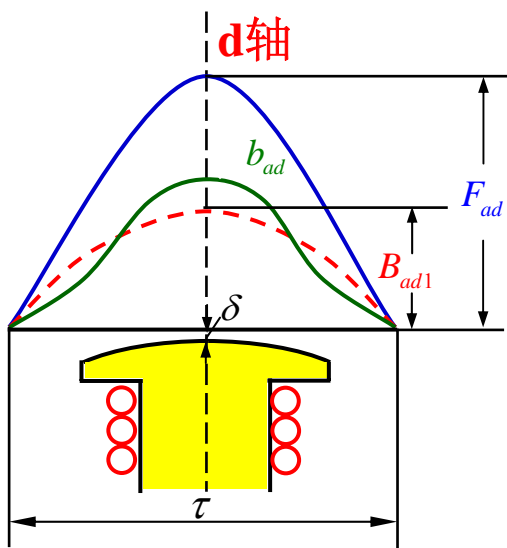
■**电压调整率 ΔU** ：发电机由满载过渡到空载，保持励磁电流不变，电压升高的数值相对于额定电压的比值。

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

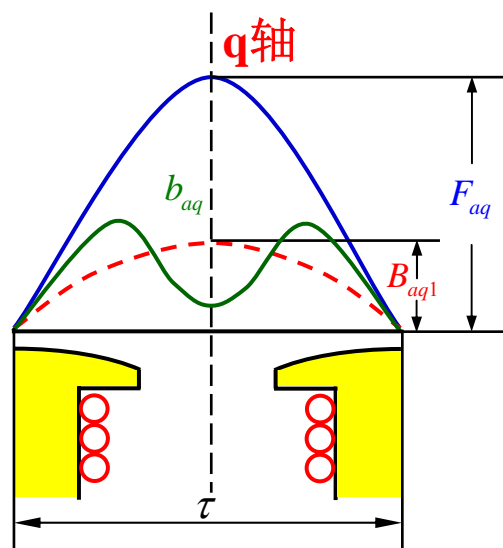


13-4 凸极同步发电机的双反应理论及电动势相量图

凸极同步发电机由于气隙不均匀，电枢反应磁场的分布和强弱不仅与 F_a 的大小有关，还与 ψ 角有关。

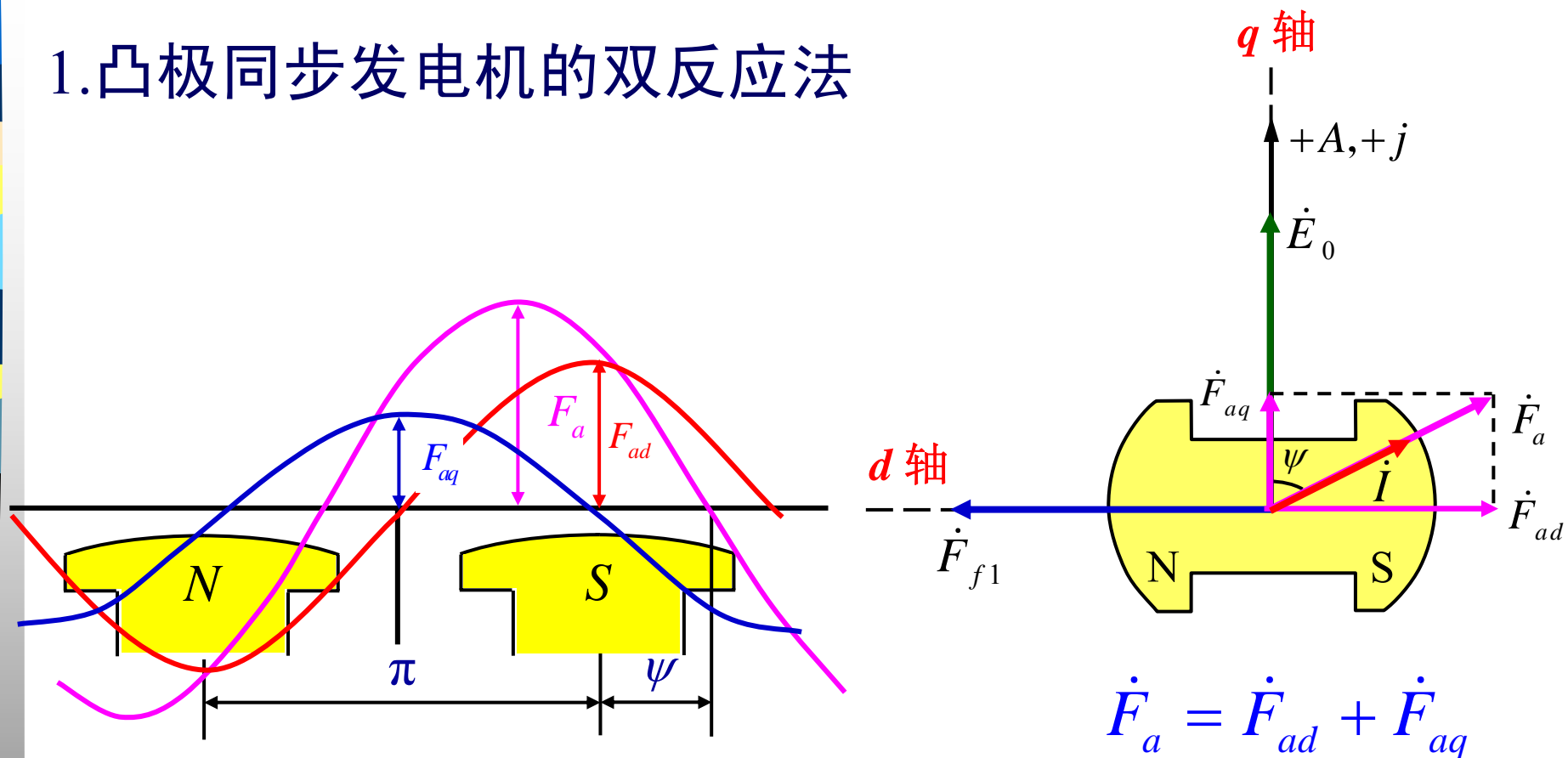


电枢磁动势作用于直轴



电枢磁动势作用于交轴

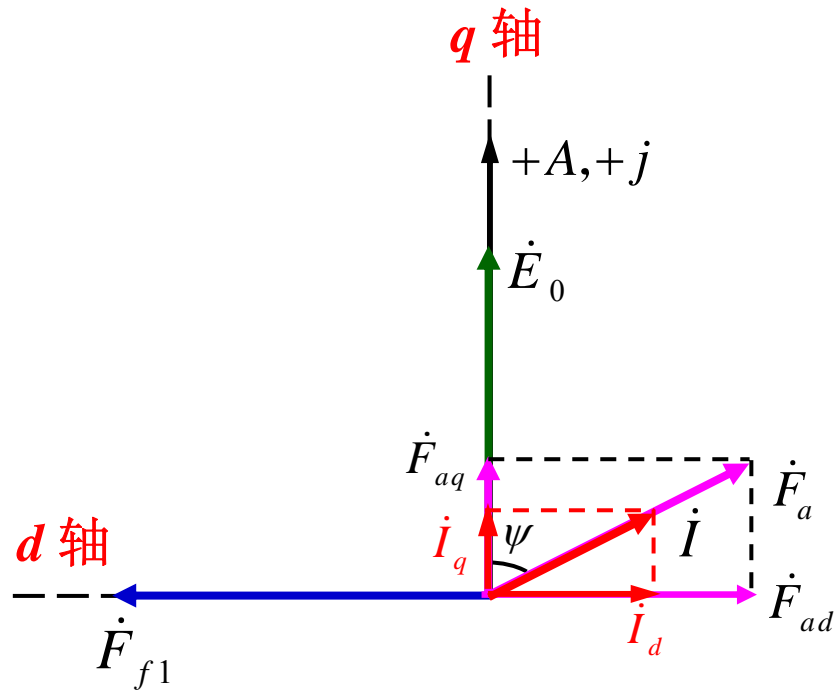
1.凸极同步发电机的双反应法



双反应法：当电枢磁动势 \dot{F}_a 作用于直轴和交轴之间的任意位置时，可将之分解成直轴分量 \dot{F}_{ad} 和交轴分量 \dot{F}_{aq} ，先分别求出交、直轴电枢反应，最后再把它们的效果叠加起来。

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq} \quad \begin{cases} F_{ad} = F_a \sin \psi \\ F_{aq} = F_a \cos \psi \end{cases}$$

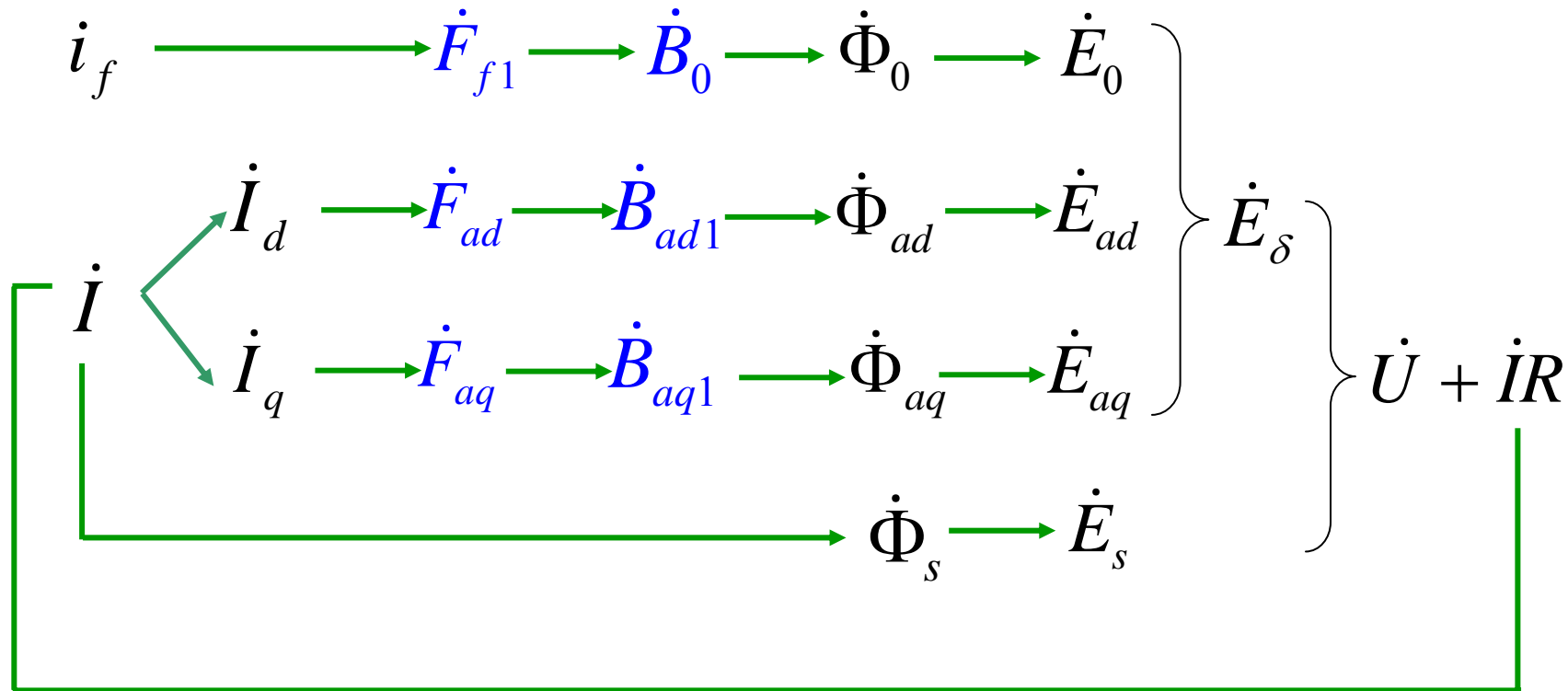
$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad \begin{cases} I_d = I \sin \psi \\ I_q = I \cos \psi \end{cases}$$



$$F_{ad} = F_a \sin \psi = 1.35 \frac{N_1 I \sin \psi}{p} k_{dp1} = 1.35 \frac{N_1 I_d}{p} k_{dp1}$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi = 1.35 \frac{N_1 I \cos \psi}{p} k_{dp1} = 1.35 \frac{N_1 I_q}{p} k_{dp1}$$

不考虑磁路饱和时，凸极同步发电机的电磁关系：



2.凸极同步发电机的电动势方程式

凸极同步发电机的电动势平衡方程式为

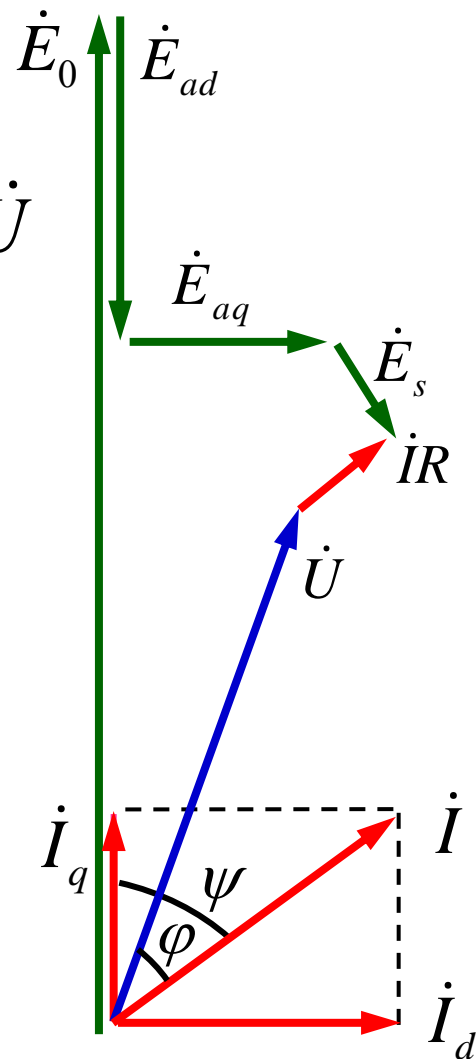
$$\sum \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I}R = \sum \dot{U}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad \begin{cases} I_d = I \sin \psi \\ I_q = I \cos \psi \end{cases}$$

不计磁路的饱和时，有

$$E_{ad} \propto \Phi_{ad} \propto F_{ad} \propto I_d$$

$$E_{aq} \propto \Phi_{aq} \propto F_{aq} \propto I_q$$



电动势相量图

不计定子铁耗时， \dot{E}_{ad} 滞后 \dot{I}_d 90° 电角度， \dot{E}_{aq} 滞后 \dot{I}_q 90° 电角度， \dot{E}_{ad} 和 \dot{E}_{aq} 可以表示成电抗压降的形式，即

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

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

式中， X_{ad} 为每相电枢绕组的直轴电枢反应电抗；

X_{aq} 为每相电枢绕组的交轴电枢反应电抗。

直轴电枢反应电抗 X_{ad} 和交轴电枢反应电抗 X_{aq} 的物理意义：
对称负载下三相单位直轴电枢电流或交轴电枢电流联合产生的电枢反应磁通在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

凸极同步发电机的电动势方程式为

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}R - \dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_s \\ &= \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} + j(\dot{I}_d + \dot{I}_q) X_s \\ &= \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d (X_{ad} + X_s) + j\dot{I}_q (X_{aq} + X_s) \\ &= \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q\end{aligned}$$

式中， $X_d = X_{ad} + X_s$ 为每相电枢绕组的直轴同步电抗；

$X_q = X_{aq} + X_s$ 为每相电枢绕组的交轴同步电抗。

直轴同步电抗 X_d 和交轴同步电抗 X_q 的物理意义：对称负载下三相单位直轴电枢电流或交轴电枢电流联合产生的电枢总磁通在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

气隙 $\delta_d < \delta_q \longrightarrow$ 磁导 $\Lambda_d > \Lambda_q \longrightarrow X_{ad} > X_{aq} \longrightarrow X_d > X_q$

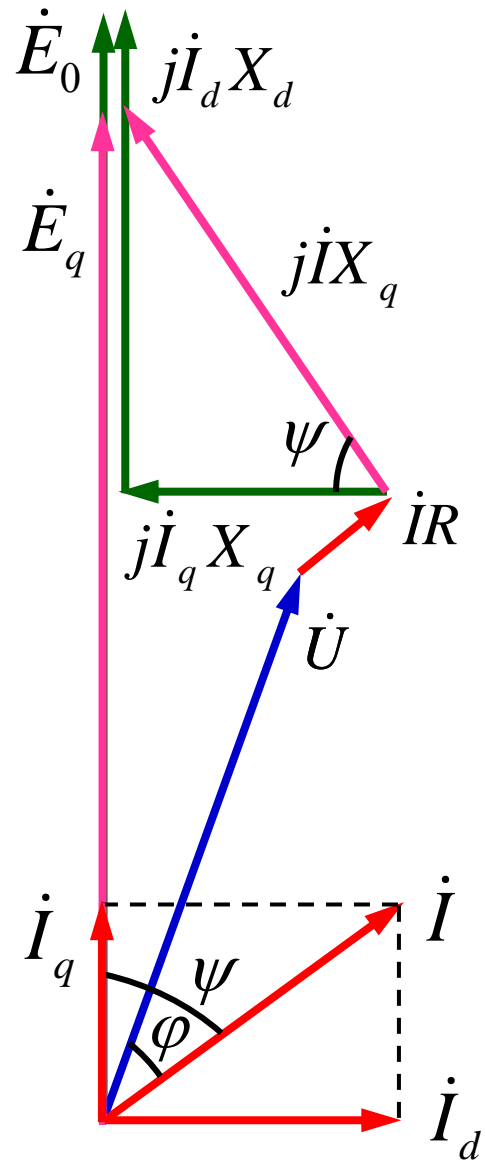
3. 凸极同步发电机的电动势相量图

已知： 凸极同步发电机的端电压 U ，电枢电流 I ，负载的功率因数 $\cos\varphi$ 及参数 R 、 X_d 、 X_q ，画电动势相量图求 \dot{E}_0 。

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

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad \begin{cases} I_d = I \sin\psi \\ I_q = I \cos\psi \end{cases}$$

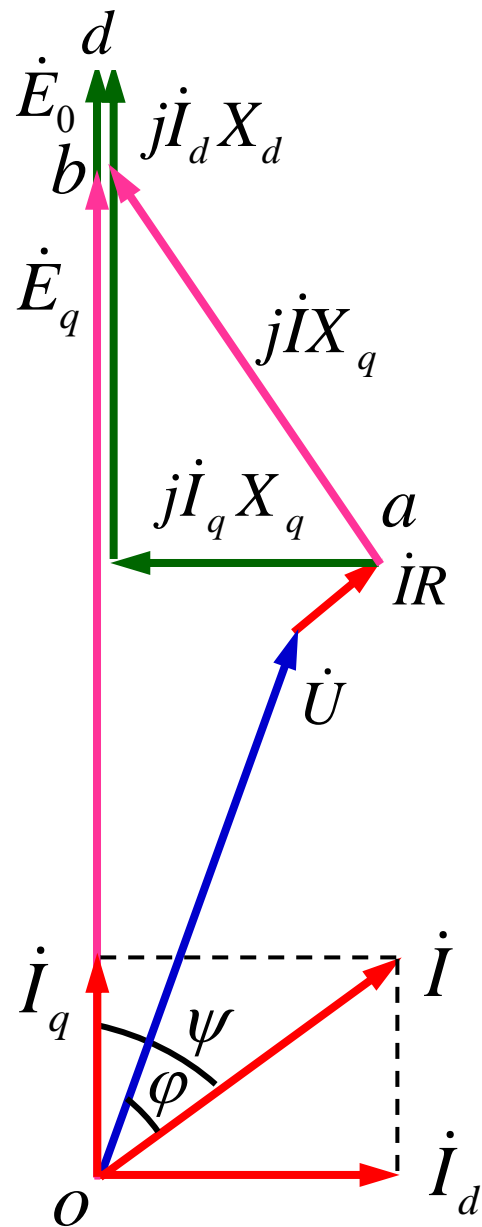
$$\dot{E}_q = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_q$$



■ 电动势相量图的实际作法:

- ① 由已知条件画出 \dot{U} 和 \dot{i} ;
- ② 画出相量 $\dot{E}_q = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_q$, 确定出 b 点, 则 \overline{ob} 与 \dot{i} 之间的夹角即为 ψ 角。
- ③ 根据求出的 ψ 角把 \dot{i} 分解为 \dot{i}_d 和 \dot{i}_q ;
- ④ 从 a 点依次画出 $j\dot{I}_q X_q$ 和 $j\dot{I}_d X_d$, 得到端点 d , 连接线段 \overline{od} 即为 \dot{E}_0 。

$$E_0 = E_q + I_d (X_d - X_q)$$



■ E_0 和 ψ 的解析计算表达式:

$$\tan \psi = \frac{\overline{be}}{\overline{oe}} = \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi + IR}$$

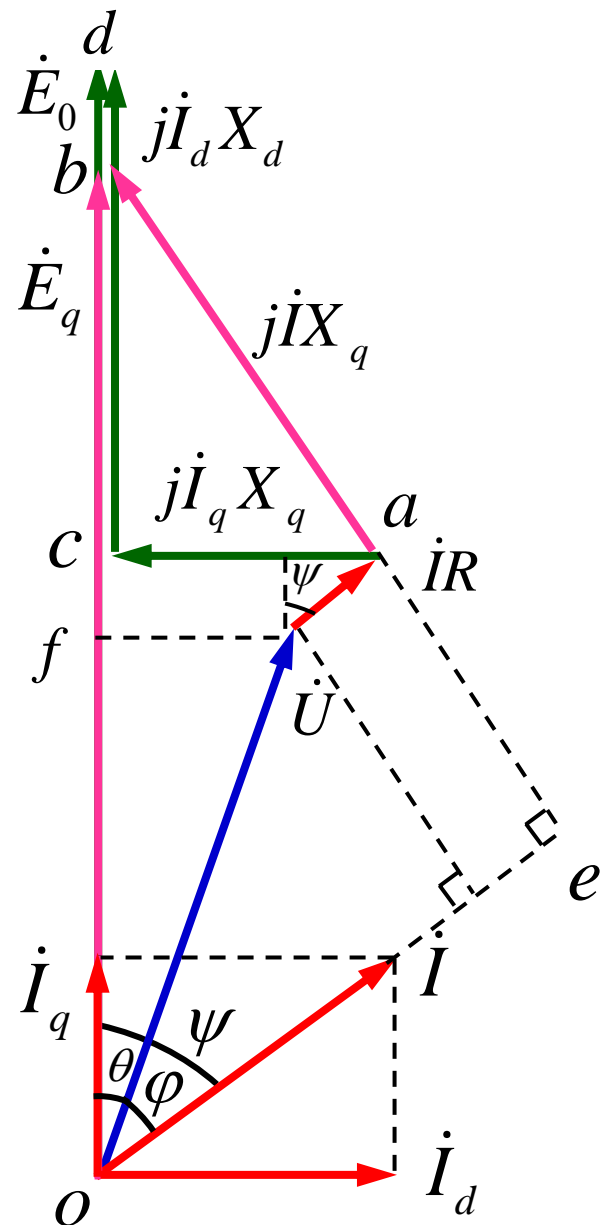
$$\psi = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi + IR}$$

$$\theta = \psi - \varphi$$

$$I_d = I \sin \psi$$

$$E_0 = \overline{of} + \overline{fc} + \overline{cd}$$

$$= U \cos \theta + IR \cos \psi + I_d X_d$$



例13-2 一台三相凸极同步发电机， $S_N=33\text{kVA}$ ， $U_N=380\text{V}$ ，星形联结，额定功率因数 $\cos\varphi=0.866$ （滞后），每相同步电抗 $X_d=6.759\Omega$ ， $X_q=4.388\Omega$ ，忽略电枢绕组电阻 R ，求额定负载运行时的功率角 θ 和空载电动势 E_0 。

解：可以利用电动势方程式或电动势相量图求解。

$$U_{N\phi} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220(\text{V})$$

$$I_{N\phi} = I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{33 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 50.14(\text{A})$$

$$\varphi = \arccos 0.866 = 30^\circ$$

1.利用电动势方程式求解

$$X_d=6.759\Omega, \quad X_q=4.388\Omega$$

设 $\dot{U} = 220\angle 0^\circ\text{V}$, 则 $\dot{I} = 50.14\angle -30^\circ\text{A}$,

$$\begin{aligned}\dot{E}_q &= \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_q = 220\angle 0^\circ + j50.14\angle -30^\circ \times 4.388 \\ &= 381.1\angle 30^\circ(\text{V})\end{aligned}$$

$$\theta = 30^\circ \quad \psi = \theta + \varphi = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$$

$$I_d = I \sin \psi = 50.14 \times \sin 60^\circ = 43.42(\text{A})$$

$$\begin{aligned}E_0 &= E_q + I_d(X_d - X_q) \\ &= 381.1 + 43.42(6.759 - 4.388) = 484.7(\text{V})\end{aligned}$$

2.利用电动势相量图求解

$$X_d=6.759\Omega, \quad X_q=4.388\Omega$$

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

$$= \arctan \frac{220 \times \sqrt{1 - 0.866^2} + 50.14 \times 4.388}{220 \times 0.866} = 60^\circ$$

$$\theta = \psi - \varphi = 60^\circ - 30^\circ = 30^\circ$$

$$I_d = I \sin \psi = 50.14 \times \sin 60^\circ = 43.42(\text{A})$$

$$E_0 = U \cos \theta + IR \cos \psi + I_d X_d$$

$$= 220 \cos 30^\circ + 43.42 \times 6.759 = 484(\text{V})$$

同步电机标么值的基值规定

■ 功率基值 $S_N = m U_{N\phi} I_{N\phi}$

■ 电压基值 $U_{N\phi}$

■ 电流基值 $I_{N\phi}$

■ 阻抗基值 $Z_N = \frac{U_{N\phi}}{I_{N\phi}}$

■ 励磁电流基值 i_{f0} ($E_0 = U_N$) 即 $\underline{i}_f = 1.0$ 时, 有 $\underline{E}_0 = 1.0$

例13-3 一台三相凸极同步发电机，其直轴和交轴同步电抗的标么值为 $\underline{X}_d = 1.0$ ， $\underline{X}_q = 0.6$ ，电枢电阻略去不计，试计算该发电机在额定电压、额定电流、 $\cos\varphi=0.8$ (滞后) 时励磁电动势的标么值 \underline{E}_0 (不计磁路饱和)。


解： 以电枢端电压作为参考相量。

$$\underline{\dot{U}} = 1\angle 0^\circ \quad \varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$\underline{\dot{I}} = 1\angle -36.87^\circ$$

$$\underline{\dot{E}}_q = \underline{\dot{U}} + j\underline{\dot{I}}\underline{X}_q = 1 + j0.6\angle -36.87^\circ = 1.442\angle 19.44^\circ$$

$$\theta = 19.44^\circ$$


$$\psi = \theta + \varphi = 19.44^\circ + 36.87^\circ = 56.31^\circ$$

$$\underline{I}_d = \underline{I} \sin \psi = 1 \times \sin 56.31^\circ = 0.8321$$

$$\underline{E}_0 = \underline{E}_q + \underline{I}_d (\underline{X}_d - \underline{X}_q) = 1.442 + 0.8321(1 - 0.6) = 1.775$$

小 结

1.同步发电机的时空相-矢量图

将各相的时轴取在该相的相轴上时，时空相-矢量图中有以下特点：

- ①忽略铁心中的损耗时， \dot{B}_0 与 \dot{F}_{f1} 重合；
- ② \dot{E}_0 滞后 \dot{F}_{f1} 90° 电角度；
- ③ \dot{F}_a 与 \dot{I} 同相位。

2.同步发电机对称负载时的电枢反应

电枢反应：电枢磁动势对励磁磁动势的影响。

同步发电机对称负载时电枢反应的性质取决于内功率因数角 ψ ，即 \dot{E}_0 与 \dot{I} 之间的夹角。

电枢反应的性质:

	\dot{F}_a 的作用位置	电枢反应的性质
$\psi=0^\circ$	q 轴	交轴电枢反应
$\psi=90^\circ$	d 轴	直轴去磁电枢反应
$\psi=-90^\circ$	d 轴	直轴助磁电枢反应
$0^\circ < \psi < 90^\circ$	d 轴和 q 轴	交轴和直轴去磁电枢反应

当 ψ 为任意角度时可将电枢磁动势分解为交轴分量和直轴分量，分别研究它们所起的作用。

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq} \quad \begin{cases} F_{ad} = F_a \sin \psi \\ F_{aq} = F_a \cos \psi \end{cases}$$

3.电枢反应电抗和同步电抗

当不计磁路的饱和时，为定量分析电枢反应影响的大小，引入电枢反应电抗，电枢反应电动势可表示成电枢反应电抗压降的形式。

1) 隐极同步发电机

隐极同步电机由于气隙均匀，只需引入一个电枢反应电抗 X_a 。

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

电枢反应电抗 X_a 的物理意义：对称负载下三相单位电枢电流联合产生的电枢反应磁通在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

同步电抗 X_c 的物理意义：对称负载下三相单位电枢电流联合产生的电枢总磁通（电枢反应磁通和电枢漏磁通）在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

2) 凸极同步发电机

凸极同步电机由于气隙不均匀，引入两个电枢反应电抗：直轴电枢反应电抗 X_{ad} 和交轴电枢反应电抗 X_{aq} 。

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

直轴电枢反应电抗 X_{ad} 和交轴电枢反应电抗 X_{aq} 的物理意义：对称负载下三相单位直轴电枢电流或交轴电枢电流联合产生的电枢反应磁通在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

考虑电枢电流漏磁场的作用，凸极同步电机有两个同步电抗：直轴同步电抗 X_d 和交轴同步电抗 X_q 。

直轴同步电抗 X_d 和交轴同步电抗 X_q 的物理意义：对称负载下三相单位直轴电枢电流或交轴电枢电流联合产生的总磁通在一相电枢绕组中感应电动势的大小。

4.同步发电机的电动势方程式和电动势相量图

1) 隐极同步发电机

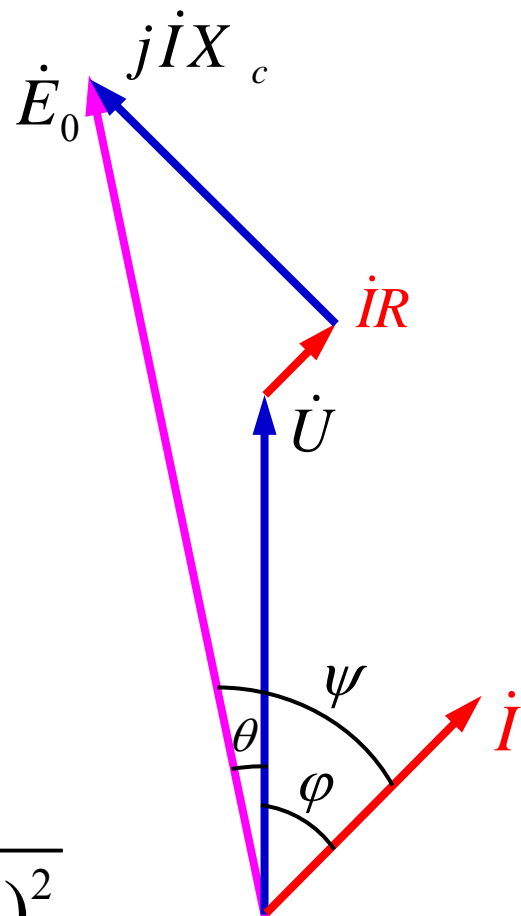
$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_c) = \dot{U} + \dot{I}Z_c$$

$$\psi = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_c}{U \cos \varphi + IR}$$

$$\theta = \psi - \varphi$$

$$E_0 = U \cos \theta + IR \cos \psi + IX_c \sin \psi$$

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



2) 凸极同步发电机

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

$$\dot{E}_q = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_q = E_q \angle \theta \quad \psi = \theta + \varphi$$

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad \begin{cases} I_d = I \sin \psi \\ I_q = I \cos \psi \end{cases}$$

$$E_0 = E_q + I_d (X_d - X_q)$$

$$\psi = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi + IR} \quad \theta = \psi - \varphi$$

$$I_d = I \sin \psi \quad E_0 = U \cos \theta + IR \cos \psi + I_d X_d$$

