第二章

同步发电机突然三相短路分析

2-1 同步发电机的基本方程

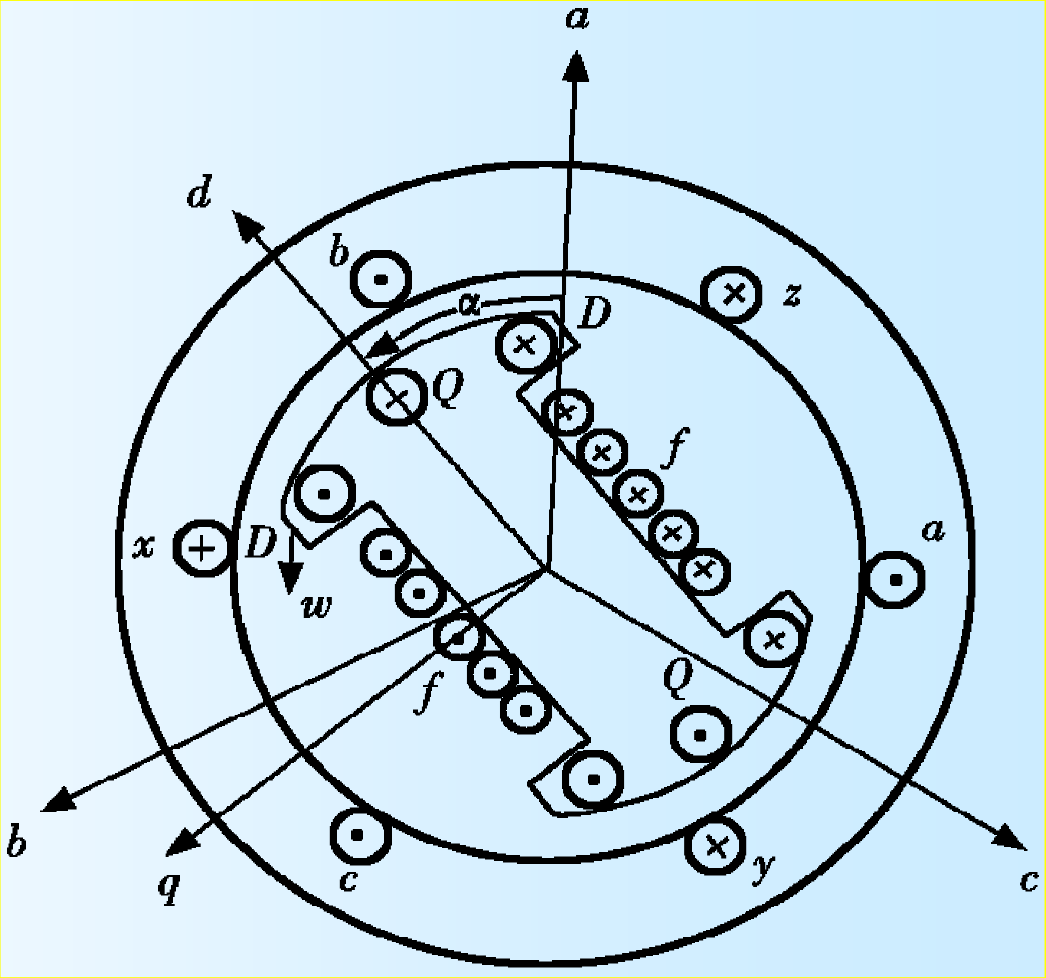
同步电机的结构

•有阻尼绕组的凸极式同步发电机

定子方面有静止的三相绕组*a*、*b*、*c*；

转子方面有与转子一起旋转的一个励磁绕组*f*、纵轴等效阻尼绕组*D*和横轴等效阻尼绕组*Q*。

•隐极式同步发电机，没有两个阻尼绕组。



理想同步发电机

(1) 电机导磁部分的导磁系数不变。即把同步发电机简化为一线性元件。

(2) 电机转子在结构上对纵轴及横轴分别对称。

(3) 定子a、b、c三相绕组在空间互差120°，是完全对称而又相同的三个绕组。

(4) 定子绕组沿定子作均匀分布。这样可使定子电流在空气隙中产生正弦分布的磁势，定子绕组与转子绕组间的互感磁通在空气隙中也按正弦分布。

一、同步发电机的原始方程

正方向的规定：

(1) 绕组轴线的正方向作为磁链的正方向.

(2) 定子绕组产生的磁链方向与轴线方向相反时的电流为正值.

(3) 转子绕组产生的磁链方向与轴线方向相同时的电流为正值.

（4）电压的正方向如图6－7示。

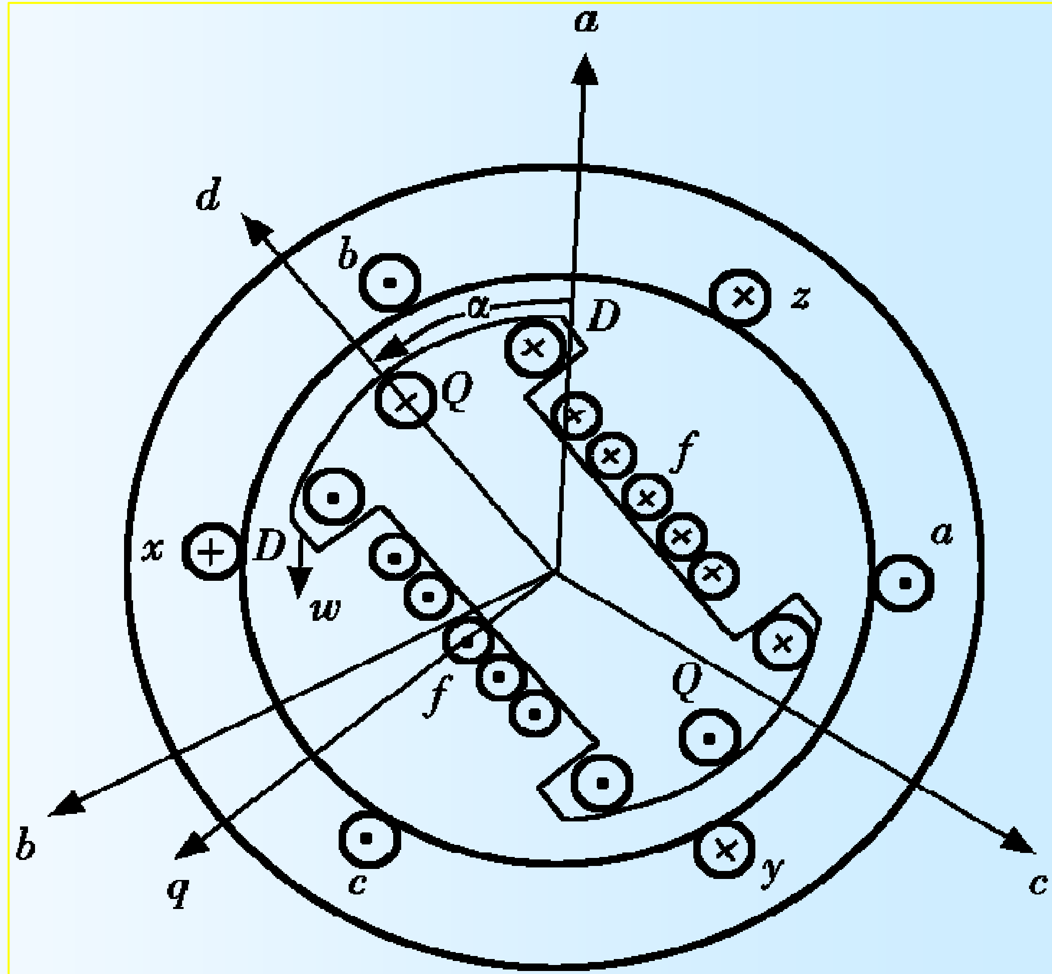


图2-1　同步发电机各绕组轴线正方向示意图

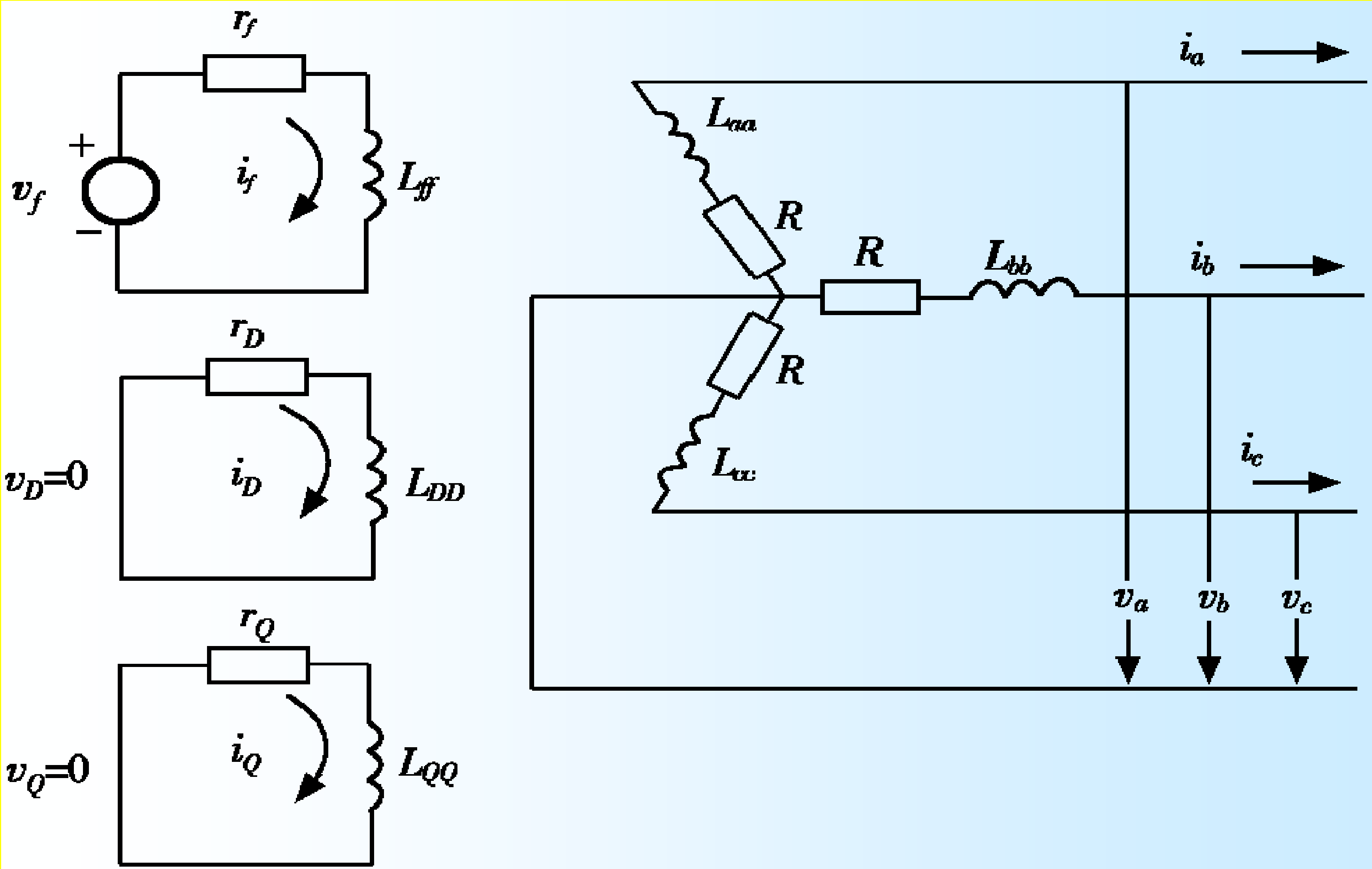


图2-2　同步发电机各回路电路

1. 电势方程和磁链方程

电势方程：

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ \cdots\cdots \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \cdots \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R & 0 & 0 & \vdots & & & \\ 0 & R & 0 & \vdots & & 0 & \\ 0 & 0 & R & \vdots & & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & \vdots & R_f & 0 & 0 \\ & 0 & & \vdots & 0 & R_D & 0 \\ & & & \vdots & 0 & 0 & R_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \cdots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

式中： $\dot{\psi} = d\psi / dt$

磁链方程：

$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \cdots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & \vdots & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & \vdots & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & \vdots & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & \vdots & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & \vdots & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & \vdots & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \cdots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{abc} \\ \dot{\varphi}_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{abc} \\ \varphi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{SS} & \mathbf{L}_{SR} \\ \mathbf{L}_{RS} & \mathbf{L}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix}$$

上述方程组共**12**各方程，其中有**18**个运行变量（电压、电流、磁链），一般电压作为已知量，另外**12**个未知量可通过方程组解出。

2.电感系数

(1) 定子各相绕组的自感系数（以a相为例）

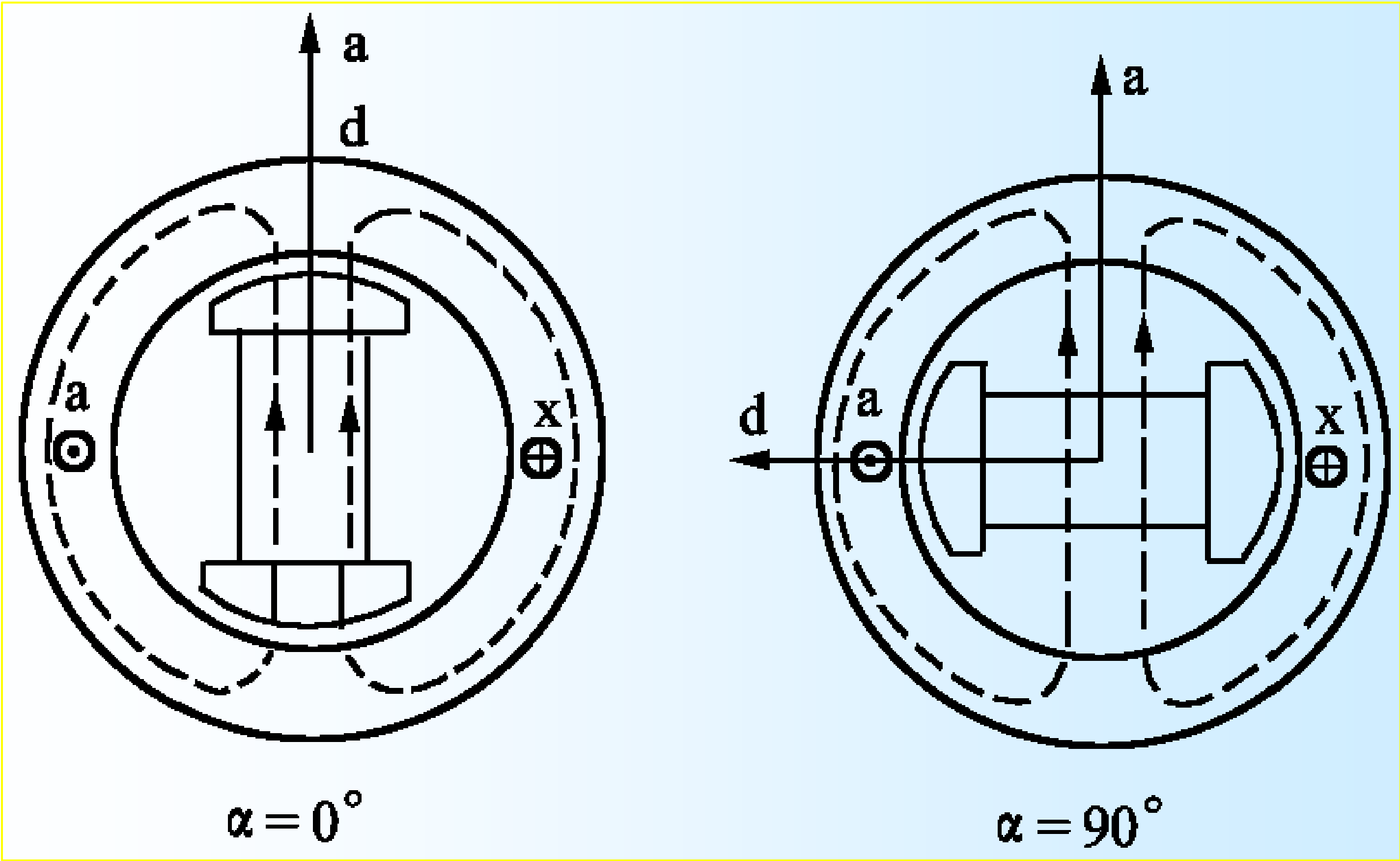


图2-3 定子绕组的自感

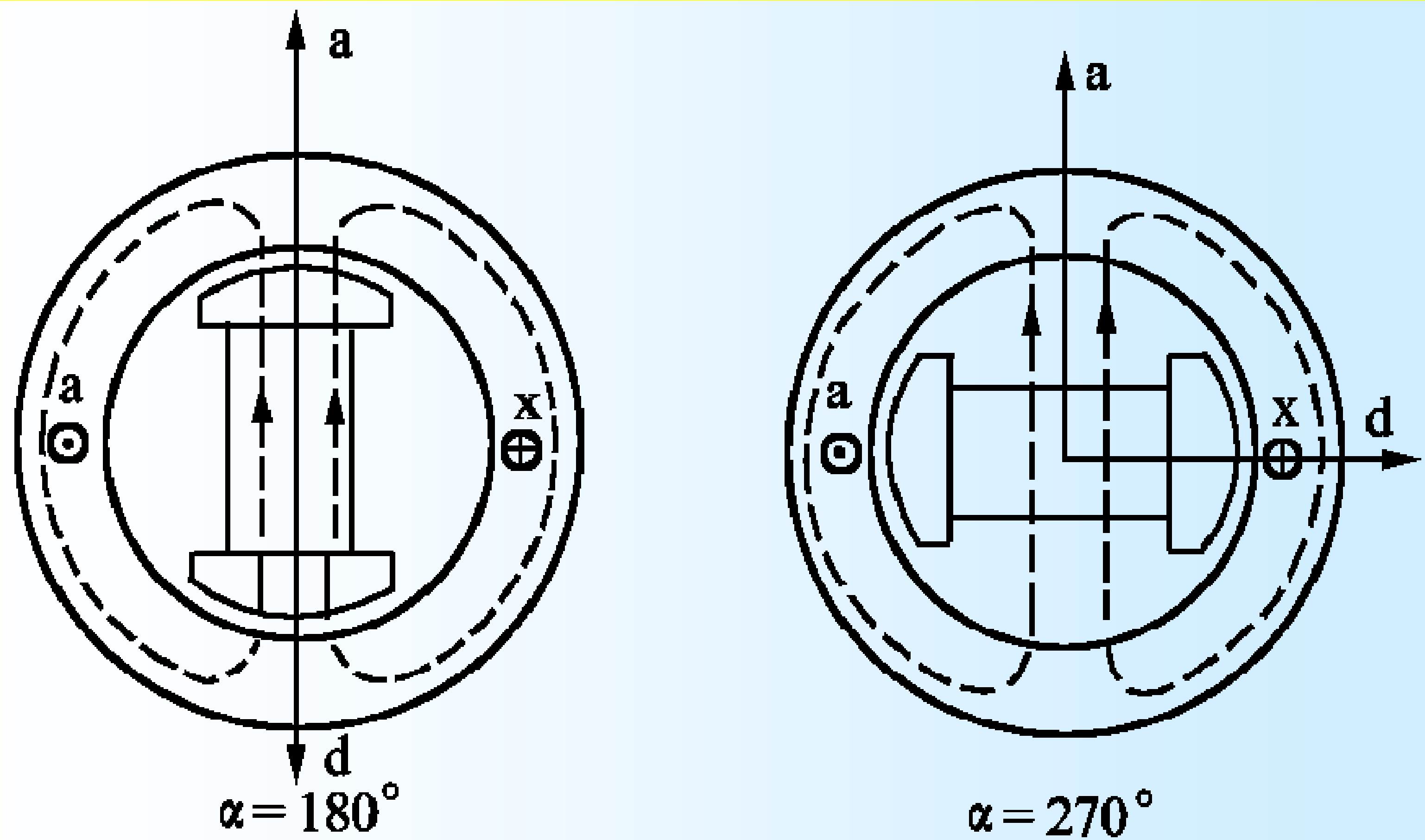


图2-4 定子绕组的自感

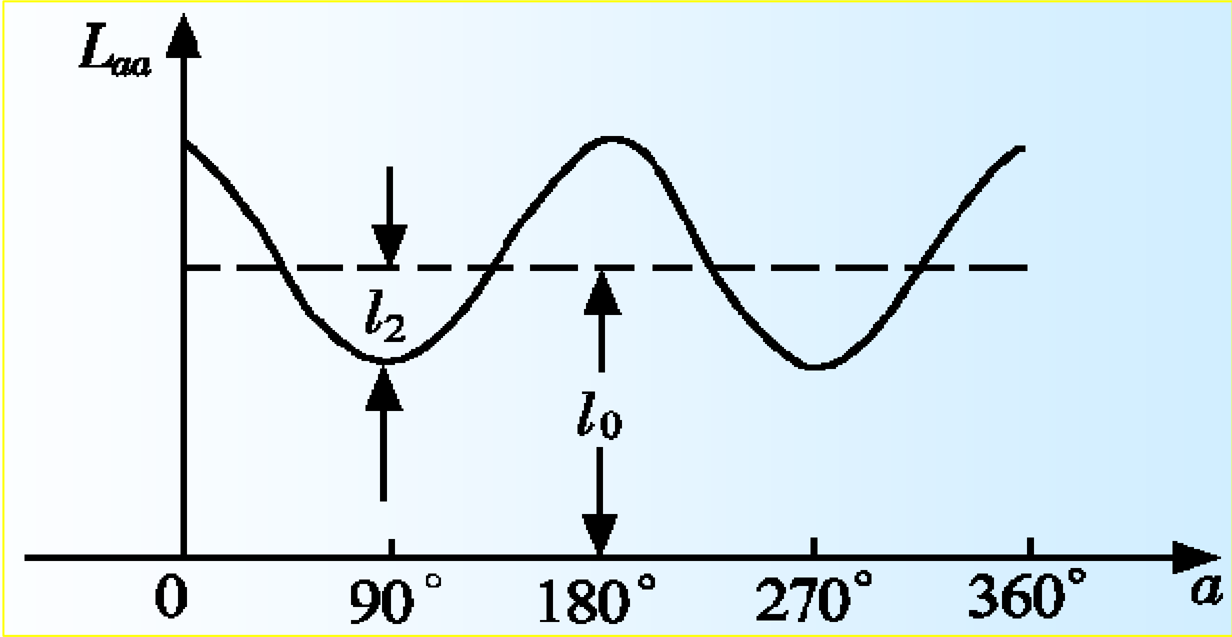


图2-5 自感L_{aa}的变化规律

由此可见，a相自感系数是 α 角的周期函数，其变化周期为 π 。

$$L_{aa} = l_0 + l_2 \cos 2\alpha$$

$$\left.\begin{aligned} L_{bb} &= l_0 + l_2 \cos 2(\alpha - 120^0) \\ L_{cc} &= l_0 + l_2 \cos 2(\alpha + 120^0) \end{aligned}\right\}$$

(2) 定子绕组间的互感

以a相与b相之间的互感系数L_{ab}为例

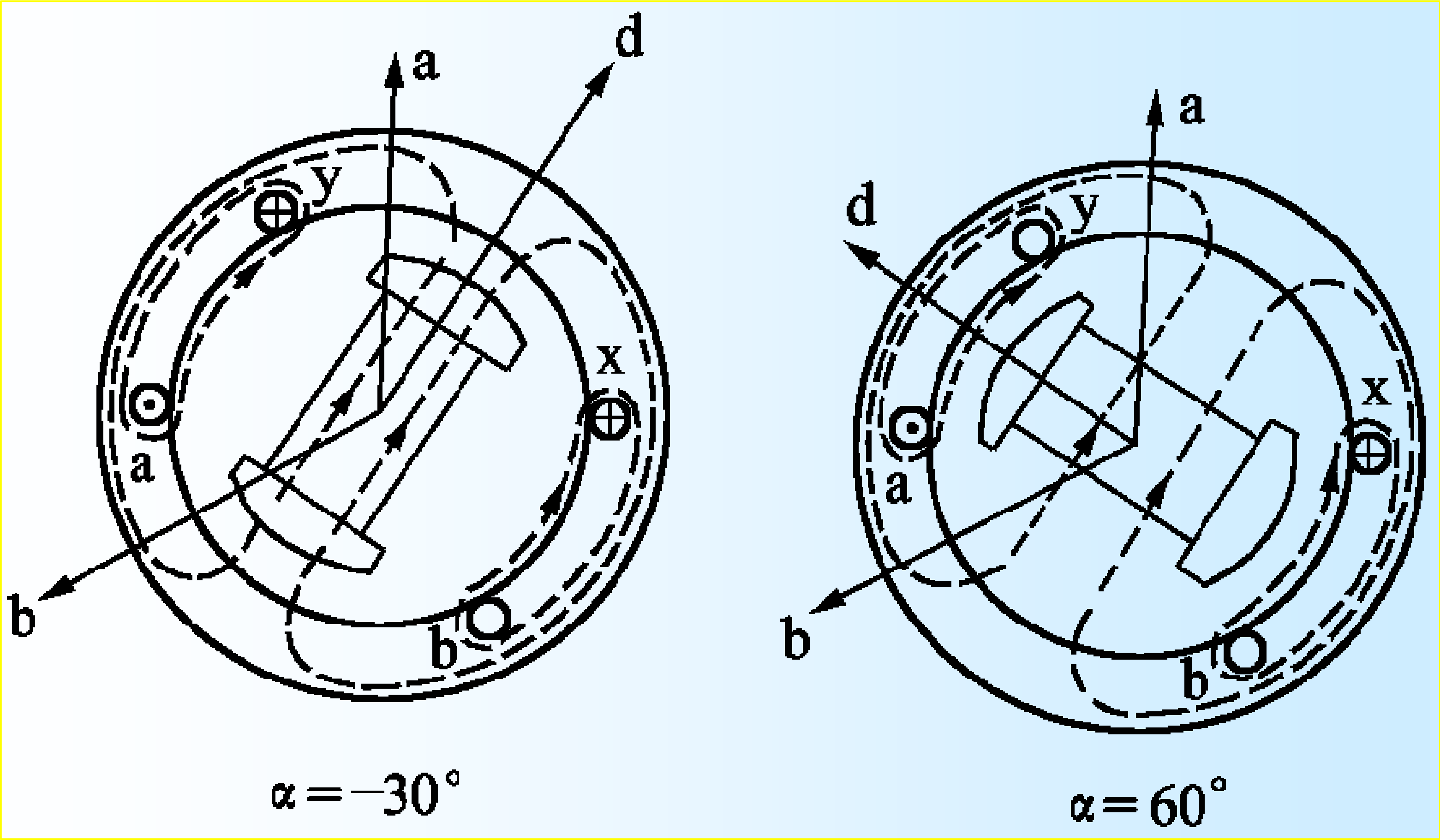


图2-6　定子绕组间的互感

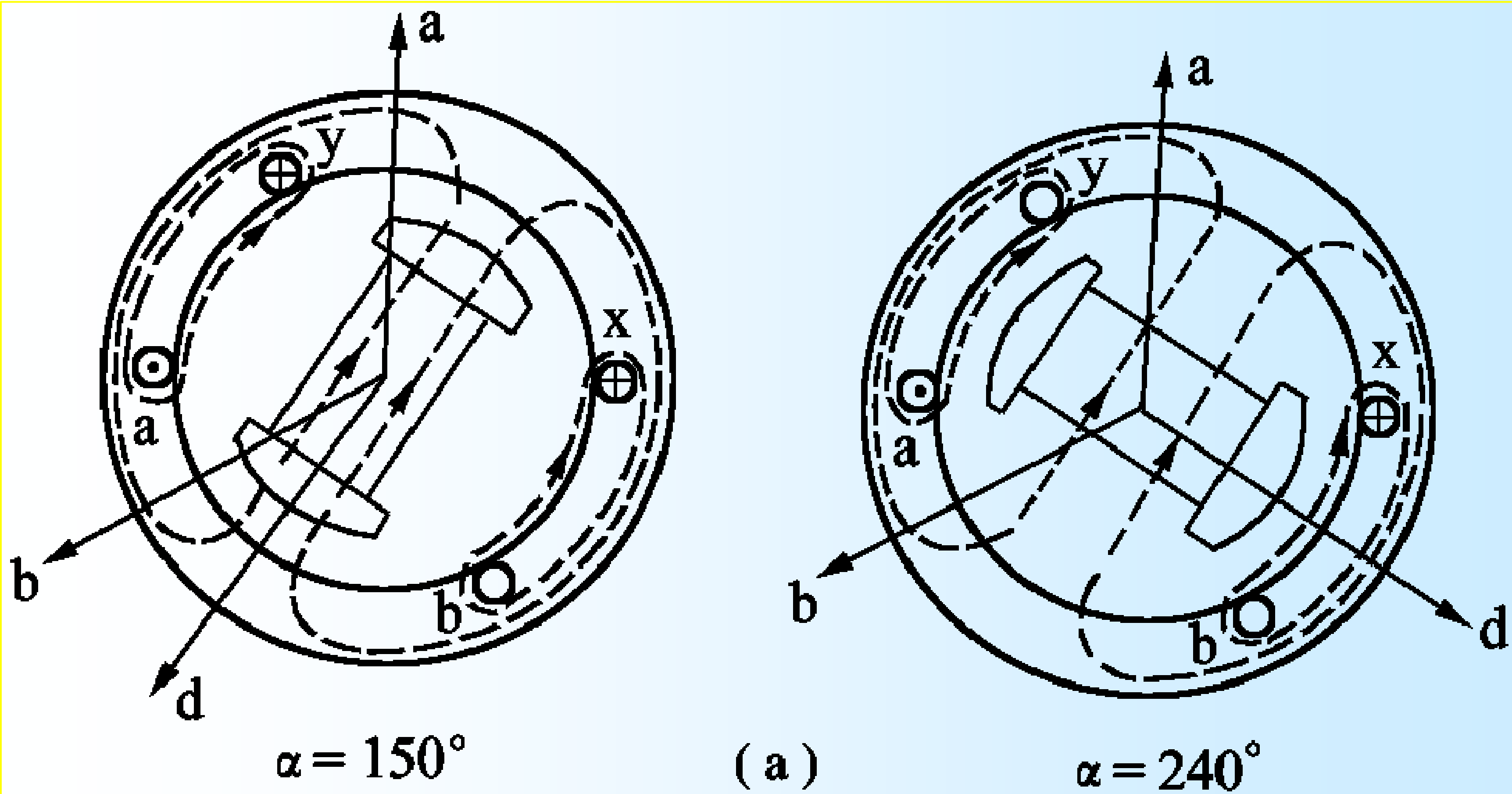


图2-7 定子绕组间的互感

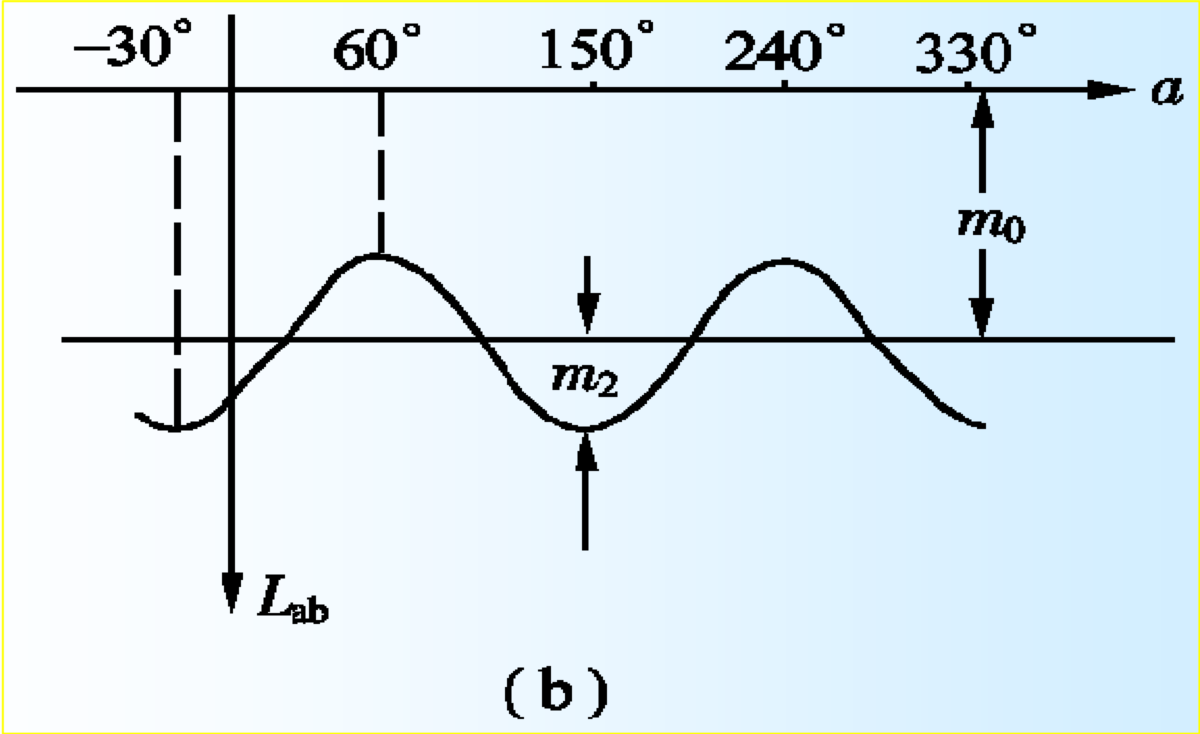


图2-8 互感L_{ab}的变化规律

由此可见，定子互感系数也是 α 角的周期函数，其周期为 π。

$$\left.\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\alpha + 30^0)\right] \\ L_{bc} &= L_{cb} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\alpha - 90^0)\right] \\ L_{ca} &= L_{ac} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\alpha + 150^0)\right] \end{aligned}\right\}$$

(3) 转子上各绕组的自感系数和互感系数

- 转子各绕组的自感系数L_{ff}、L_{DD}和L_{QQ}都是常数，分别改记为L_f、L_D和L_Q。
- 转子各绕组间的互感系数亦应为常数。两个纵轴绕组（励磁绕组f和阻尼绕组D）之间的互感系数$L_{fD}=L_{Df}$=常数。由于转子的纵轴绕组和横轴绕组互相垂直，它们之间的互感系数为零，即$L_{fQ}=L_{Qf}=L_{DQ}=L_{QD}=0$。

(4) 定子绕组和转子绕组间的互感系数

以励磁绕组与定子a相绕组间的互感L_{af}为例

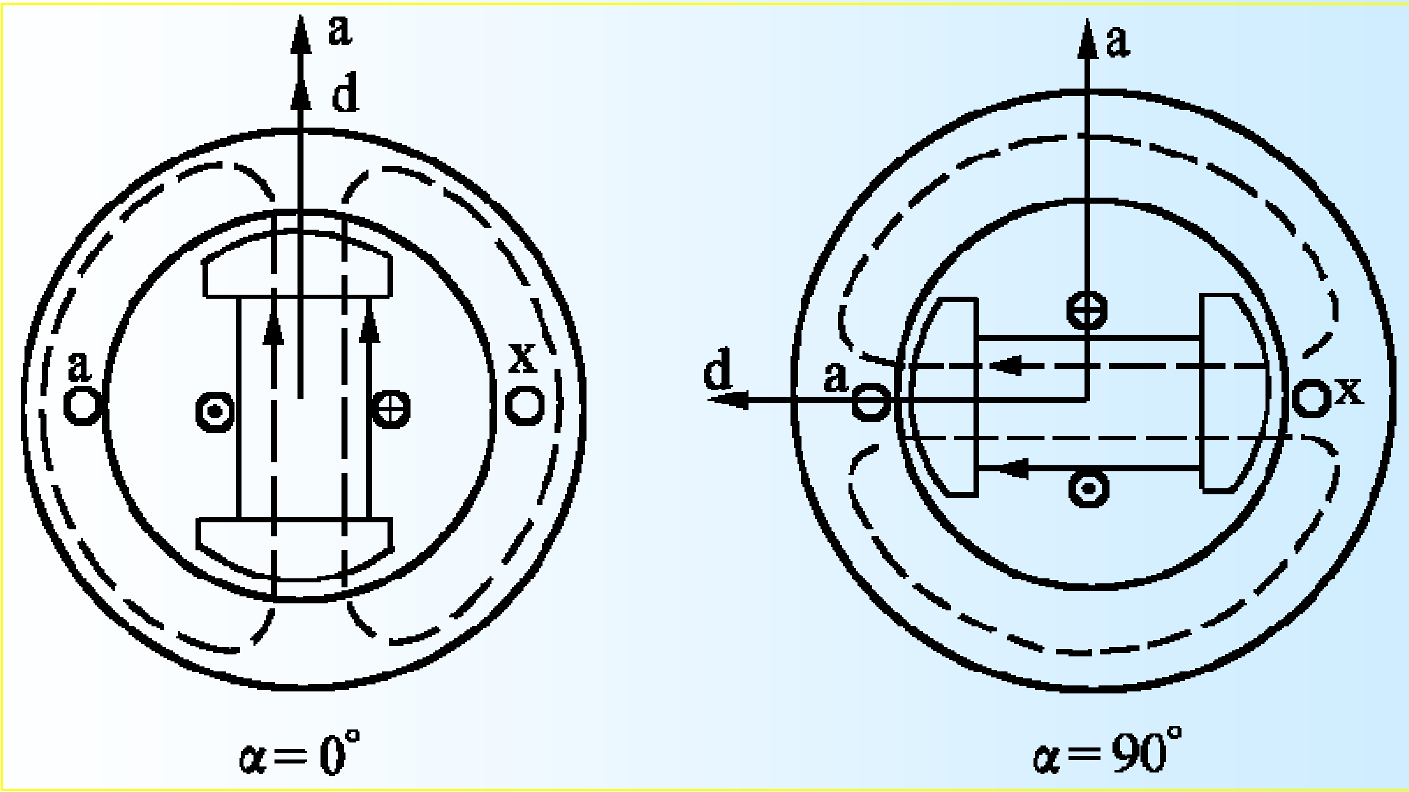


图2-9　定子绕组与励磁绕组间的互感

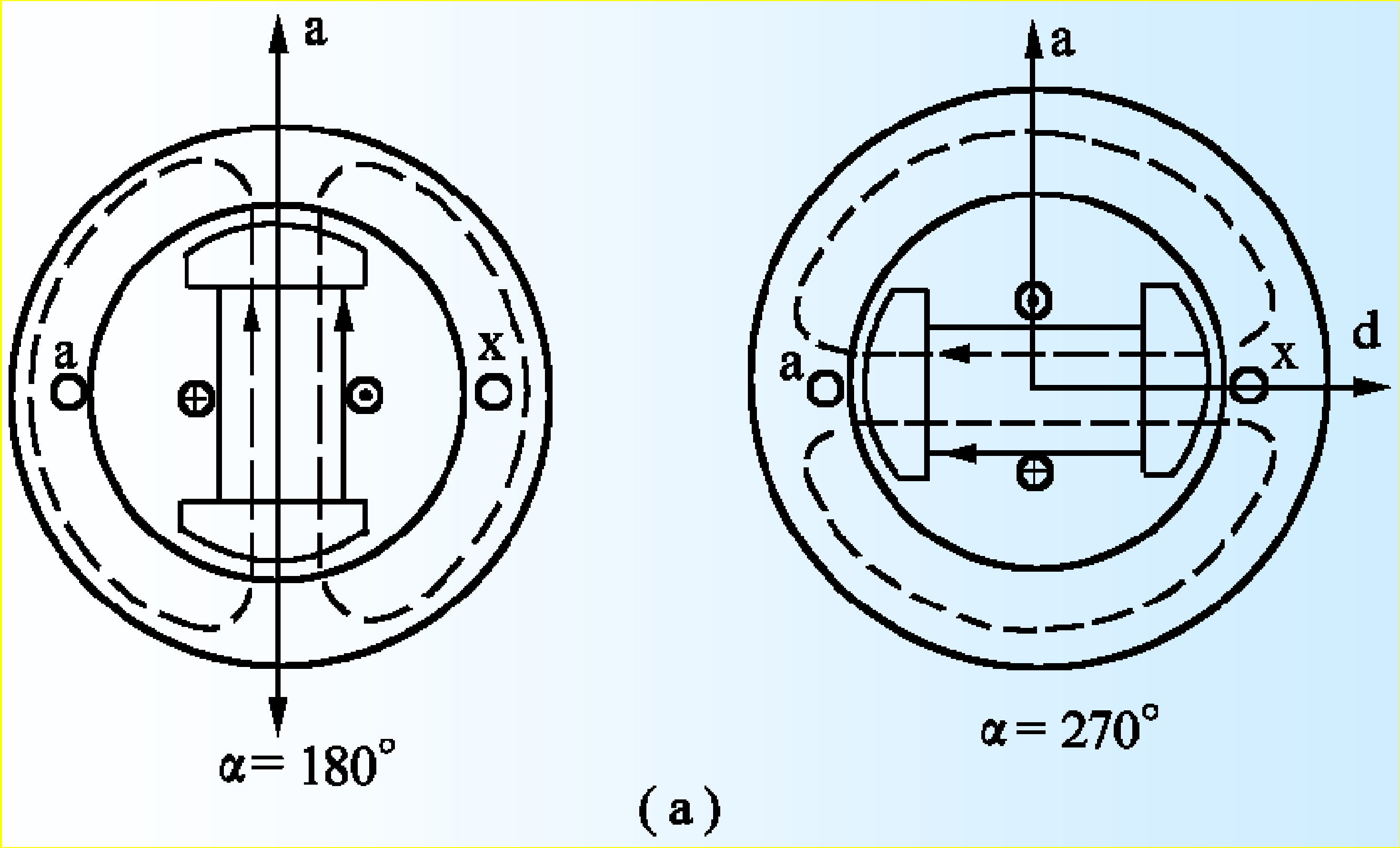
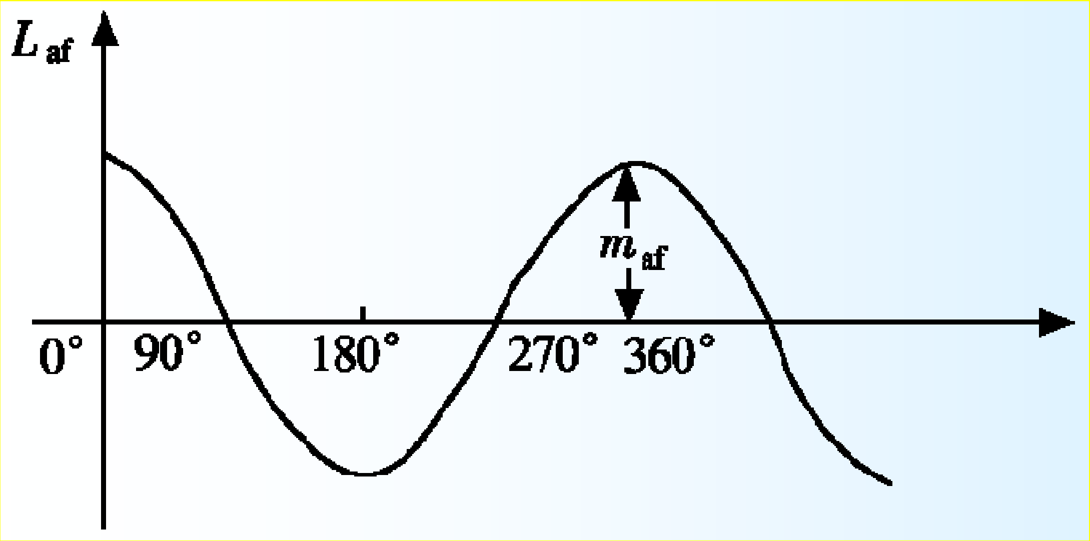


图2-10　定子绕组与励磁绕组间的互感



$$\left.\begin{aligned} L_{af} &= L_{fa} = m_{af}\cos\alpha \\ L_{bf} &= L_{fb} = m_{af}\cos(\alpha - 120^\circ) \\ L_{cf} &= L_{fc} = m_{af}\cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned}\right\}$$

图2-11 互感L_{af}的变化规律

由此可见，定子绕组和转子绕组间的互感系数是 α 角的周期函数，其周期为2π。

$$\left.\begin{aligned} L_{aD} &= L_{Da} = m_{aD}\cos\alpha \\ L_{bD} &= L_{Db} = m_{aD}\cos(\alpha - 120^\circ) \\ L_{cD} &= L_{Dc} = m_{aD}\cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad \left.\begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = -m_{aQ}\sin\alpha \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = -m_{aQ}\sin(\alpha - 120^\circ) \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = -m_{aQ}\sin(\alpha + 120^\circ) \end{aligned}\right\}$$

二. 同步发电机的基本方程

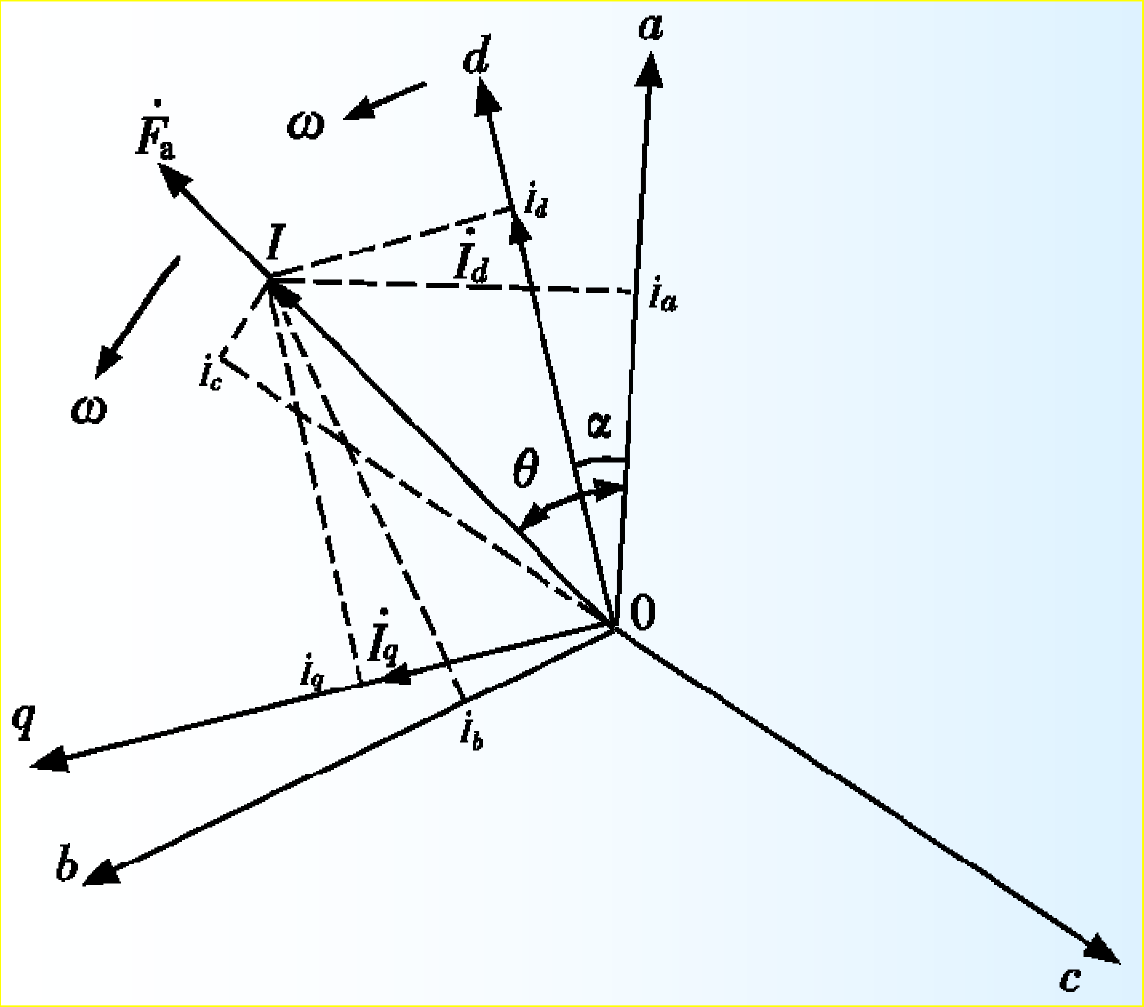
1. 派克变换

磁链方程式中出现变系数的原因主要是：

（1）转子的旋转使定、转子绕组间产生相对运动，致使定、转子绕组间的互感系数发生相应的周期性变化。

（2）转子在磁路上只是分别对于d轴和q轴对称而不是任意对称的，转子的旋转也导致定子各绕组的自感和互感的周期性变化。

•同步电机稳态对称运行时，电枢磁势幅值不变，转速恒定，对于转子相对静止。它可以用一个以同步转速旋转的矢量 $\dot{F}_a$ 来表示。如果定子电流用一个同步旋转的通用相量 $\dot{I}$ 表示，那么，相量 $\dot{F}_a$ 与相量 $\dot{I}$ 在任何时刻都同相位，而且在数值上成比例，如图所示。



$$\left.\begin{aligned} i_a &= I\cos\theta \\ i_b &= I\cos(\theta - 120^\circ) \\ i_c &= I\cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} i_d &= I\cos(\theta - \alpha) \\ i_q &= I\sin(\theta - \alpha) \end{aligned}\right\}$$

图2-12　通用电流相量在两种坐标系统上的投影关系

由两种不同的投影可得他们之间的关系

$$\left.\begin{aligned}
i_d &= \frac{2}{3}[i_a\cos\alpha + i_b\cos(\alpha - 120^\circ) + i_c\cos(\alpha + 120^\circ)\\
i_q &= -\frac{2}{3}[i_a\sin\alpha + i_b\sin(\alpha - 120^\circ) + i_c\sin(\alpha + 120^\circ)
\end{aligned}\right\}$$

- 通过这种变换，将三相电流 i_a、i_b、i_c变换成了等效的两相电流 i_d和 i_q。
- 可以设想：这两个电流是定子的两个等效绕组dd和qq中的电流。这组等效的定子绕组dd和qq不像实际的a、b、c三相绕组那样在空间静止不动，而是随着转子一起旋转。等效绕组中的电流产生的磁势对转子相对静止，它所遇到的磁路磁阻恒定不变，相应的电感系数也就变为常数了。

• 当定子绕组内存在幅值恒定的三相对称电流时，由式确定的i_d和i_q都是常数。即：等效的dd、qq绕组的电流是直流。

•如果定绕组中存在三相不对称的电流，只要是一个平衡的三相系统，即满足

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

仍然可以用一个通用相量来代表三相电流，不过这时通用相量的幅值和转速都不是恒定的，因而它在d轴和q轴上的投影也是幅值变化的。

当定子三相电流构成不平衡系统时，三相电流是三个独立的变量，仅用两个新变量(d轴分量和q轴分量)不足以代表原来的三个变量。为此，需要增选第三个新变量 i_0，其值为

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

i_0为定子电流的零轴分量。

从而构成了一个从a、b、c坐标系统到d、q、0坐标系统的变换，可写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos(\alpha-120^\circ) & \cos(\alpha+120^\circ) \\ -\sin\alpha & -\sin(\alpha-120^\circ) & -\sin(\alpha+120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{i}_{\mathrm{dq0}} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}}$$

$$\boldsymbol{i}_{abc} = \boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{i}_{dq0}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 1 \\ \cos(\alpha - 120^\circ) & -\sin(\alpha - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\alpha + 120^\circ) & -\sin(\alpha + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

由此可见，当三相电流不平衡时，每相电流中都含有相同的零轴分量 i_0。由于定子三相绕组完全对称，在空间互相位移120°电角度，三相零轴电流在气隙中的合成磁势为零，故不产生与转子绕组相交链的磁通。它只产生与定子绕组交链的磁通，其值与转子的位置无关。

上述变换称为派克(Park)变换.

2. d、q、0系统的电势方程

$$\boldsymbol{v}_{abc} = \dot{\psi}_{abc} - \boldsymbol{R}_S \boldsymbol{i}_{abc}$$

左乘P

$$\boldsymbol{v}_{dq0} = \boldsymbol{P}\,\dot{\psi}_{abc} - \boldsymbol{R}_S \boldsymbol{i}_{dq0}$$

由于 $\Psi_{\mathrm{dq0}}=P\,\psi_{\mathrm{abc}}$

所以

$$\dot{\psi}_{dq0} = \dot{\boldsymbol{P}}\,\psi_{abc} + \boldsymbol{P}\,\dot{\psi}_{abc}$$

$$\boldsymbol{P}\,\dot{\psi}_{abc} = \dot{\psi}_{dq0} - \dot{\boldsymbol{P}}\,\psi_{abc} = \dot{\psi}_{dq0} - \dot{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{P}^{-1}\psi_{dq0} = \dot{\psi}_{dq0} + \boldsymbol{S}$$

$$\boldsymbol{S} = -\dot{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{P}^{-1}\psi_{dq0}$$

$$= -\frac{2}{3}\begin{bmatrix} -\sin\alpha\frac{d\alpha}{dt} & -\sin(\alpha-120^\circ)\frac{d\alpha}{dt} & -\sin(\alpha+120^\circ)\frac{d\alpha}{dt} \\ -\cos\alpha\frac{d\alpha}{dt} & -\cos(\alpha-120^\circ)\frac{d\alpha}{dt} & -\cos(\alpha+120^\circ)\frac{d\alpha}{dt} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} P^{-1}\psi_{dq0}$$

$$= -\frac{2}{3}\begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2}\frac{d\alpha}{dt} & 0 \\ -\frac{3}{2}\frac{d\alpha}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

于是得到d、q、0轴分量表示的电势方程式

$$\boldsymbol{v}_{dq0} = (\dot{\psi}_{dq0} + \boldsymbol{S}) - \boldsymbol{R}_S \boldsymbol{i}_{dq0}$$

$$\left.\begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \omega\psi_q - Ri_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \omega\psi_d - Ri_q \\ v_0 &= \dot{\psi}_0 - Ri_0 \end{aligned}\right\}$$

3. d、q、0系统的磁链方程和电感系数

$$\psi_{abc} = -\boldsymbol{L}_{SS}\boldsymbol{i}_{abc} + \boldsymbol{L}_{SR}\boldsymbol{i}_{fDQ}$$

$$\psi_{fDQ} = -\boldsymbol{L}_{RS}\boldsymbol{i}_{abc} + \boldsymbol{L}_{RR}\boldsymbol{i}_{fDQ}$$

左乘以P

$$\psi_{dq0} = -\boldsymbol{P}\boldsymbol{L}_{SS}\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{i}_{dq0} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{L}_{SR}\boldsymbol{i}_{fDQ}$$

$$\psi_{fDQ} = -\boldsymbol{L}_{RS}\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{i}_{dq0} + \boldsymbol{L}_{RR}\boldsymbol{i}_{fDQ}$$

经过运算可得

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & m_{af} & m_{aD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & m_{aQ} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} m_{af} & 0 & 0 & L_f & L_{fD} & 0 \\ \frac{3}{2} m_{aD} & 0 & 0 & L_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} m_{aQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

用标幺值表示时同步发电机的基本方程：

$$
\left.\begin{aligned}
v_d &= \dot{\psi}_d - \omega\psi_q - Ri_d \\
v_q &= \dot{\psi}_q + \omega\psi_d - Ri_q \\
v_0 &= \dot{\psi}_0 - Ri_0 \\
v_f &= \dot{\psi}_f + R_f i_f \\
0 &= \dot{\psi}_D + R_D i_D \\
0 &= \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
\qquad
\left.\begin{aligned}
\psi_d &= -L_d i_d + m_{af} i_f + m_{aD} i_D \\
\psi_q &= -L_q i_q + m_{aQ} i_Q \\
\psi_0 &= -L_0 i_0 \\
\psi_f &= -m_{af} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \\
\psi_D &= -m_{aD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \\
\psi_Q &= -m_{aQ} i_q + L_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
$$

4. 功率公式

$$P = \mathbf{v}_{abc}^T \mathbf{i}_{abc}$$

$$= [\boldsymbol{P}^{-1}\mathbf{v}_{dqo}]^T \boldsymbol{P}^{-1}\mathbf{i}_{dqo}$$

$$= \mathbf{v}_{dqo}^T [\boldsymbol{P}^{-1}]^T \boldsymbol{P}^{-1}\mathbf{i}_{dqo}$$

$$= 3v_o i_o + \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q)$$

三、同步发电机稳态运行的电势方程

1. 基本方程的实用化

（1）转子转速不变并等于额定转速 ；

（2）电机纵轴向三个绕组只有一个公共磁通，而不存在只同两个绕组交链的漏磁通。

$$
\left.\begin{aligned}
X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\
X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\
X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\
X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\
X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq}
\end{aligned}\right\}
$$

(3) 略去定子电势方程中的变压器电势，即认为 $\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = o$ ，这条假设适用于不计定子回路电磁暂态过程或者对定子电流中的非周期分量另行考虑的场合；

(4) 定子回路的电阻只在计算定子电流非周期分量衰减时予以计及，而在其它计算中则略去不计。

在(1)、(2)两项假设条件的基础上，可将基本方程改写如下：

$$
\left.\begin{aligned}
v_d &= \dot{\psi}_d - \psi_q - Ri_d \\
v_q &= \dot{\psi}_q + \psi_d - Ri_q \\
v_f &= \dot{\psi}_f + R_f i_f \\
0 &= \dot{\psi}_D + R_D i_D \\
0 &= \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
\Longleftarrow
\left.\begin{aligned}
v_d &= \dot{\psi}_d - \omega\psi_q - Ri_d \\
v_q &= \dot{\psi}_q + \omega\psi_d - Ri_q \\
v_0 &= \dot{\psi}_0 - Ri_0 \\
v_f &= \dot{\psi}_f + R_f i_f \\
0 &= \dot{\psi}_D + R_D i_D \\
0 &= \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
$$

$$
\left.\begin{aligned}
\psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\
\psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\
\psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
\Longleftarrow
\left.\begin{aligned}
\psi_d &= -L_d i_d + m_{af} i_f + m_{aD} i_D \\
\psi_q &= -L_q i_q + m_{aQ} i_Q \\
\psi_0 &= -L_0 i_0 \\
\psi_f &= -m_{af} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \\
\psi_D &= -m_{aD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \\
\psi_Q &= -m_{aQ} i_q + L_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
$$

2. 稳态运行的电势方程、相量图和等值电路

稳态时，$\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = 0$，等效阻尼绕组中电流为零，励磁电流$i_f = v_f / R_f$是常数。略去定子电阻$R$，定子电势方程将为

$$\left.\begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \psi_q - Ri_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \psi_d - Ri_q \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} v_q &= \psi_d = X_{ad} i_f - X_d i_d \\ &= \psi_{fd} - X_d i_d = E_q - X_d i_d \\ v_d &= -\psi_q = X_q i_q \end{aligned}\right\}$$

式中，$E_q = \psi_{fd} = X_{ad} i_f$

ψ_{fd} 和E_q分别代表励磁电流对定子绕组产生的互感磁链（即空载磁链）和相应的感应电势，E_q即通常所指的空载电势。

相量形式:

选q轴作为虚轴，比q轴落后90°的方向为实轴，则有：

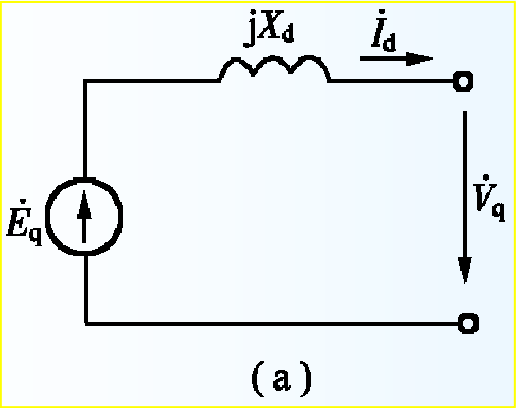
$$\dot{V}_d = v_d, \quad \dot{I}_d = i_d$$

$$\dot{V}_q = jv_q, \dot{I}_q = ji_q, \ \dot{E}_q = jE_q$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{v}_q &= \boldsymbol{E}_q - \boldsymbol{X}_d \boldsymbol{i}_d \\ \boldsymbol{v}_d &= \boldsymbol{X}_q \boldsymbol{i}_q \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left.\begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned}\right\}$$

相应的交流等值电路如图所示。

$$\left.\begin{aligned}\dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d\dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q\dot{I}_q\end{aligned}\right\}$$



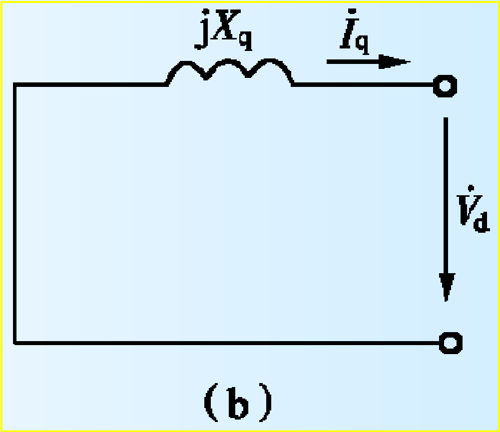


图2-13 凸极机的等值电路

（a）纵轴向（b）横轴向

令 $\dot{V}=\dot{V}_d+\dot{V}_q$ ，$\dot{I}=\dot{I}_d+\dot{I}_q$

$$\left.\begin{aligned}\dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d\dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q\dot{I}_q\end{aligned}\right\}$$

可将式(6-49)合写成：

$$\dot{V}=\dot{E}_q-jX_q\dot{I}_q-jX_d\dot{I}_d$$

$$=\dot{E}_q-j(X_d-X_q)\dot{I}_d-jX_q\dot{I}$$

为了能用一个等值电路来代表凸极同步电机，引入一虚拟电势 $\dot{E}_Q$ 。

$$\dot{E}_Q=\dot{E}_q-j(X_d-X_q)\dot{I}_d$$

方程式简化为：

$$\dot{V} = \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d - jX_q\dot{I}$$

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - jX_q\dot{I}$$

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d$$

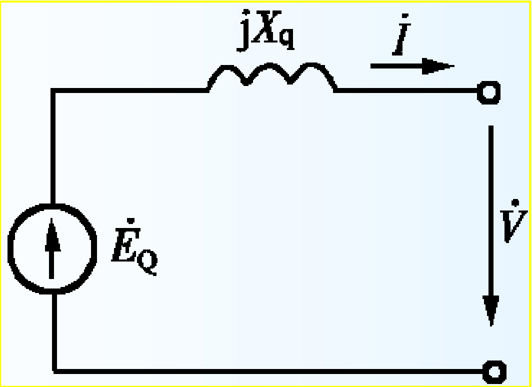
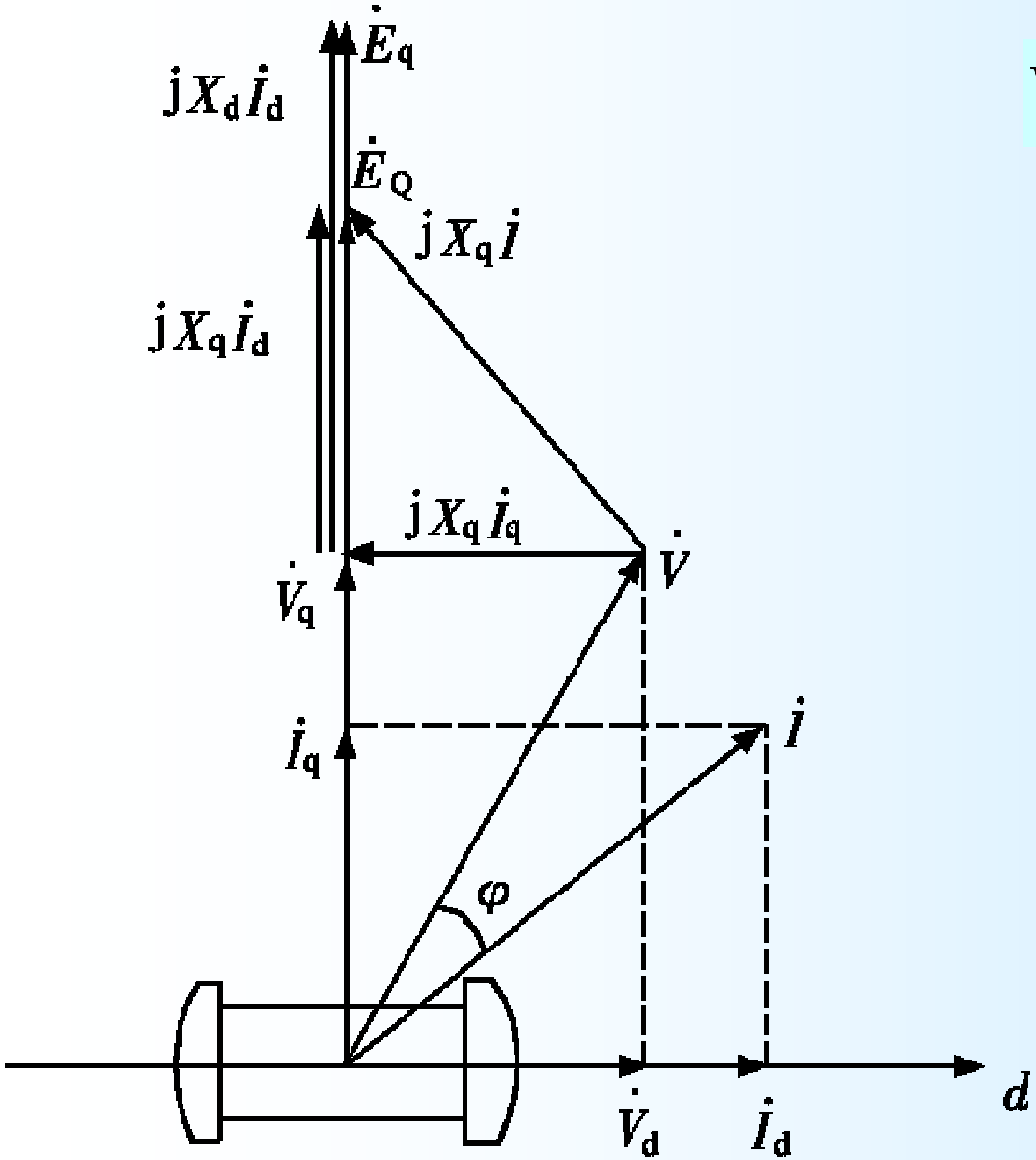


图2-14 等值隐极机电路

同步电机稳态运行相量图如图所示。



$$\dot{V} = \dot{E}_q - jX_q\dot{I}_q - jX_d\dot{I}_d$$
$$= \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d - jX_q\dot{I}$$

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d$$

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - jX_q\dot{I}$$

图2-15 同步电机稳态运行相量图

例2

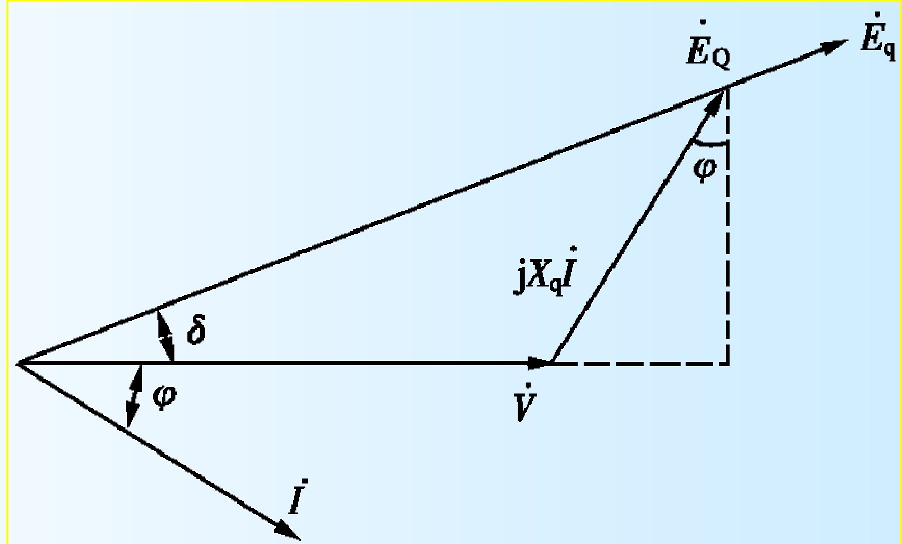


图**2-16** 电势相量图

(1)先计算$\boldsymbol{E}_{\mathbf{Q}}$;

(2) 确定$\dot{E}_Q$的相位;

(3) 计算电流和电压的两个轴向分量;

(4) 计算空载电势$\boldsymbol{E}_{\mathbf{q}}$。

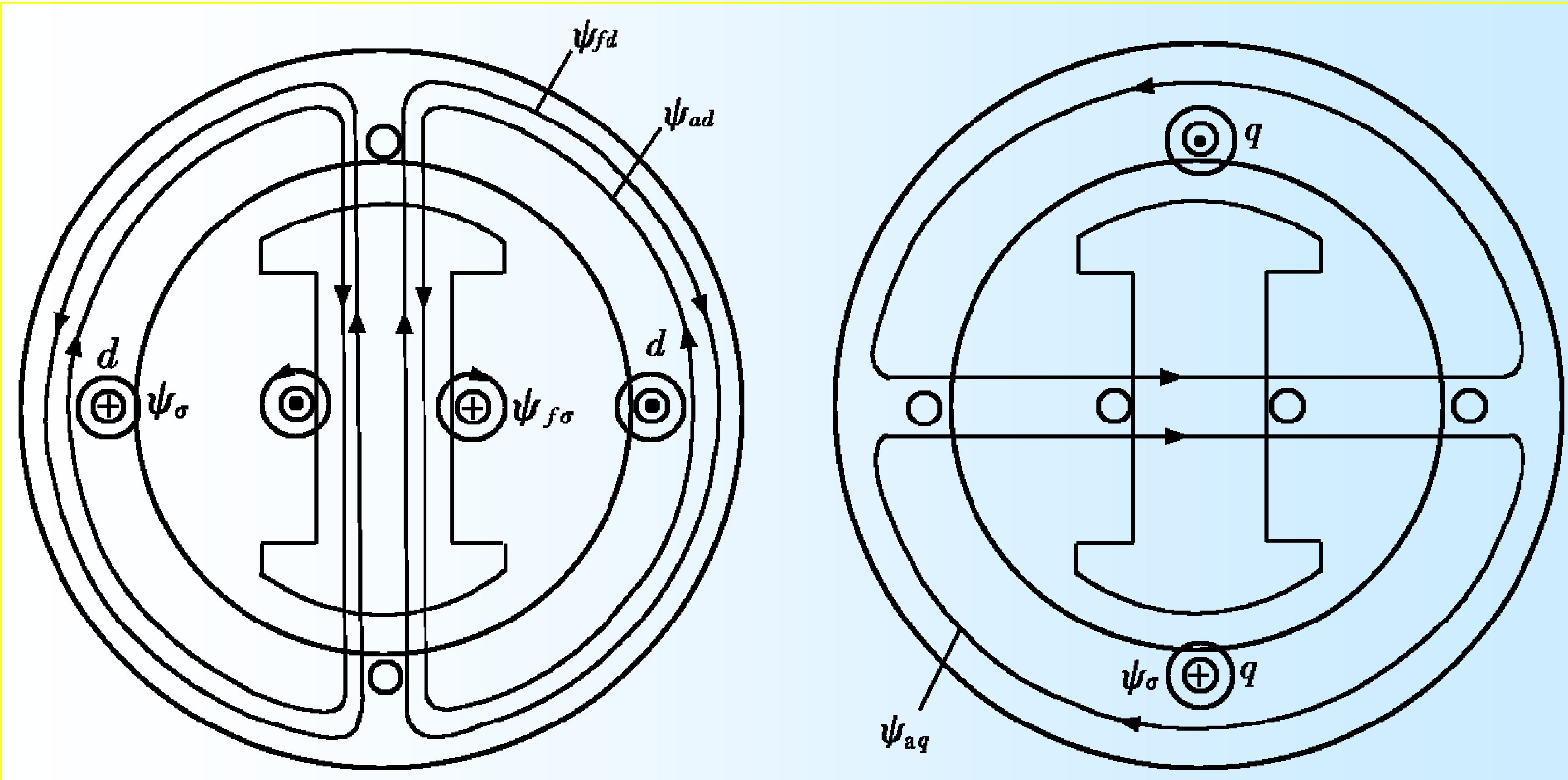
2.2 同步电机的三相短路

一、突然短路暂态过程的特点

• 对称稳态运行时，电枢磁势的大小不随时间而变化，在空间以同步速度旋转，它同转子没有相对运动，因此不会在转子绕组中感应电流。

• 突然短路时，定子电流在数值上发生急剧变化，电枢反应磁通也随着变化，并在转子绕组中感应电流，这种电流又反过来影响定子电流的变化。这种定子和转子绕组电流的互相影响就是突然短路暂态过程的特点。

二、无阻尼绕组同步电机突然三相短路的物理分析



(a) (b)

图2-17　无阻尼绕组同步发电机正常稳态运行时磁链分解示意图

1、 超导体闭合回路磁链守恒原则

（1）超导体：电阻为零的导体。

（2）超导体磁链守恒原则：超导体回路能永久维持磁链不变。

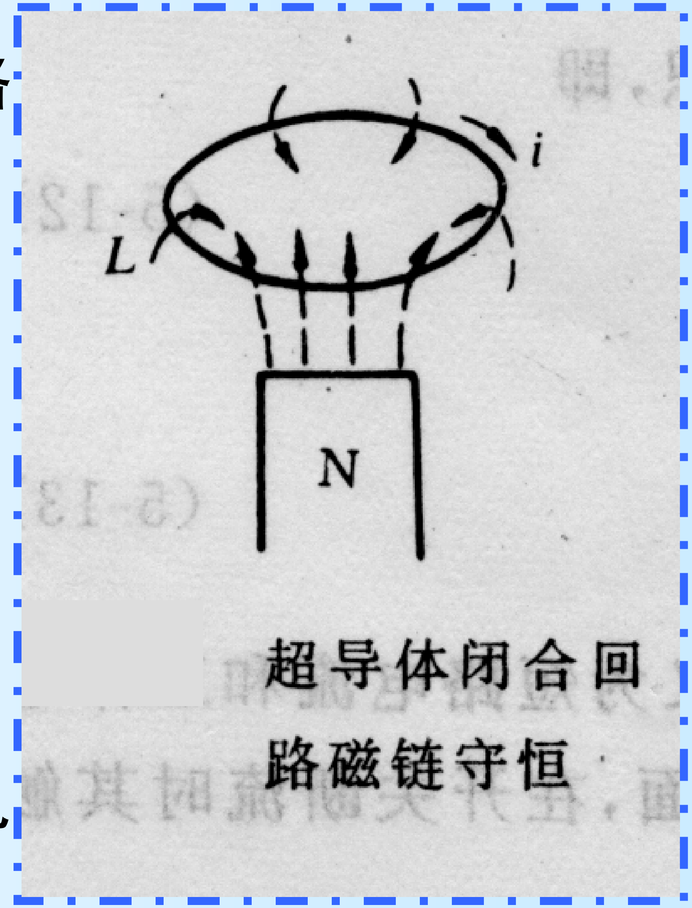
（3）超导体磁链守恒原则的数学描述：

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri = 0$$

若回路为超导体，则R=0，便有

$$\frac{d\psi}{dt} = 0, 即\ \psi = 常数$$

（4）同步电机的各种绕组的电阻相对电抗来说很小，在分析时假定电阻为零，即作为超导体闭合回路来分析。



短路瞬间，外接阻抗减小

产生定子基频电流增量 Δi_{ω}

电枢反应增强，转子磁链减小

为保持磁链守恒，转子中产生自由直流分量 Δi_{fa}

定子绕组产生自由基频电流分量 $\Delta i'_{\omega}$

电枢反应增强，定子磁链增大

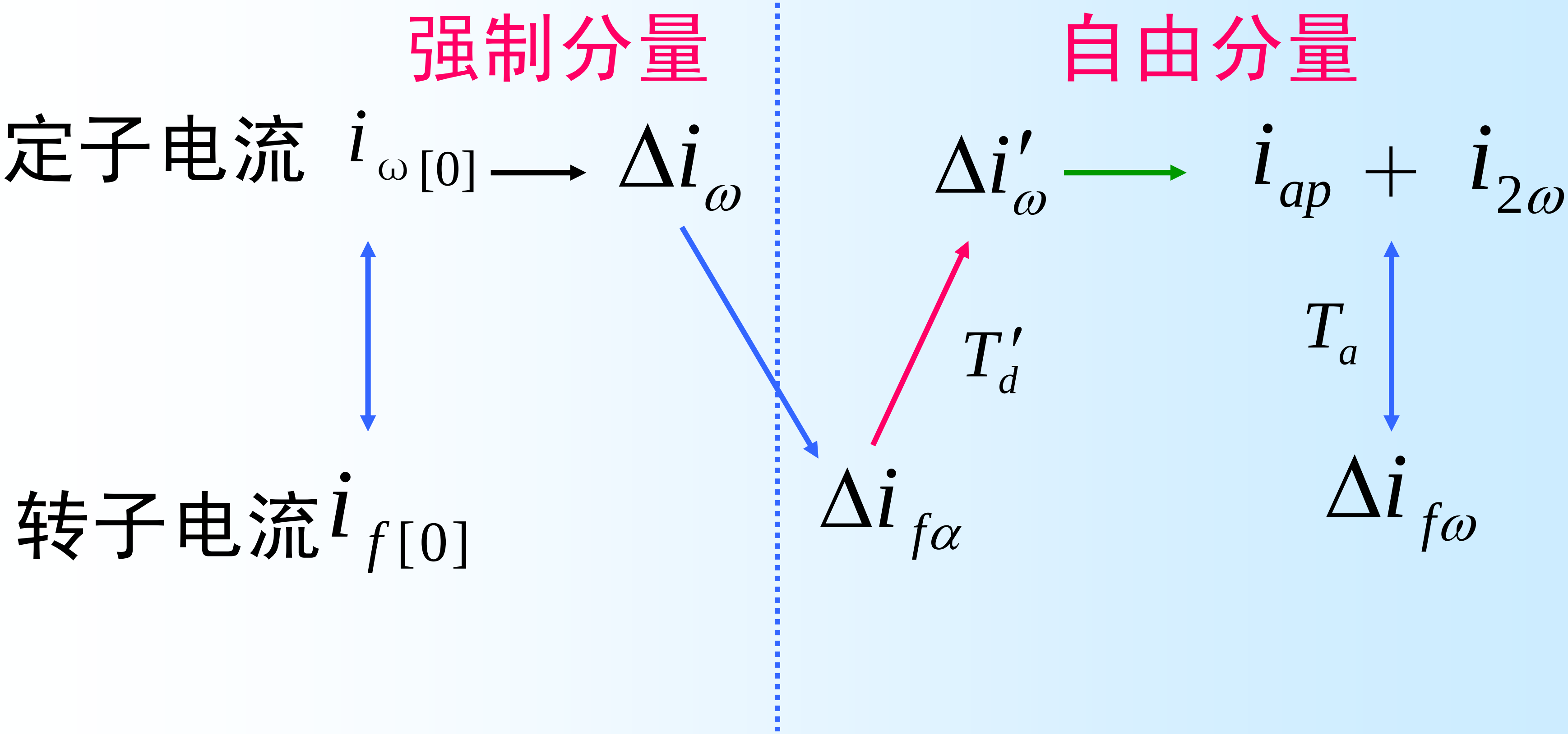
定子直流分量

转子基频分量 $\Delta i_{f\omega}$

恒定直流 i_{ap}

倍频分量 $i_{2\omega}$

产生的脉动磁链分解为正反两个方向以同步速旋转的磁链



定子和转子电流的相互关系示意图

三、同步发电机的暂态电势和暂态电抗

➢无阻尼绕组同步电机的磁链平衡方程

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{ad} i_f$$
$$= -X_{\sigma a} i_d + X_{ad}(i_f - i_d)$$

$$\psi_q = -X_q i_q$$

$$\psi_f = -X_{ad} i_d + X_f i_f$$
$$= X_{ad}(i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f$$

$$\left.\begin{aligned}
\psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\
\psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\
\psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q
\end{aligned}\right\}$$

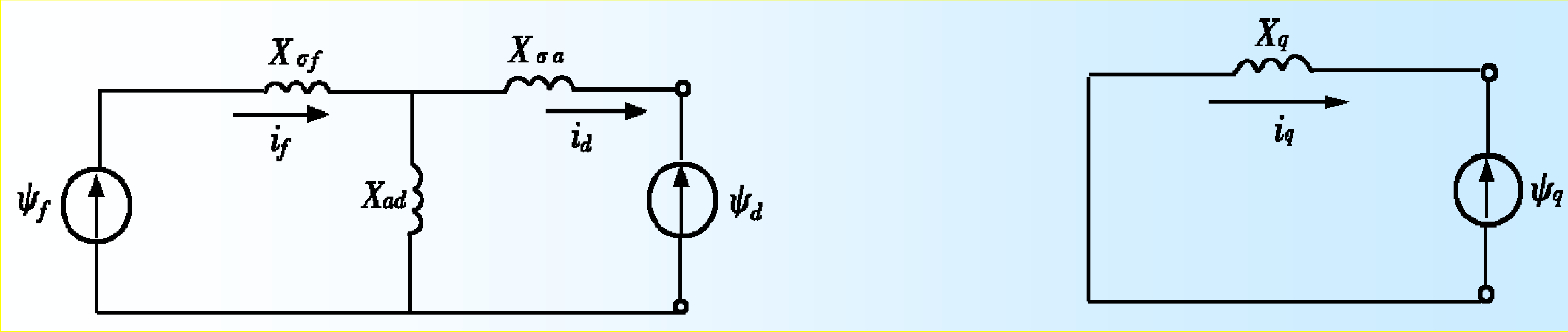
$$\left.\begin{aligned}
X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\
X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\
X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\
X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\
X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq}
\end{aligned}\right\}$$

电路图

$$\psi_d = -X_{\sigma a} i_d + X_{ad}(i_f - i_d)$$

$$\psi_f = X_{ad}(i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f$$

$$\psi_q = -X_q i_q$$



(a) (b)

图2-18　无阻尼绕组发电机的磁链平衡等值电路

（a）纵轴向　　（b）横轴向

$$\psi_d = -X_{\sigma a} i_d + X_{ad}(i_f - i_d)$$

$$\psi_f = X_{ad}(i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f$$

消去i_f

$$\psi_d = \frac{X_{ad}}{X_f}\psi_f - (X_d - \frac{X^2_{ad}}{X_f})i_d$$

$$= \frac{X_{ad}}{X_f}\psi_f - (X_{\sigma a} + \frac{X_{\sigma f} X_{ad}}{X_{\sigma f} + X_{ad}})i_d$$

如果定义：

$$E'_q = \frac{X_{ad}}{X_f}\psi_f$$ 暂态电势，不突变

$$X'_d = X_{\sigma a} + \frac{X_{\sigma f} X_{ad}}{X_{\sigma f} + X_{ad}}$$ 暂态电抗

则

$$\psi_d = E'_q - X'_d i_d$$

当变压器电势 $\dot{\psi}_d=\dot{\psi}_q=0$ 时，忽略电阻则有：

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{v_d} &= \dot{\psi}_d-\psi_q-\boldsymbol{Ri_d} \\ \boldsymbol{v_q} &= \dot{\psi}_q+\psi_d-\boldsymbol{Ri_q} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} \psi_d &= \boldsymbol{v_q} \\ \psi_q &= -\boldsymbol{v_d} \end{aligned}$$

$$\psi_d = E_q' - X_d' i_d$$

$$\psi_q = -X_q i_q$$

$$\Downarrow$$

$$\left.\begin{aligned} v_q &= E_q' - X_d' i_d \\ v_d &= X_q i_q \end{aligned}\right\}$$

$$v_q = E_q' - X_d' i_d \qquad\qquad v_d = X_q i_q$$

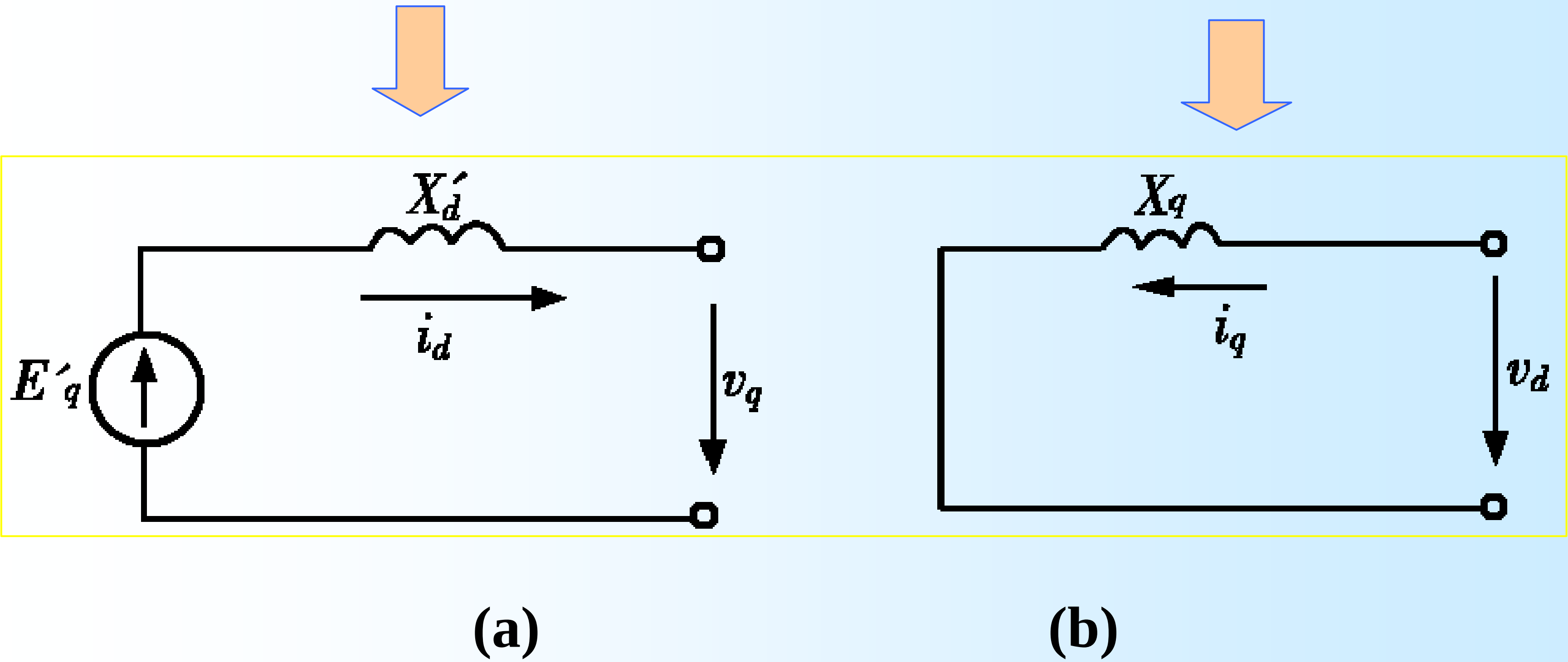


图2-19　用暂态参数表示的同步发电机等值电路

（a）纵轴向　（b）横轴向

相量形式

$$\left.\begin{aligned} v_q &= E'_q - X'_d i_d \\ v_d &= X_q i_q \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left.\begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}'_q - jX'_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned}\right\}$$

两个方程相加可得：

$$\dot{V} = \dot{E}'_q - jX_q \dot{I}_q - jX'_d \dot{I}_d$$

令

$$\dot{E}' = \dot{E}'_q - j(X_q - X'_d)\dot{I}_q$$

于是

$$\dot{V} = \dot{E}' - jX'_d \dot{I}$$

$$\dot{V} = \dot{E}' - jX'_d\dot{I}$$

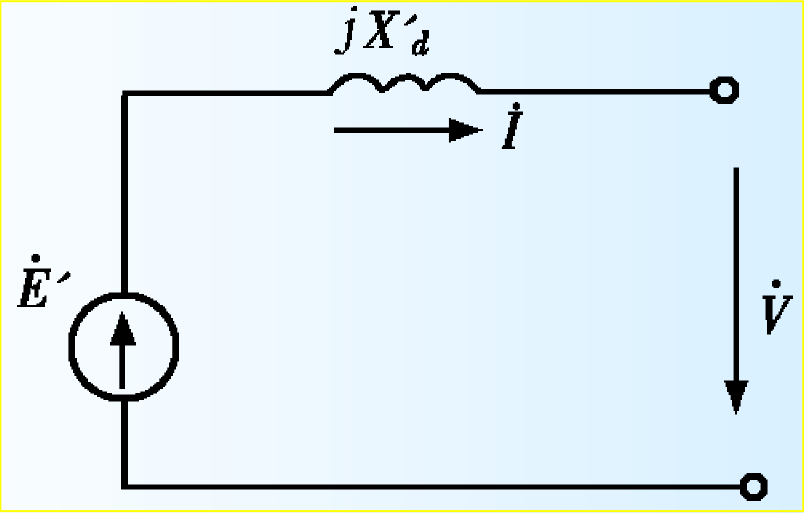


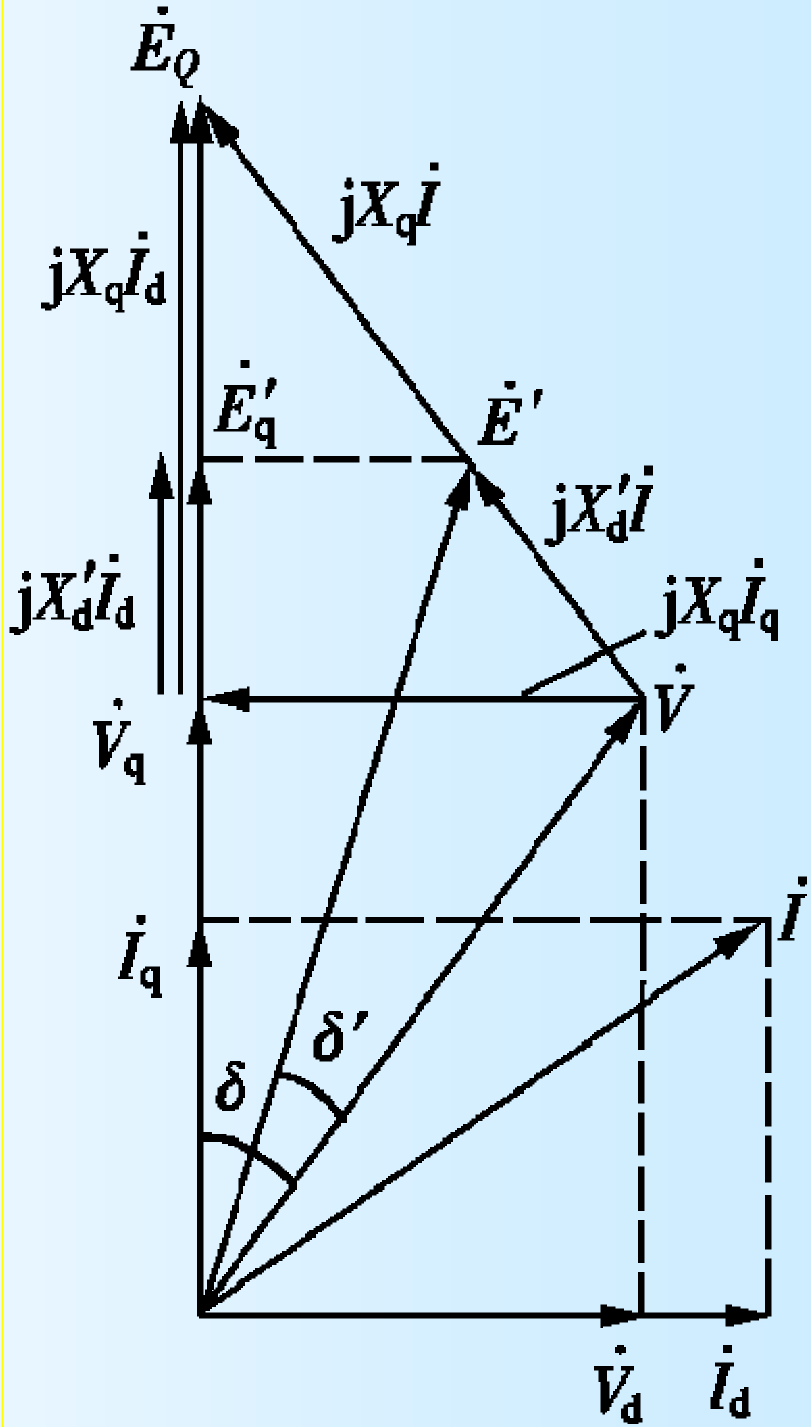
图2-20 用E' 和 X'_d 表示的同步发电机的等值电路

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - jX_q\dot{I}$$

$$\dot{V} = \dot{E}'_q - jX_q\dot{I}_q - jX'_d\dot{I}_d$$

$$\dot{E}' = \dot{E}'_q - j(X_q - X'_d)\dot{I}_q$$

$$\dot{V} = \dot{E}' - jX'_d\dot{I}$$



同步电机相量图

例3

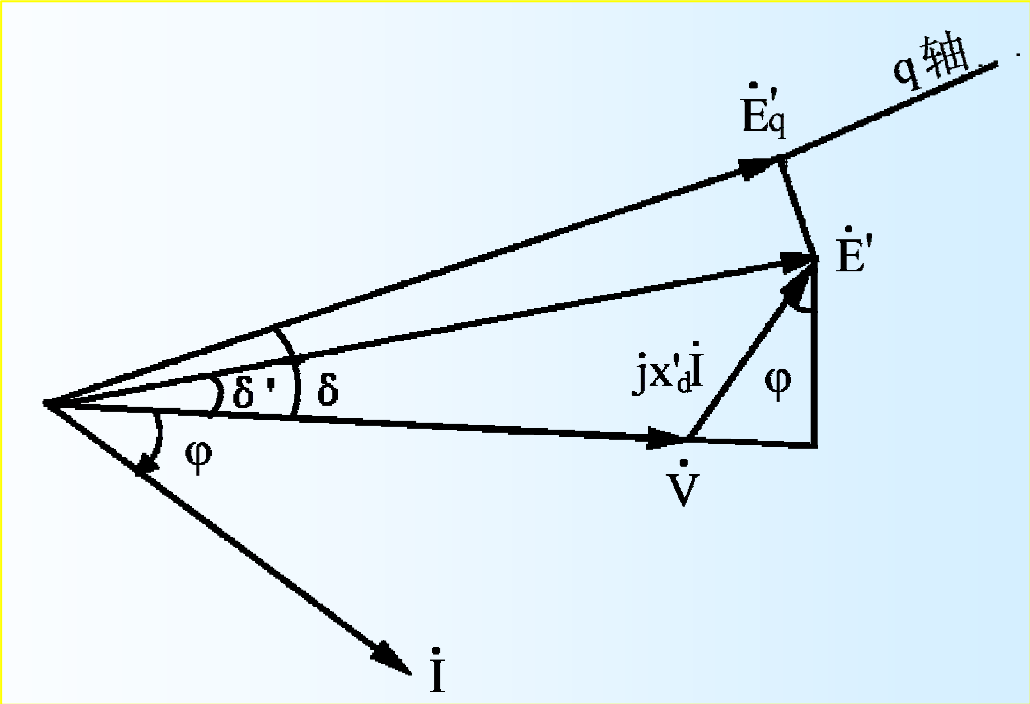


图2-21　例3的电势相量图

四、同步发电机的次暂态电势和次暂态电抗

$$\left.\begin{aligned}
\psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\
\psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\
\psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\
\psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q
\end{aligned}\right\}
\qquad
\left.\begin{aligned}
X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\
X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\
X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\
X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\
X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq}
\end{aligned}\right\}$$

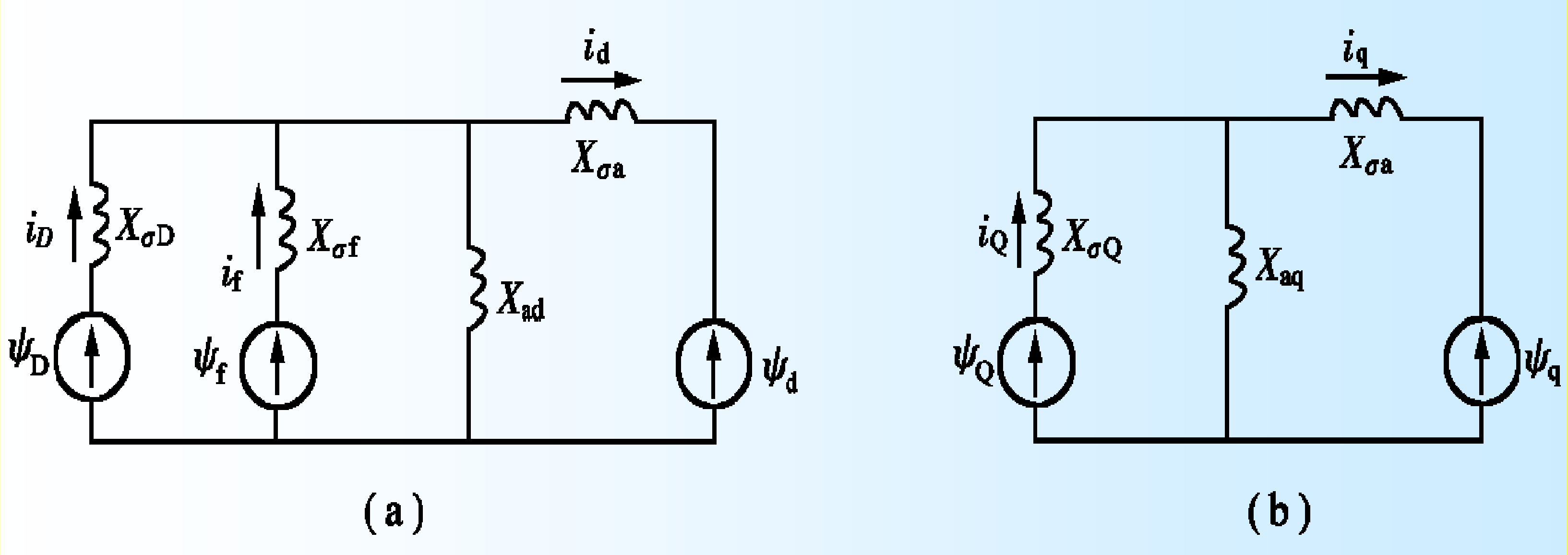
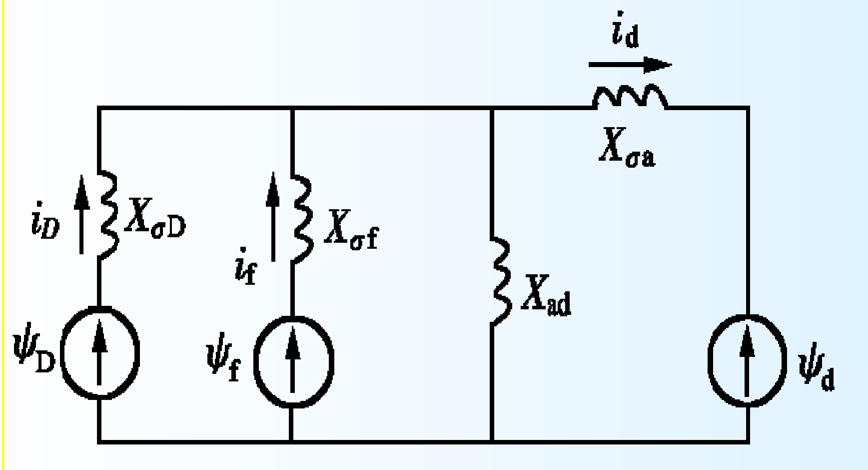


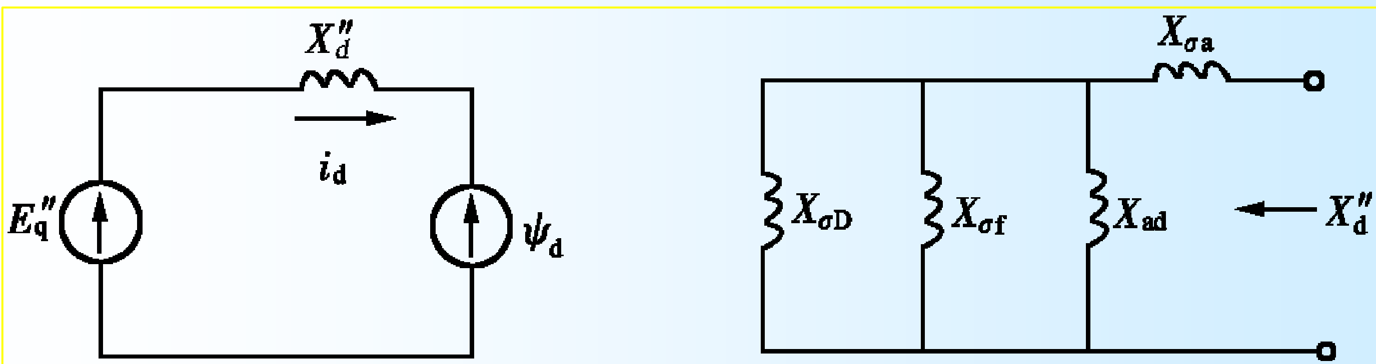
图2-22　有阻尼绕组电机的磁链平衡等值电路

(a) 纵轴向　　　(b) 横轴向

纵轴方向



用戴维南等值定理进行简化

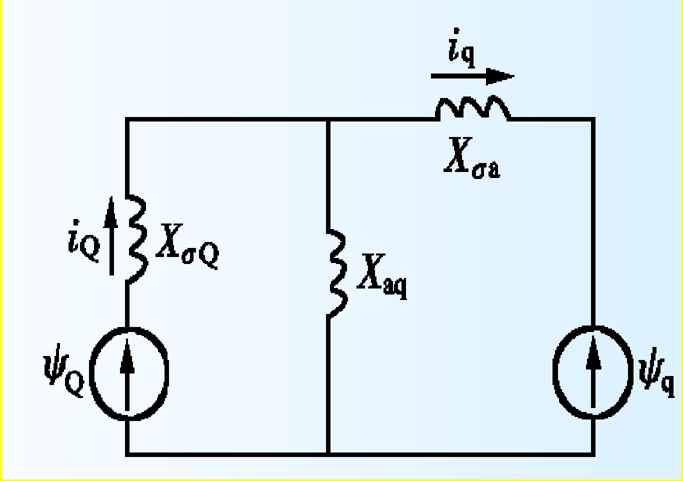


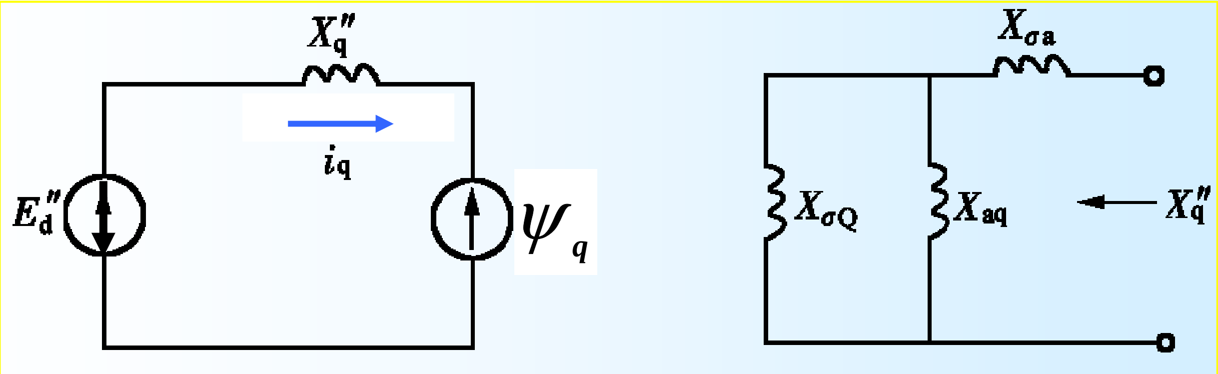
(a) (b)

$$E''_q = \frac{\dfrac{\psi_f}{X_{\sigma f}} + \dfrac{\psi_D}{X_{\sigma D}}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{\sigma f}} + \dfrac{1}{X_{\sigma D}}}$$

$$X''_d = X_{\sigma a} + \frac{1}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{\sigma f}} + \dfrac{1}{X_{\sigma D}}}$$

横轴方向

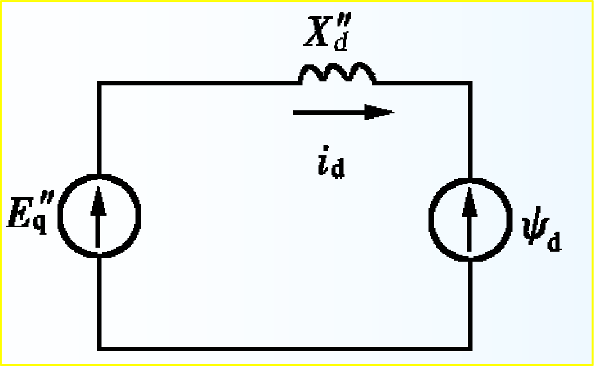


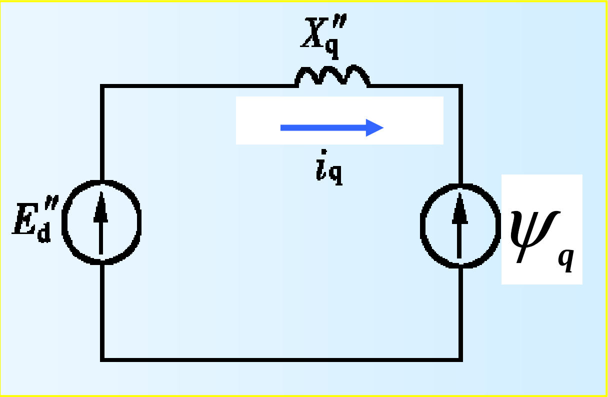


(a) (b)

$$E''_d = -\frac{\dfrac{\psi_Q}{X_{\sigma Q}}}{\dfrac{1}{X_{\sigma Q}} + \dfrac{1}{X_{aq}}}$$

$$X''_q = X_{\sigma a} + \frac{1}{\dfrac{1}{X_{\sigma Q}} + \dfrac{1}{X_{aq}}}$$





$$\left.\begin{aligned}\psi_d &= E''_q - X''_d i_d \\ -\psi_q &= E''_d + X''_q i_q\end{aligned}\right\}$$

当电机处于稳态或忽略变压器电势时（忽略电阻）：

$$\psi_d = v_q, \qquad -\psi_q = v_d$$

便得定子电势方程：

$$\left.\begin{aligned}v_q &= E''_q - X''_d i_d \\ v_d &= E''_d + X''_q i_q\end{aligned}\right\}$$

用交流相量的形式写成：

$$\left.\begin{aligned} v_q &= E''_q - X''_d i_d \\ v_d &= E''_d + X''_q i_q \end{aligned}\right\}$$

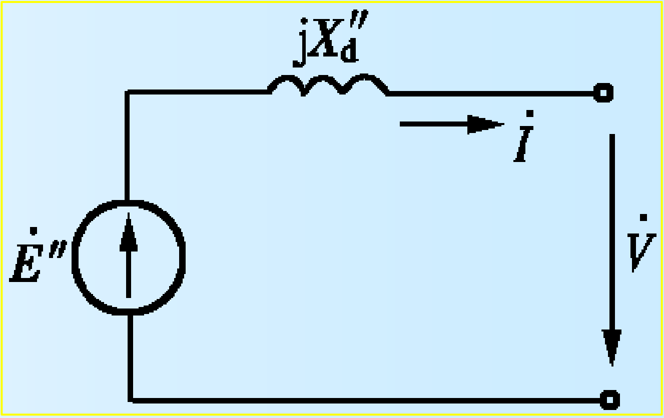
$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_q &= E''_q - jX''_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= \dot{E}''_d - jX''_q \dot{I}_q \end{aligned}\right\}$$

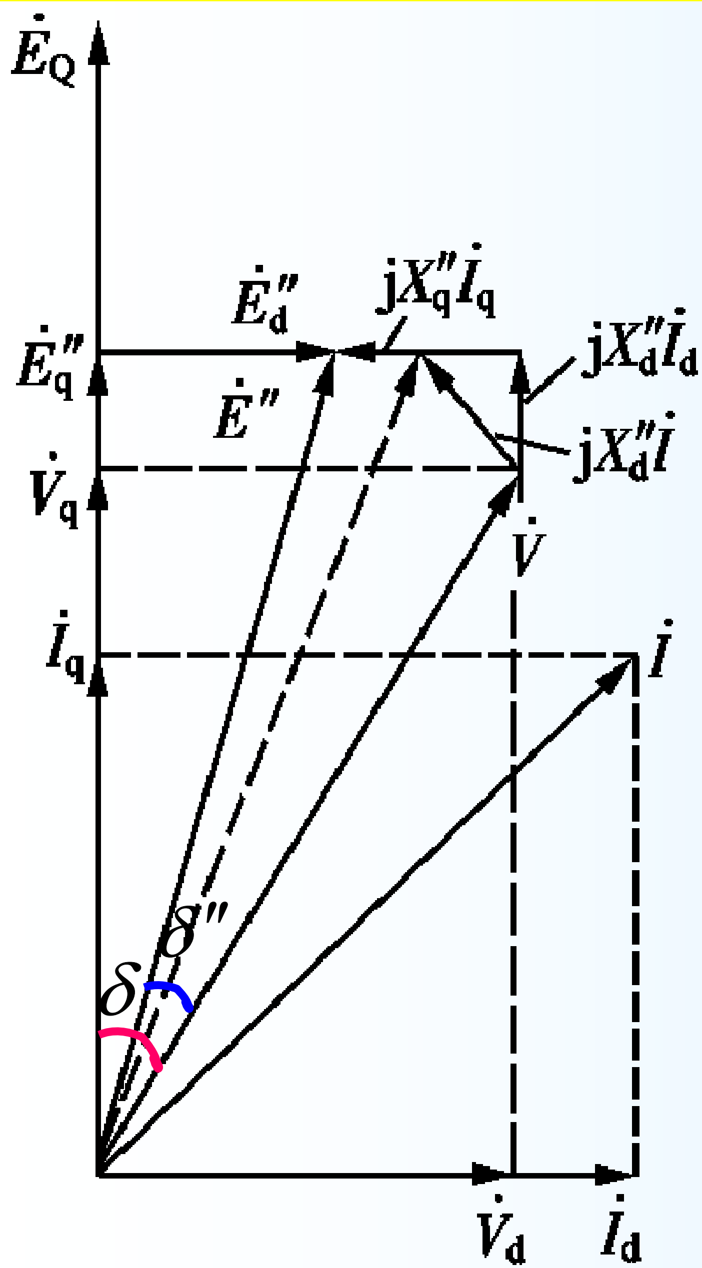
两式相加：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (\dot{E}''_q + \dot{E}''_d) - jX''_d \dot{I}_d - jX''_q \dot{I}_q \\ &= \dot{E}'' - jX''_d \dot{I}_d - jX''_q \dot{I}_q \end{aligned}$$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX''_d \dot{I} - j(X''_q - X''_d)\dot{I}_q$$

略去第三项 ： $\dot{V} = \dot{E}'' - jX''_d \dot{I}$





$$\dot{V} = (\dot{E}_q'' + \dot{E}_d'') - jX_d''\dot{I}_d - jX_q''\dot{I}_q$$
$$= \dot{E}'' - jX_d''\dot{I}_d - jX_q''\dot{I}_q$$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d''\dot{I} - j(X_q'' - X_d'')\dot{I}_q$$

图2-23　同步电机相量图

例4

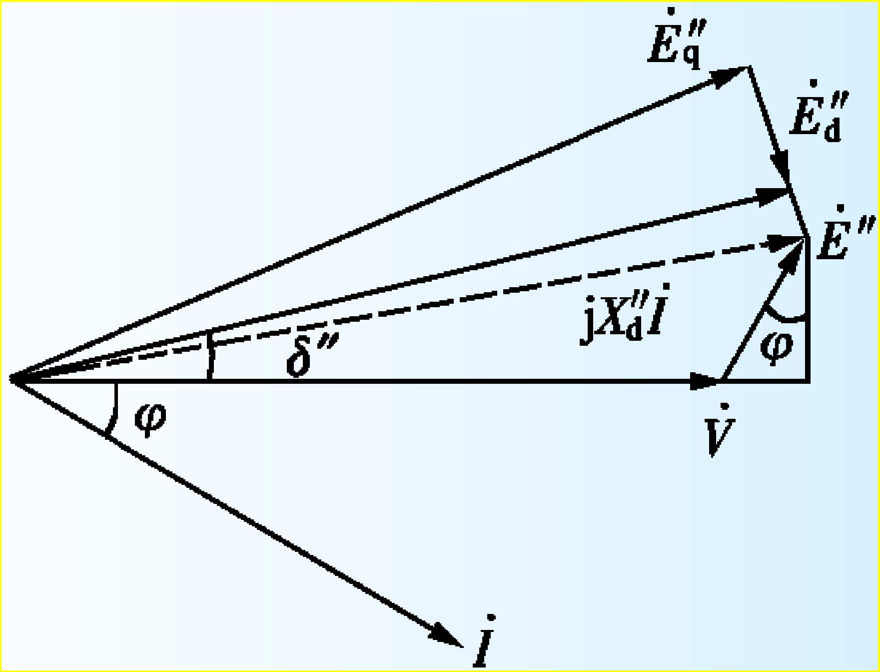


图**2-24**　电势相量图