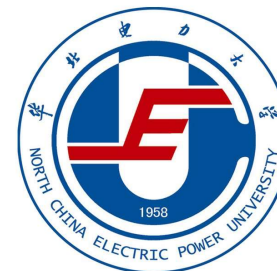


即将直播授课



- 下载腾讯课堂学生端APP：
<https://ke.qq.com/s>
- 扫码进课
- 也可以看回放
- 进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：
我的一最近看过—刘崇茹的课堂
- 请将昵称改为：**学号姓名**

空载情况下的突然三相短路

- 定子短路电流分量
- 励磁回路电流分量
- 阻尼回路电流分量

超导体闭合回路磁链守恒原理

- 没有电阻的闭合回路又称为超导体闭合回路。
- 没有电阻的闭合线圈的磁链永远等于突然短路一开始时它所交链的磁链 Ψ_0 。
- 如果这时外部有磁链企图与该超导体线圈相链，那么，线圈中就要产生一个电流分量，该电流分量产生的磁链始终与外来磁链的大小相等、方向相反，以使链着线圈的总磁链保持不变。

定子短路电流分量

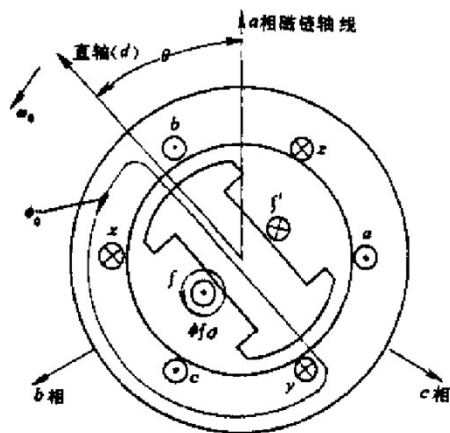
短路前，由于转子磁场旋转，形成的定子所匝绕的磁链是交变的，记为 Ψ_{a0} ， Ψ_{b0} ， Ψ_{c0} (P5页)；

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{a0} &= \Psi_0 \cos \theta \\ \Psi_{b0} &= \Psi_0 \cos(\theta - 120^\circ) \\ \Psi_{c0} &= \Psi_0 \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

短路瞬间，假设直轴与a轴的夹角为 θ_0 ，那么此刻定子所匝绕的磁链记为 $\Psi_{a|0|}$ ， $\Psi_{b|0|}$ ， $\Psi_{c|0|}$
(这是关键，因为磁链将保持在该值不变)；

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{a|0|} &= \Psi_0 \cos \theta_0 \\ \Psi_{b|0|} &= \Psi_0 \cos(\theta_0 - 120^\circ) \\ \Psi_{c|0|} &= \Psi_0 \cos(\theta_0 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

短路后，转子磁场继续旋转，



$$\left. \begin{aligned} \Psi_{a0} &= \Psi_0 \cos \theta \\ \Psi_{b0} &= \Psi_0 \cos(\theta - 120^\circ) \\ \Psi_{c0} &= \Psi_0 \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

所以定子绕组中感应出磁链，记为 Ψ_{ai} ， Ψ_{bi} ， Ψ_{ci} ；

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ai} + \Psi_{a0} &= \Psi_{a|0|} \\ \Psi_{bi} + \Psi_{b0} &= \Psi_{b|0|} \\ \Psi_{ci} + \Psi_{c0} &= \Psi_{c|0|} \end{aligned} \right\}$$

定子短路电流分量

所以定子绕组中感应出磁链，记为 Ψ_{ai} , Ψ_{bi} , Ψ_{ci} ；

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ai} + \Psi_{a0} &= \Psi_{a|0|} \\ \Psi_{bi} + \Psi_{b0} &= \Psi_{b|0|} \\ \Psi_{ci} + \Psi_{c0} &= \Psi_{c|0|} \end{aligned} \right\}$$

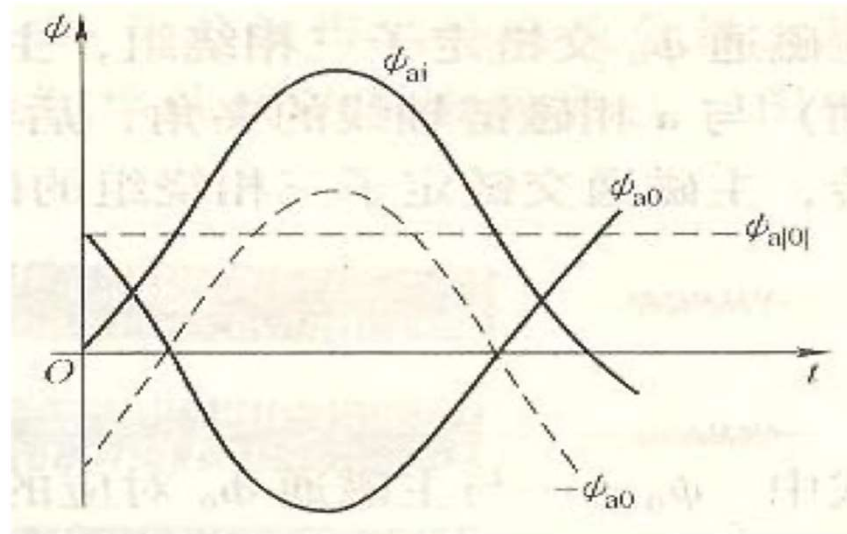
交流磁链 + 直流磁链



基频交流电流



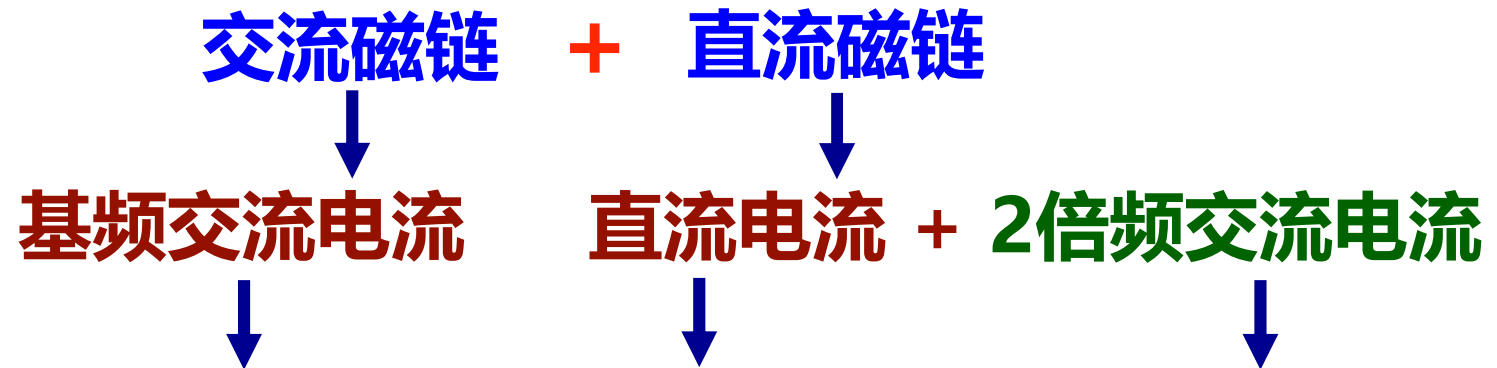
直流电流 + 2倍频交流电流



三相直流电流在空间形成一个静止的磁势，而转子的旋转使这个磁势所扫过的磁路的磁阻不同，周期为180电角度，频率为基频的两倍。为了产生恒定的磁链，直流电流会出现二倍频分量。

励磁回路电流分量

- 短路前，定子空载，转子只有恒定的励磁电流；
- 定子空载短路后：



定子的交流分量形成一个旋转磁场，会在转子中感应出直流电流分量，以抵消定子基频交流分量对转子绕组的影响。

定子的直流分量和定子的倍频分量形成的磁场相对于转子以同步速旋转的磁场，感应出励磁电流交流分量。

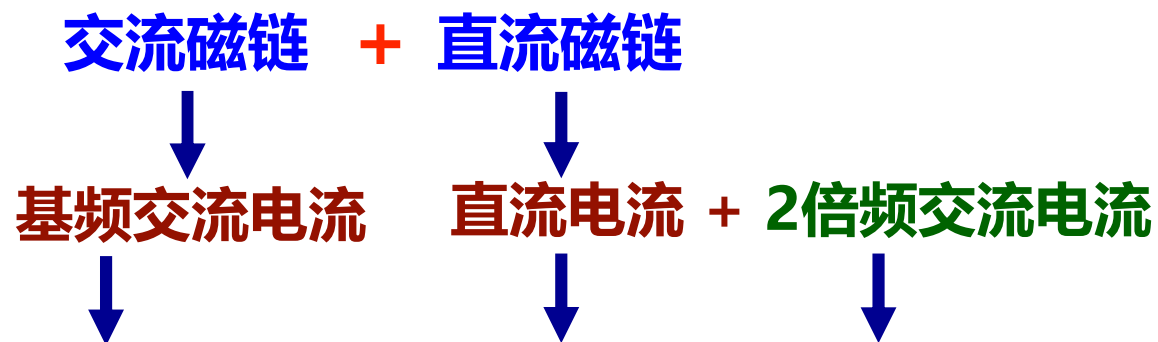
阻尼回路电流分量——阻尼的概念

- **什么是发电机阻尼？**
 - 凸极同步发电机转子磁极上两端短接的阻尼条
 - 隐极机实心转子铁中涡流回路
- **在正常运行时是没有电流的，而在暂态过程中会产生感应电流。**
- **为了分析简便，一般将阻尼条构成的回路和铁芯中涡流回路等效为两个绕组：**
 - **D轴阻尼绕组：与励磁绕组同轴向**
 - **Q轴阻尼绕组：轴向与励磁绕组垂直并领先90度**

阻尼回路电流分量

- 短路前，定子空载，阻尼绕组没有电流；

- 定子空载短路后：



定子的交流分量形成一个旋转磁场，因为是以同步速旋转，所以相对于转子是静止的。由电机学知识知道，这个合成旋转磁场为去磁磁场，这个突然产生的去磁磁场会在D轴阻尼绕组中感应出直流电流分量，以抵消定子基频交流分量对D轴阻尼绕组的影响。

定子的直流分量在转子看来是一个以同步速旋转的磁场（假设该磁场是顺时针旋转的）；定子的倍频分量在转子看来是又一个以同步速旋转的磁场（那么该磁场则是逆时针旋转的）；相对于转子以同步速旋转的磁场，会在阻尼绕组中感应出交流分量。

定子和转子回路电流分量对应关系

- 转子回路：是指励磁和阻尼回路的统称
- 由于定子与转子绕组都是有电阻的，因此电流都会衰减。
- 所有的衰减都是依直流分量而定的。

定子回路	稳态短路电流 I_{∞}	基频交流电流初始与稳态值之差 $I'' - I_{\infty}$	直流电流 i_a 二倍频电流 $i_{2\omega}$
励磁回路	励磁电流 $i_{f 0}$	自由直流电流 i_{fa}	基频交流电流 $i_{f\omega}$
阻尼回路D		自由直流电流 i_{Da}	基频交流电流 $i_{D\omega}$
阻尼回路Q		自由直流电流 $i_{Qa} \approx 0$	基频交流电流 $i_{Q\omega}$
		衰减的时间常数由转子回路决定：时间常数 T'_d, T''_d	衰减的时间常数由定子回路决定：时间常数 T_a

发电机空载短路时，定子电流分量与转子电流分量表述正确的是：

- A 定子绕组会出现基频交流电流、直流电流和二倍频电流
- B 励磁绕组感应出基频交流电流和直流电流
- C 阻尼绕组感应出基频交流电流、直流电流和二倍频电流
- D 励磁绕组的直流分量最终会衰减到零

本课堂网络授课学习感受的调研

- A 我会提前预习相关知识
- B 我会复习相关内容
- C 讲课内容太快，我跟不上
- D 上课的时候我会睡着

Submit

课本内容的讲解顺序进行调整

- 第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程极端路电流的近似分析

- 一、空载时突然三相短路的电流波形
- 二、空载短路电流分析

超导体闭合线圈
磁链守恒定理

- 三、空载短路电流基频交流分量的初始和稳态有效值
- 四、空载短路电流的近似表达式
- 五、负载时短路电流基频交流分量初始值

- 第三节 同步发电机的基本方程

- 第四节 暂态参数及等效电路

- 第五节 次暂态参数和等效电路

- 第六节 同步发电机的三相短路电流

- 第七节 基本方程的拉普拉斯运算形式

调整讲解顺序

课本内容的讲解顺序进行调整

- 三、空载短路电流基频交流分量的初始和稳态有效值
- 四、空载短路电流的近似表达式
- 五、负载时短路电流基频交流分量初始值
- 第三节 同步发电机的基本方程
- 第四节 暂态参数及等效电路
- 第五节 次暂态参数和等效电路
- 第六节 同步发电机的三相短路电流
- 第七节 基本方程的拉普拉斯运算形式

同步发电机的基本方程
(派克变换)



基本方程的拉式变换表达

应用实例

之一：发电机运行向量图

之二：发电机等值电路

之三：发电机短路电流计算

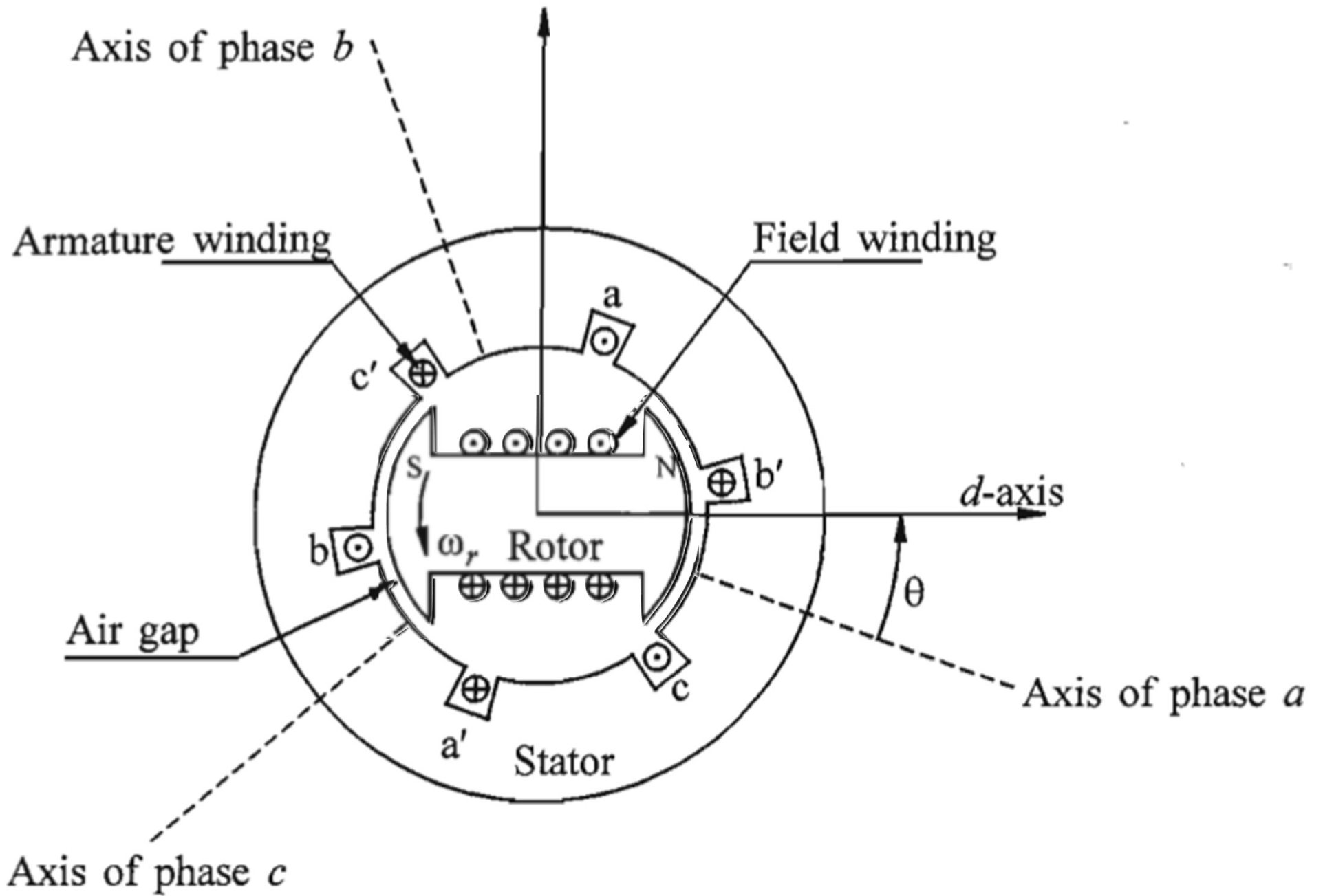
之四：发电机各电抗电势的比较

之五：发电机其他各时间常数

复习本节内容



发布随堂测验2试卷
8分钟



发电机变量的正方向

磁链正方向与绕组轴线的正方向相同 (定子abc, 转子dq)

转子

正方向电流 → **正方向磁链**

正方向电压 → **正方向电流**



正方向定义正好相反

定子

正方向电流 → **负方向磁链**

向负荷侧观察, 正方向电压 → **正方向电流**

向定子绕组侧观察, 正方向电压 → **负方向电流**

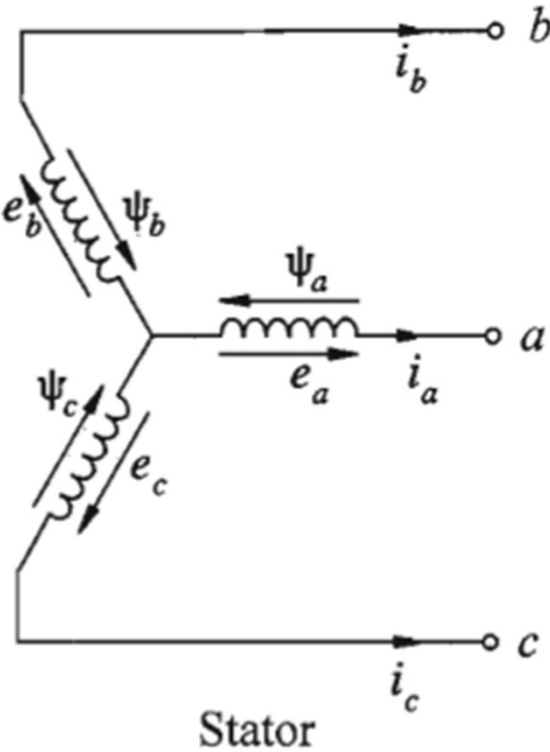
定子和转子的电流和电压正方向、电流和磁链正方向定义正好相反，那么：

- A 定子绕组电压和电流关系违反了欧姆定律
- B 定子绕组电流和磁链关系违反了右手定则
- C 正方向可以根据需要来确定，与物理定律无关
- D 以上都不对

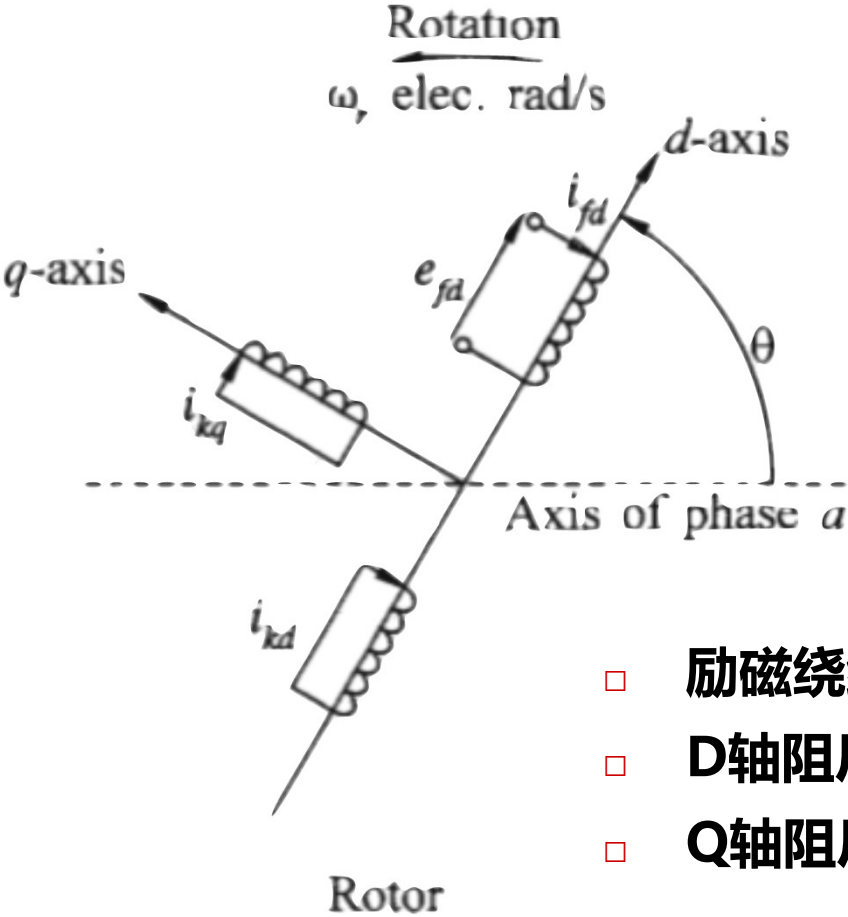
同步发电机的回路

- 发电机有六个回路

- 定子绕组



- 转子绕组



- 励磁绕组
- D轴阻尼绕组
- Q轴阻尼绕组

电压方程

电压方程是一组以时间的周期函数为系数的微分方程。

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ \dots \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & & & & & & & \\ & R & & & & & & \\ & & R & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & R_f & & & \\ & 0 & & & & R_D & & \\ & & & & & & R_Q & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dots \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{pmatrix}$$

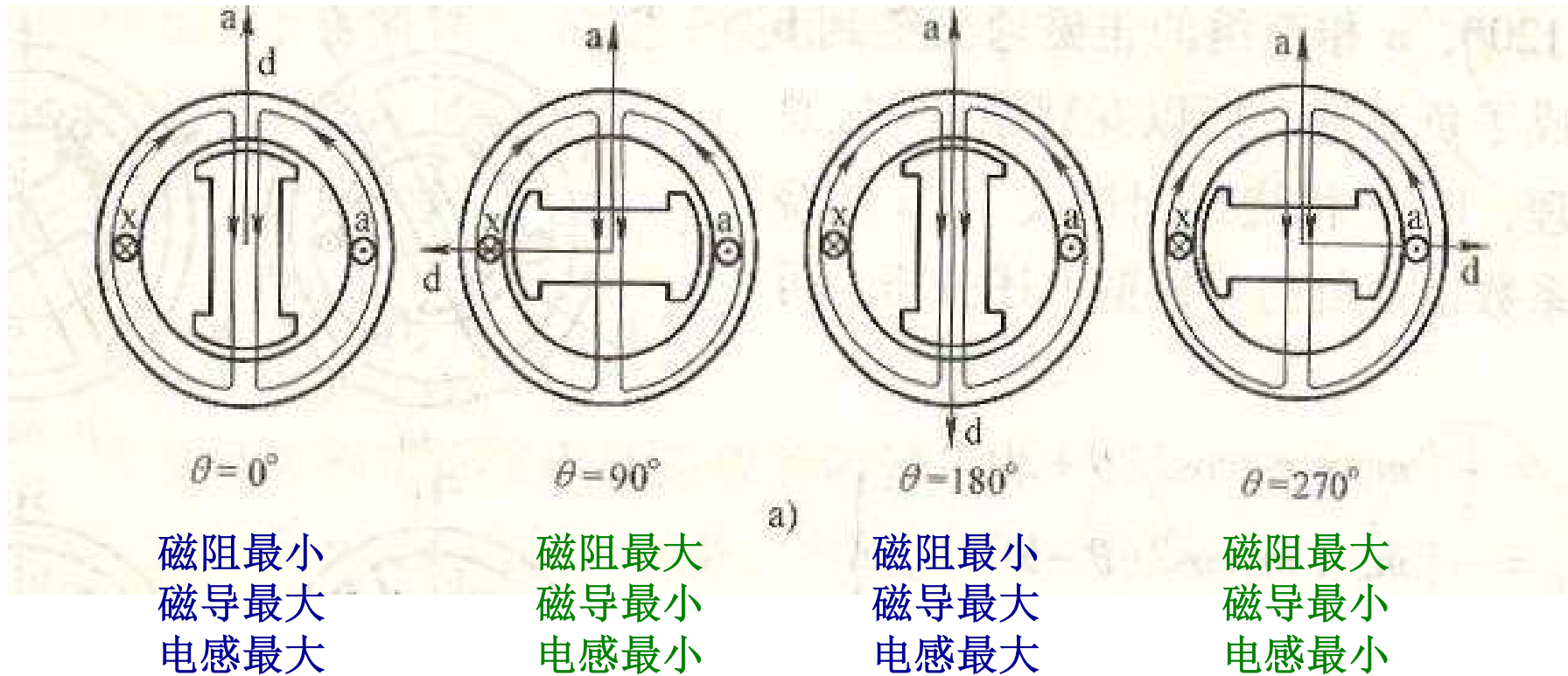
更正：教材P14页式 (1-13) 和式 (1-14) 有误，多了微分算子

磁链方程

- 各绕组的电感、互感系数由绕组结构和磁通路径确定，随磁通路径变化而变化。

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

定子各相绕组的自感系数



- 自感系数是 θ 角的周期函数，其变化周期是 π

$$L_{aa} = l_0 + l_2 \cos 2\theta + l_4 \cos 4\theta + \dots$$

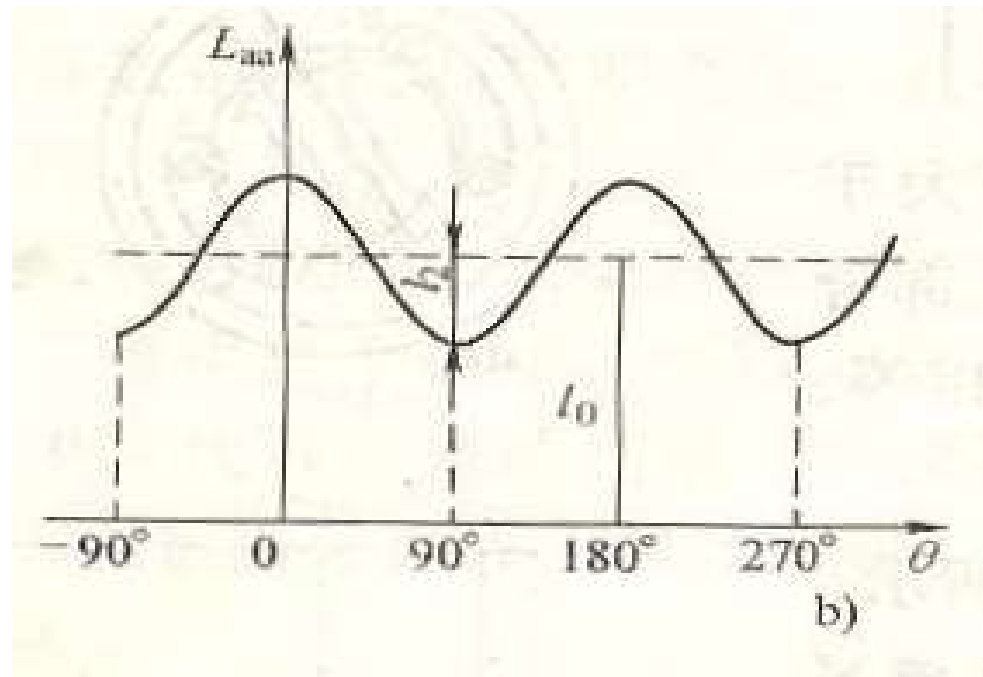
定子各相绕组的自感系数

- 略去其中4次及4次以上的高次谐波分量，有

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

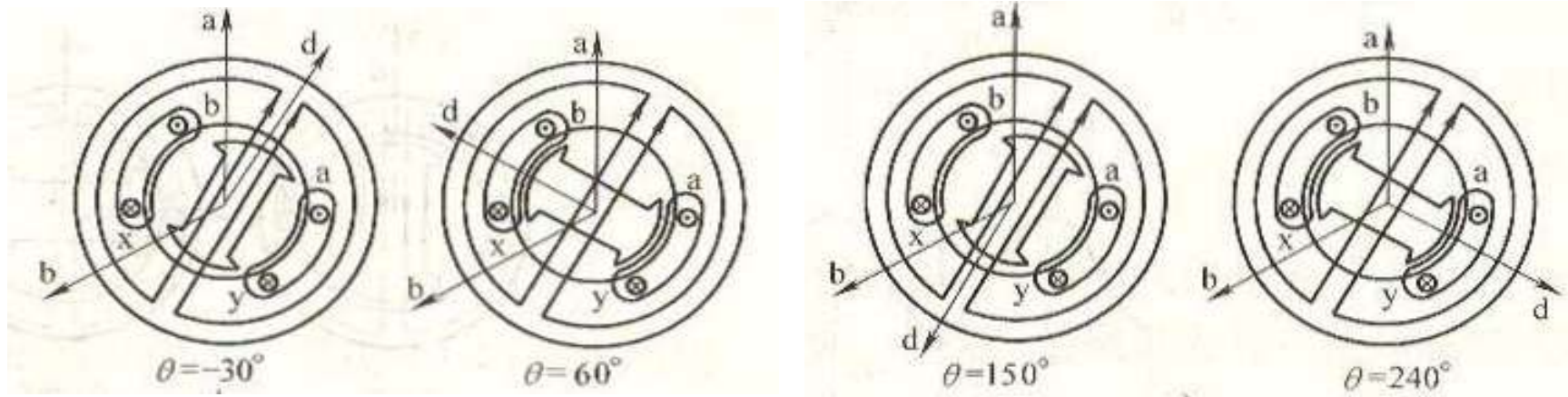
$$L_{bb} = l_0 + l_2 \cos 2(\theta - 120^\circ)$$

$$L_{cc} = l_0 + l_2 \cos 2(\theta + 120^\circ)$$



- 最大值？最小值？
 - 0度，180度： $L_{aa} = l_0 + l_2$
 - 90度，270度： $L_{aa} = l_0 - l_2$

定子各相绕组间的互感系数M



- 周期函数
- -30度时，磁路的磁阻最小，电感最大
- 是 θ 角的周期函数，其变化周期是 π

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

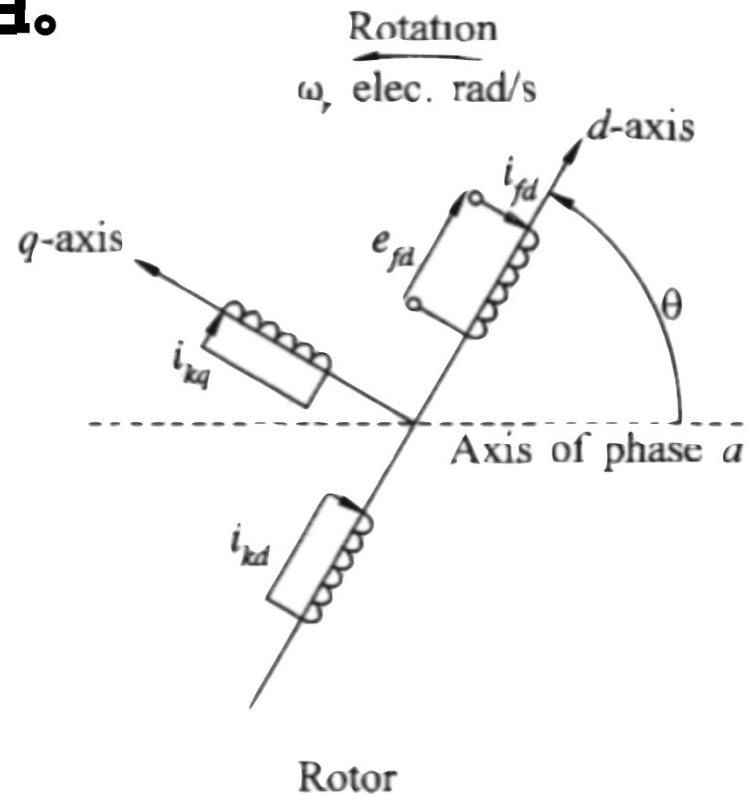
转子上各绕组的自感系数和互感系数

- 转子绕组的自感系数是常数
- D轴上的绕组磁通与Q轴绕组平行，不穿过（不匝绕）Q轴方向绕组。

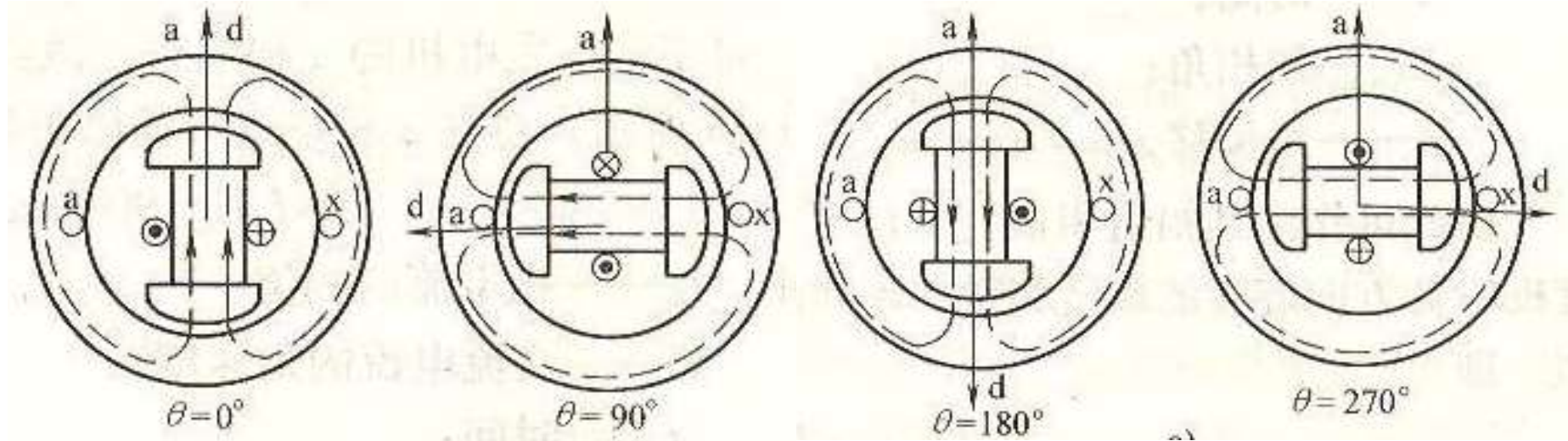
$$L_{ff} \quad L_{DD} \quad L_{QQ} \quad \text{常数}$$

$$M_{fD} = M_{Df} \quad \text{常数}$$

$$M_{fQ} = M_{Qf} = M_{DQ} = M_{QD} = 0$$



定子绕组和转子绕组间的互感系数



定子各相绕组与励磁绕组间的互感系数

定子各相绕组与D绕组间的互感系数

定子各相绕组与Q绕组间的互感系数

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

$$\left. \begin{aligned} M_{aD} &= M_{Da} = m_{aD} \cos \alpha \\ M_{bD} &= M_{Db} = m_{aD} \cos(\alpha - 120^\circ) \\ M_{cD} &= M_{Dc} = m_{aD} \cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} M_{aQ} &= M_{Qa} = -m_{aQ} \sin \alpha \\ M_{bQ} &= M_{Qb} = -m_{aQ} \sin(\alpha - 120^\circ) \\ M_{cQ} &= M_{Qc} = -m_{aQ} \sin(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

变系数微分方程

$$\begin{bmatrix} U_{abc} \\ U_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & \\ & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{abc} \\ \dot{\Psi}_{fDQ} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{abc} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} & M_{SR} \\ M_{RS} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix}$$

- 定子各相绕组的自感系数：**时变的！周期是 π**
- 定子各相绕组间的互感：**时变的！周期是 π**
- 转子上各绕组的自感系数和互感系数：**常数**
- 定子绕组和转子绕组间的互感系数：**时变的，周期是 2π**

变系数的微分方程？



发电机方程的特点

$$\begin{bmatrix} U_{abc} \\ U_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & \\ & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{abc} \\ \dot{\Psi}_{fDQ} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Psi_{abc} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} & M_{SR} \\ M_{RS} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix}$$

- 定子电磁变量是按三个相绕组（也就是对于空间静止不动的三相坐标系）列写的。
- 转子各绕组的电磁变量则是对于随转子一起旋转的d,q两相坐标系列写的。
- 磁链方程式中出现变系数，主要原因是：
 - 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。
 - 转子在磁路分别对于d轴和q轴对称而不是随意对称的，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。

求解的途径

$$\begin{bmatrix} U_{abc} \\ U_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & \\ & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_{abc} \\ \dot{\psi}_{fDQ} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \psi_{abc} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} & M_{SR} \\ M_{RS} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{abc} \\ I_{fDQ} \end{bmatrix}$$

能不能想想办法

变系数的微分方程? \longrightarrow 常系数的微分方程!

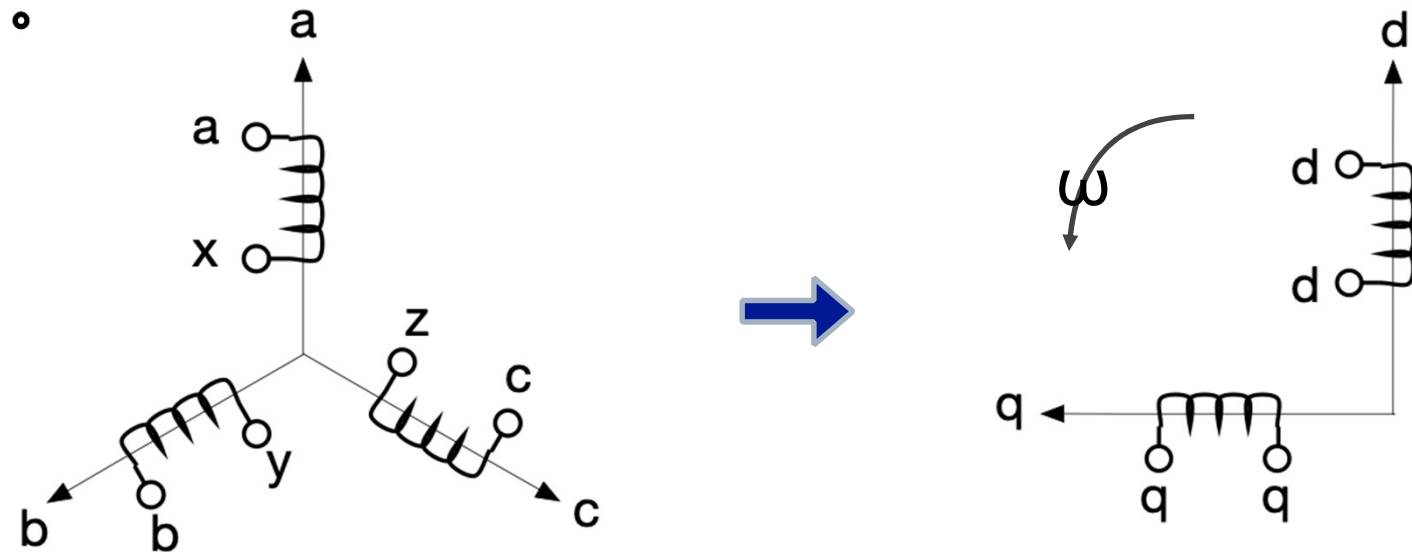


派克变换!

派克变换应用双反应原理：即任何一组三相对称定子电流所产生的合成基波旋转磁场，总可以用轴线互相垂直的两个绕组所产生的基波合成旋转磁场来代替。

派克变换的原理

- 根据双反应原理，用直轴d、交轴q作为这两个轴线，并在这两个轴线方向分别放置一个等效定子绕组，用这两个等效的定子绕组所产生的电枢反应磁场来代替原来三相定子绕组所产生的电枢反应磁场，这就是派克变换

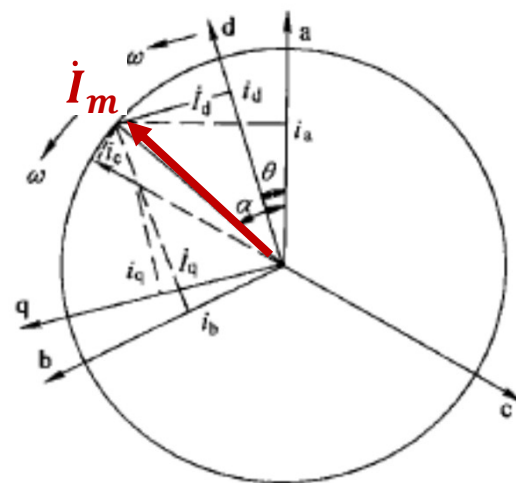
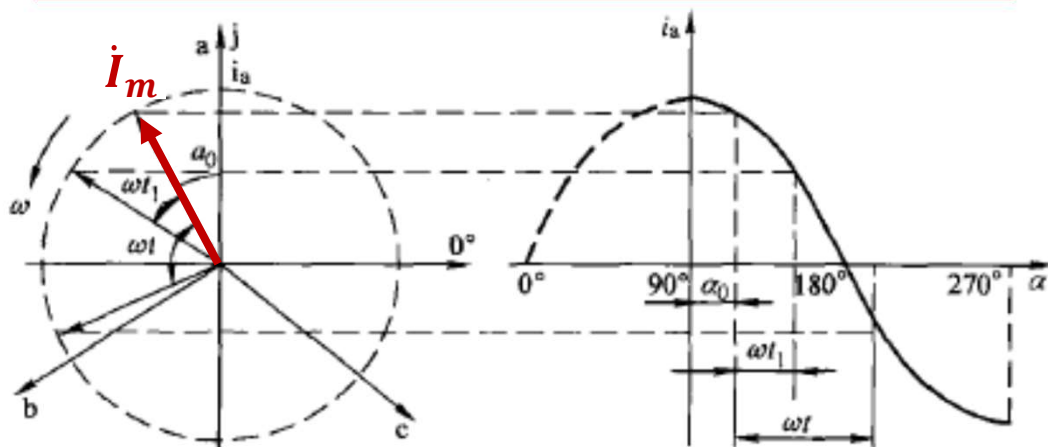


关于基波磁动势和电流幅值的关系，可参考：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/77819897>

派克变换的原理

- 当一对称平衡三相交流电流通过理想同步发电机的三相对称绕组时，将在空气隙中产生一个旋转磁动势。这一磁动势旋转的角速度和交流电流的角速度相同，旋转的方向与交流电流的相序有关。
- 这一磁动势为每一相脉动磁动势幅值的 $3/2$ 倍，即 $3F_m/2$ ，而 F_m 正比于一项交流电流的幅值 I_m 。
- 可以通过综合相量沟通 i_a 、 i_b 、 i_c 与 i_d 、 i_q 之间的关系。

综合相量方法理解派克变换



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

$$\begin{aligned} i_d &= I_m \cos(\alpha - \theta) \\ i_q &= I_m \sin(\alpha - \theta) \end{aligned}$$

当 α 和 θ 具有相同的速度时, i_d 和 i_q 就成了常数!

$$\cos(\theta - \alpha) = \frac{2}{3} \left[\cos \theta \cos \alpha + \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) + \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\alpha + 120^\circ) \right]$$

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{2}{3} \left[\sin \theta \cos \alpha + \sin(\theta - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) + \sin(\theta + 120^\circ) \cos(\alpha + 120^\circ) \right]$$

派克变换的原理

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ) \right]$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ) \right]$$

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

- 因此 I_d 和 I_q 在abc三相坐标轴上的投影分别为 i_a 、 i_b 、 i_c 。
- 当定子电流不平衡时，各相电流中都含有大小与相位恒定的电流，这个电流为三相零序电流，也就是： $i_{a0} = i_{b0} = i_{c0} = i_0$
- 那么每一相零序电流的表达式为

$$i_0 = \frac{1}{3} [i_a + i_b + i_c]$$