



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

4

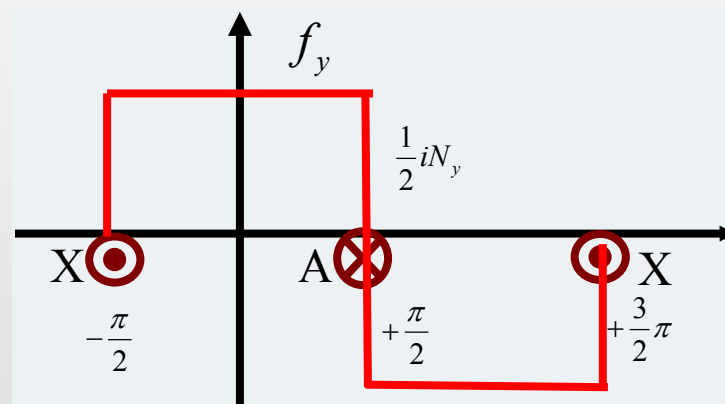
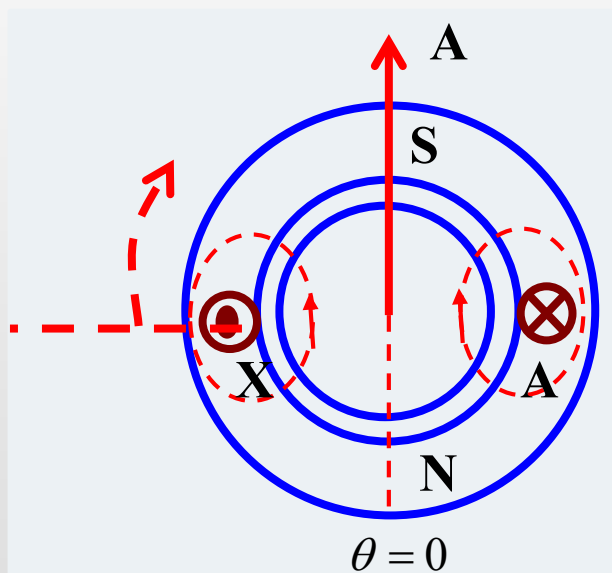
交流绕组建立的磁动势（上）

一、单相绕组的磁动势

$$F = NI$$

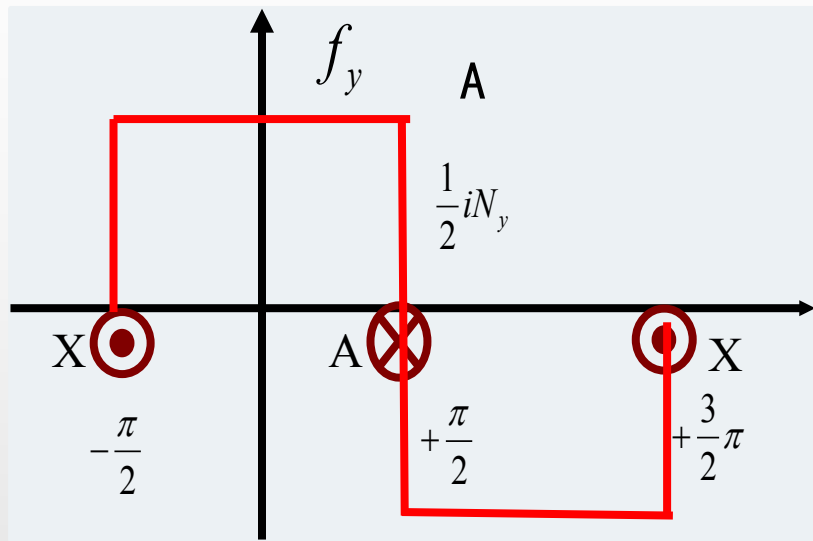
电枢绕组建立的磁动势既是时间的函数，也是空间的函数

1. 单个(集中)绕组的磁动势

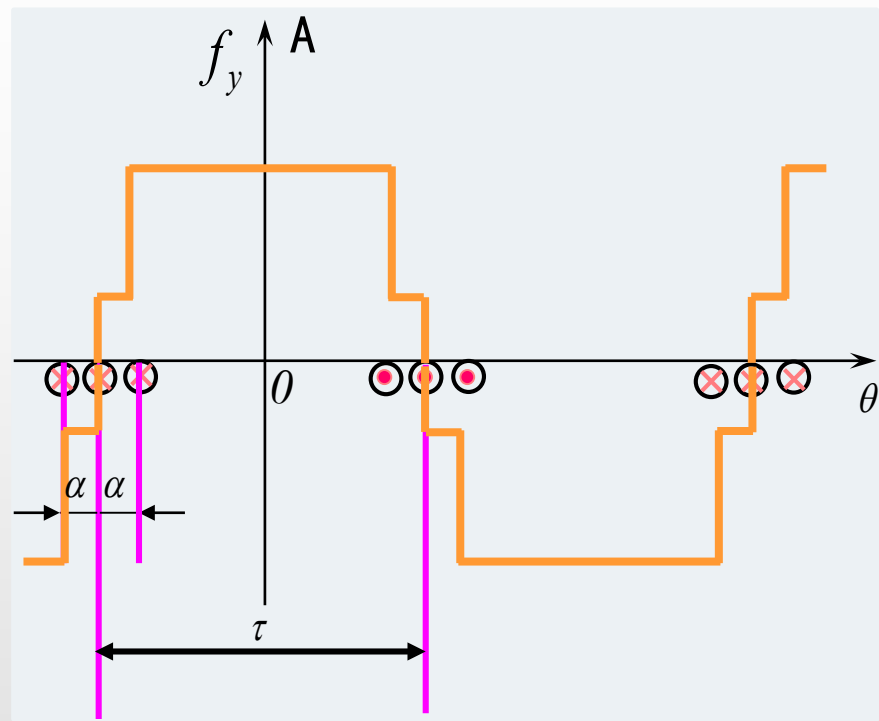


$$f_y = \begin{cases} \frac{1}{2}iN_y & (\text{当 } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{1}{2}iN_y & (\text{当 } \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$$

气隙磁动势在圆周仍按矩形变化，但幅值按余弦变化，矩波在空间位置不随时间变化，称为脉振磁动势，频率与电流的频率



$q=1$

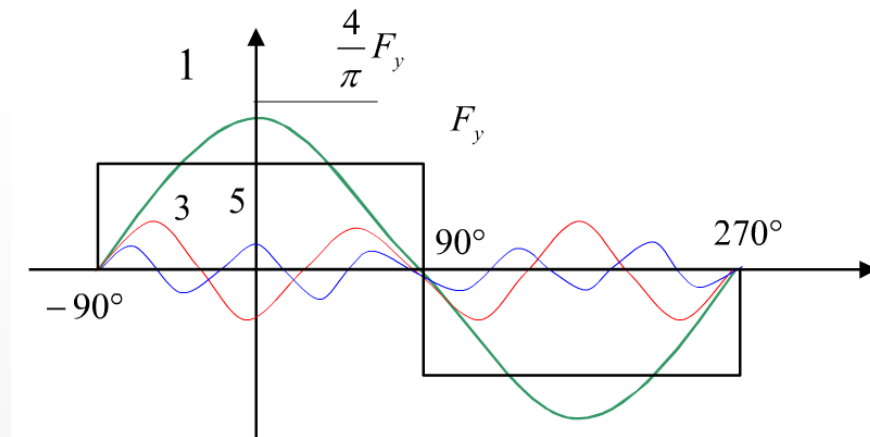


$q=3$

若电流 $i = \sqrt{2}I \cos \omega t$

$$f_y = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} IN_y \cos \omega t & (\text{当 } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{\sqrt{12}}{2} IN_y \cos \omega t & (\text{当 } \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$$

分解为基波、奇次谐波



$$f_y = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} i N_y \right) \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \dots + \frac{1}{\nu} \left(\sin \nu \frac{\pi}{2} \right) \cos \nu \theta + \dots \right]$$

$$f_y = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} IN_y \right) \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \dots + \frac{1}{\nu} \left(\sin \nu \frac{\pi}{2} \right) \cos \nu \theta + \dots \right] \cos \omega t$$

$$= F_{y1} \cos \theta \cos \omega t - F_{y3} \cos 3\theta \cos \omega t + F_{y5} \cos 5\theta \cos \omega t \dots$$

$$= f_{y1} + f_{y3} + f_{y5} + f_{y7} + \dots$$



基波磁动势

$$\left\{ \begin{aligned} f_{y1} &= F_{y1} \cos \omega t \cos \theta \\ F_{y1} &= \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} IN_y = 0.9 IN_y \end{aligned} \right.$$

基波磁动势的极数等于电机的极数，磁动势幅值位置与A相线圈的轴线重合。

$\nu > 1$
谐波磁动势

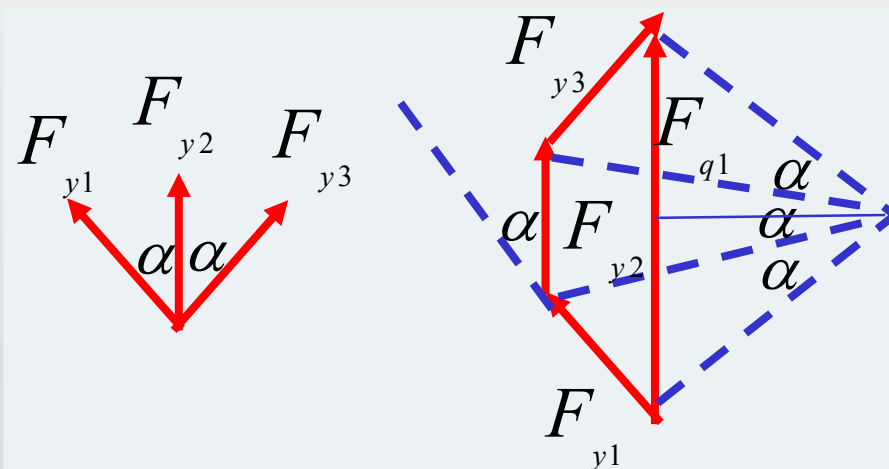
$$\left\{ \begin{array}{l} f_{y\nu} = F_{y\nu} \cos \omega t \cos \nu \theta \\ F_{y\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} IN_y = \frac{0.9}{\nu} IN_y = \frac{F_{y1}}{\nu} \\ p_\nu = \nu p_1 \end{array} \right.$$

作空间矢量来代表空间上正弦分布的基波与谐波磁动势。

- 矢量的长度等于磁动势的幅值
- 矢量所在的位置为磁动势幅值所在的位置（即该线圈的轴线位置）
- 矢量的箭头方向代表磁力线的方向

2.线圈组的磁动势

(1)单层整距



基波

$$F_{q1} = q F_{y1} k_{q1}$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$F_{y1} = 0.9 IN_y$$

谐波

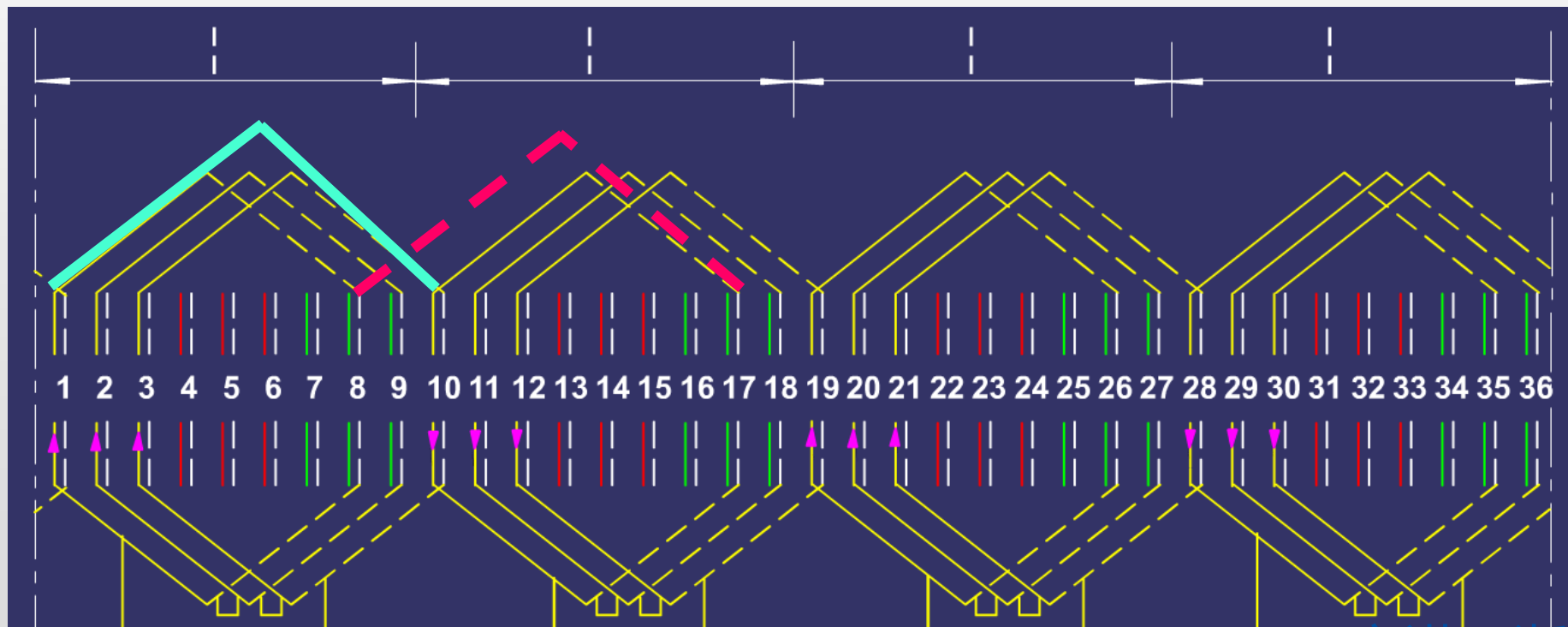
$$F_{qv} = qF_{yv}k_{qv}$$

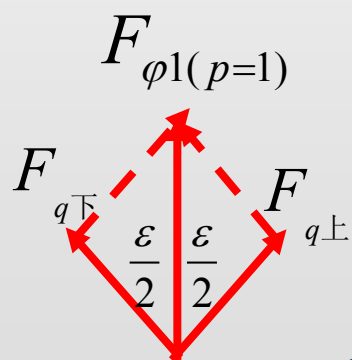
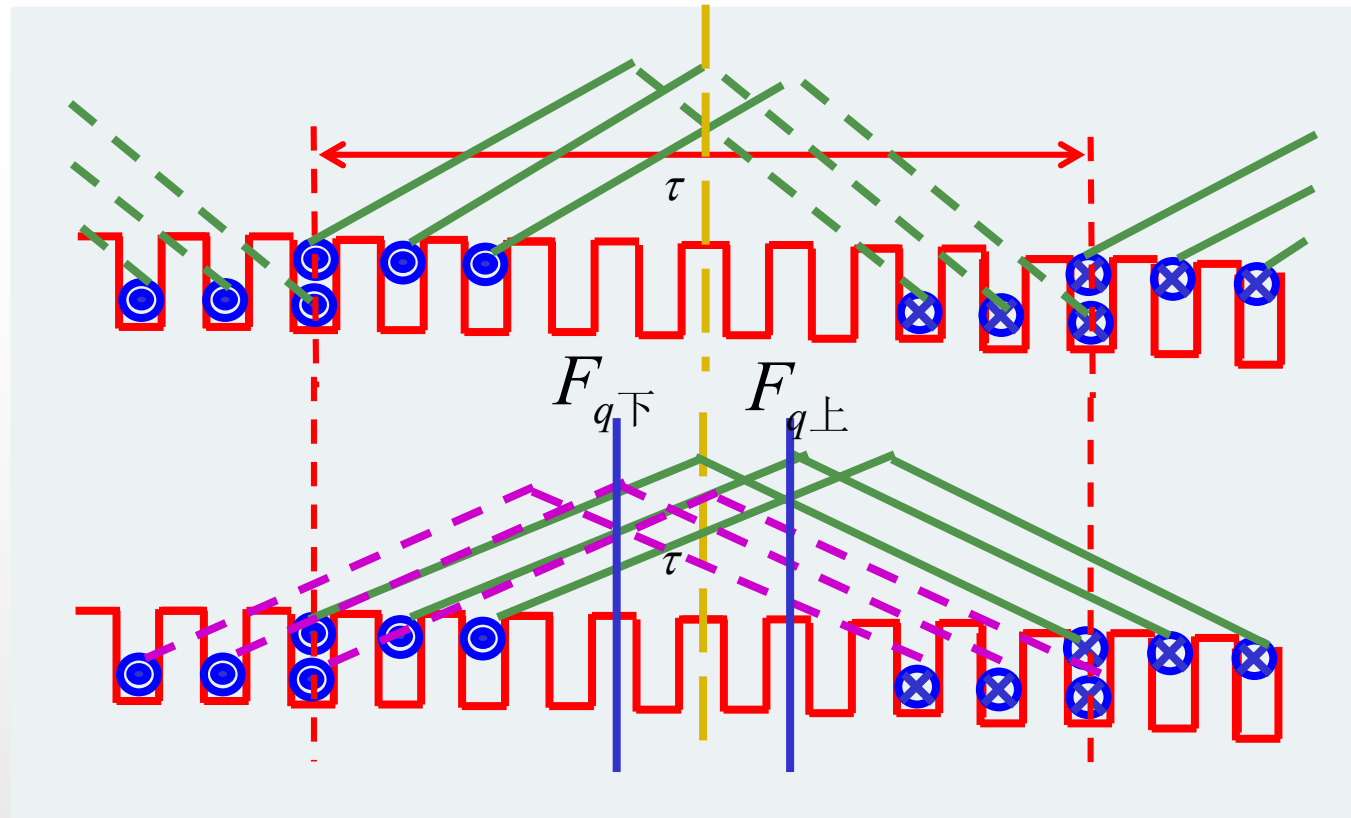
$$k_{qv} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}$$

$$F_{yv} = \frac{0.9IN_y}{v}$$

(2) 双层短距线圈组的磁动势

短距线圈 $\Rightarrow$ 正负两半波形不再对横轴对称 $\Rightarrow$ 作必要的演化





一相绕组所生的每极基波磁动势

$$F_{q\uparrow} = F_{q\downarrow} = F_{q1} = qF_{y1}k_{q1}$$

$$F_{\phi 1(p=1)} = 2F_{q1} \cos \frac{\varepsilon}{2} = 2F_{q1} \sin \left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ \right)$$

$$= 2F_{q1}k_{y1}$$

谐波

$$F_{\varphi\nu(p=1)} = 2F_{q\nu}k_{y\nu}$$

$$k_{y\nu} = \sin \nu \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

$$F_{q\nu} = qF_{y\nu}k_{q\nu}$$

$$F_{y\nu} = \frac{1}{\nu} 0.9IN_y$$

(3)单相绕组的磁动势

无论极数多少，一相绕组所建立的每极磁动势由该相绕组在一对极范围内所交链的上下层两个线圈组电流所决定。

$$\begin{aligned} F_{\varphi_1} &= F_{\varphi_1(p=1)} = 2F_{q1}k_{y1} = 2q \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y k_{q1} k_{y1} \left(\frac{I_\varphi}{a} \right) \\ &= 0.9 \frac{k_{w1} I_\varphi}{p} \left(\frac{2p}{a} q N_y \right) = 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_\varphi \end{aligned}$$

$$N_1 = \frac{2p}{a} q N_y \quad \text{双层绕组每相串联匝数;} \quad I_\varphi = aI \quad \text{相电流的有效值}$$

$$N_1 = \frac{p}{a} q N_y \quad \text{单层绕组每相串联匝数;} \quad k_{w1} = k_{y1} k_{q1} \quad \text{基波绕组系数}$$

谐波 $F_{\varphi v} = \frac{1}{v} 0.9 \frac{N_1 k_{wv}}{p} I_\varphi$

等效

实际单相线圈

等效集中整距线圈

等效

(每相串联匝数 N_1 ,基波绕组系数 k_{w1} ,
相电流 I_φ 的分布短距的单相绕组)

匝数 $\frac{N_1 k_{w1}}{p}$ 电流 I_φ

基波磁动势
完全相同

线圈轴线与原单相绕线轴线重合

谐波磁动势完全相同

匝数 $\frac{N_1 k_{wv}}{p}$

单相绕组所生的基波及
谐波磁动势的表达式为:

$$f_{\varphi 1} = F_{\varphi 1} \cos \omega t \cos \theta$$

$$f_{\varphi v} = F_{\varphi v} \cos \omega t \cos v \theta$$

结 论

(1) 单相绕组的磁动势沿气隙圆周方向的分布是一个**非正弦的阶梯形波**。(基波、高次谐波)

(2) 绕组中电流是交流电时，单相绕组的磁动势是一个在空间上位置固定不动而大小及正负随时间交变的**脉振磁动势**。

(3) 单相绕组基波磁动势幅值的位置与该相绕组的轴线相重合

(4) 单相绕组脉振磁动势的基波最大幅值为： $F_{\varphi_1} = 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_{\varphi}$

单相绕组脉振磁动势
的谐波最大幅值为：

$$F_{\varphi_v} = \frac{1}{v} 0.9 \frac{N_1 k_{wv}}{p} I_{\varphi}$$



浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬

4

交流绕组建立的磁动势（下）

二、三相绕组的磁动势

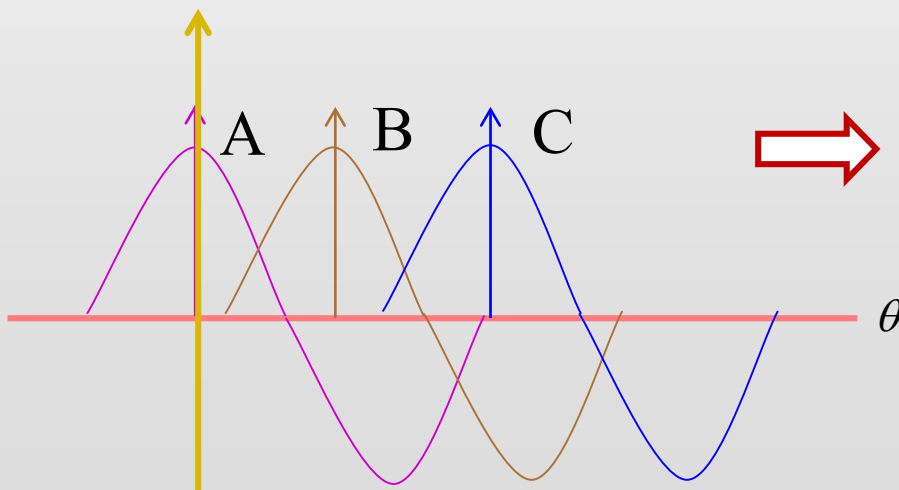
$$F_{\varphi_v} \propto \frac{k_{wv}}{v} \quad \text{分布短距削弱谐波磁动势(5,7,11,13)磁动势沿圆周的分布趋于正弦分布}$$

1. 三相绕组的基波磁动势

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I_{\varphi} \cos \omega t \\ i_B = \sqrt{2}I_{\varphi} \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = \sqrt{2}I_{\varphi} \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

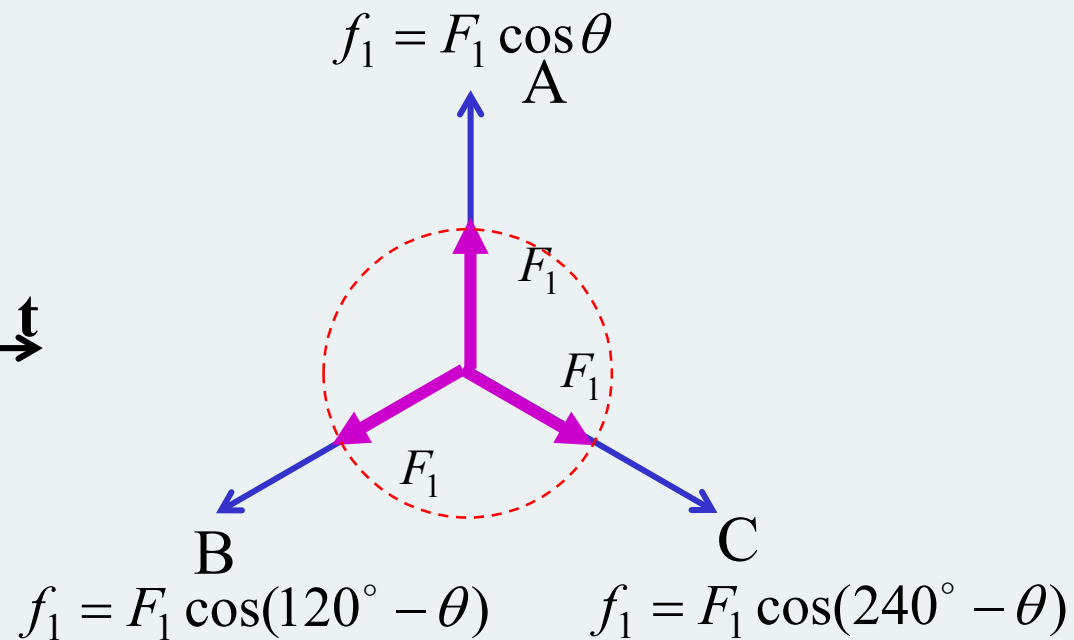
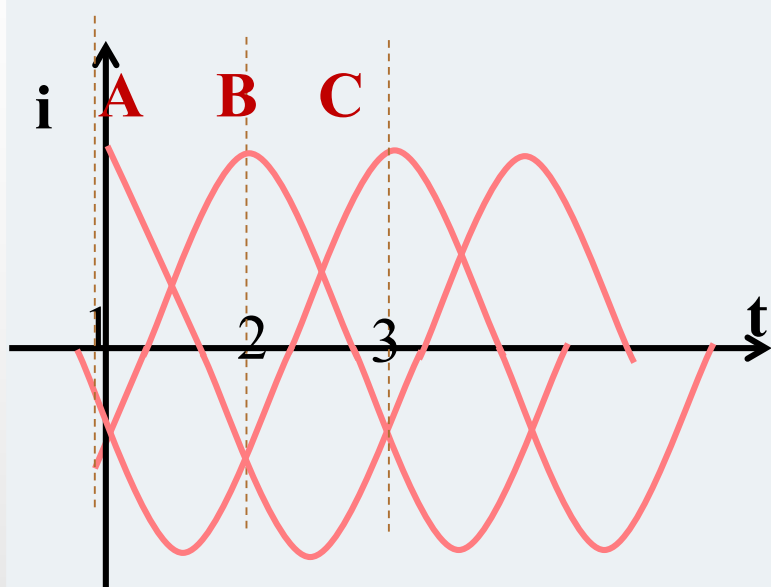


$$\begin{cases} f_{A1}(\theta, t) = F_{\varphi 1} \cos \omega t \cos \theta \\ f_{B1}(\theta, t) = F_{\varphi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ f_{C1}(\theta, t) = F_{\varphi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ) \end{cases}$$



$$\begin{aligned} f_1(\theta, t) &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \frac{3}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) \\ &= F_1 \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

$$f_1(\theta, t) = F_1 \cos(\omega t - \theta)$$



电源变化一个电周期，转过360电角度（一对极）

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

结 论

- 波形: 三相合成基波磁动势是一个空间正弦分布, 幅值大小不变, 幅值位置随时间而移动的旋转磁动势 (圆形旋转磁动势波)

- 大小: 三相合成基波磁动势的幅值为:

$$F_1 = \frac{3}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_\varphi = 1.35 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_\varphi$$

- 方向: 当某相电流为最大值时, 三相合成磁动势的幅值正好转到该相绕组的轴线上。相序A-B-C, 三相合成基波磁动势

幅值先与A重合, 再到B, 再到C。旋转磁动势对产生它的绕组的转向:

从电流超前相绕组转向电流落后相绕组。

- 转速: 波幅的转速 (基波磁动势同步速度)。

$$n_1 = \frac{60f}{p} [\text{r/min}]$$

$$f_1 = F_1 \cos(\omega t - \theta) \Rightarrow \cos(\omega t - \theta) = 1 \Rightarrow \omega t - \theta = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \omega t = \theta_m &\Rightarrow \left. \begin{aligned} \omega_1 &= d\theta_m/dt = d\omega t/dt = \omega \\ \omega_1 &= p \frac{2\pi n_1}{60} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 2\pi f = p \frac{2\pi n_1}{60} \\ &\Rightarrow n_1 = \frac{60f}{p} \end{aligned}$$

1. 交流绕组产生旋转磁动势的条件是：两个或两个以上的绕组，轴线在空间必须错开，通入的电流也必须有相位差。

2. 对称 m 相电流通入 m 相电流时，

m 相合成基波磁动势是一个圆形旋转磁动势。

幅值为一相的 $m/2$ 倍，

同步速为 n_1 ，方向为电流超前相绕组转向落后相绕组。

2.三相绕组的合成 ν 次谐波磁动势

(1)三相合成的三次谐波磁动势

$$f_{A3} = F_{\varphi 3} \cos \omega t \cos 3\theta$$

$$f_{B3} = F_{\varphi 3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3(\theta - 120^\circ) = F_{\varphi 3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3\theta$$

$$f_{C3} = F_{\varphi 3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3(\theta - 240^\circ) = F_{\varphi 3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3\theta$$

$$\begin{aligned} f_3(\theta, t) &= f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} \\ \Rightarrow &= F_{\varphi 3} \cos 3\theta [\cos \omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ)] \\ &= 0 \end{aligned}$$

三相合成的三倍次谐波磁动势为零

(2)三相合成的五次谐波磁动势

$$f_{A5} = F_{\varphi 5} \cos \omega t \cos 5\theta$$

$$f_{B5} = F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 5(\theta - 120^\circ) = F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(5\theta + 120^\circ)$$

$$f_{C5} = F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 5(\theta - 240^\circ) = F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(5\theta + 240^\circ)$$

$$\Rightarrow f_5(\theta, t) = f_{A5} + f_{B5} + f_{C5} = \frac{3}{2} F_{\varphi 5} \cos(5\theta + \omega t) = F_5 \cos(5\theta + \omega t)$$

1.圆形旋转磁动势。

2.幅值为每相五次谐波磁动势幅值的3/2倍

$$F_5 = \frac{3}{2} F_{\varphi 5} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{5} \cdot 0.9 \frac{N_1 k_{w5}}{p} I_\varphi$$

3.转速为基波磁动势的1/5，方向与基波磁动势相反（反转磁动势）

$$n_5 = -\frac{n_1}{5}$$

结论推广

$\nu = 6k - 1$, 其中 $\nu = 5, 11, 17, \dots$, 三相合成谐波磁动势:

与基波磁动势反向的圆形旋转磁动势, $F_\nu = \frac{3}{2} F_{\varphi\nu}, n_\nu = -\frac{n_1}{\nu}$

(2)三相合成的七次谐波磁动势

$$f_7(\theta, t) = f_{A7} + f_{B7} + f_{C7} = \frac{3}{2} F_{\varphi7} \cos(\omega t - 7\theta) = F_7 \cos(\omega t - 7\theta)$$

1. 圆形旋转磁动势

2. 幅值为每相七次谐波磁动势幅值的3/2倍

$$F_7 = \frac{3}{2} F_{\varphi7} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{7} \cdot 0.9 \frac{N_1 k_{w7}}{p} I_\varphi$$

3. 转速为基波磁动势的1/7, 方向与基波磁动势相同 (正转磁动势)

$$n_5 = \frac{n_1}{7}$$

结论推广

$\nu = 6k + 1$, 其中 $\nu = 7, 13, 19, \dots$, 三相合成谐波磁动势:

与基波磁动势同向的圆形旋转磁动势, $F_\nu = \frac{3}{2} F_{\varphi\nu}, n_\nu = \frac{n_1}{\nu}$

电机气隙磁动势的总结

附加损耗、振动与噪声

感应电机: 附加转矩,

起动性能变坏

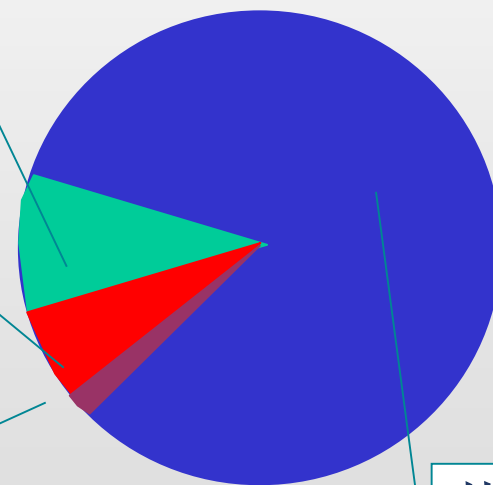
削弱方法: 分布与短距

5 次谐波
磁动势

7 次谐波
磁动势

11 次谐波
磁动势

基波
磁动势



三、定子三相绕组建立的磁场

基波磁动势 (n_1) $\longleftrightarrow$ 气隙中形成旋转基波磁场

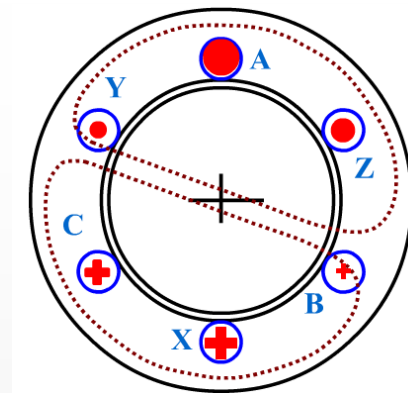
$$B_1(\theta, t) = \mu_c \frac{f_1(\theta, t)}{\delta} = B_{m1} \cos(\omega t - \theta)$$

基波磁密A的幅值

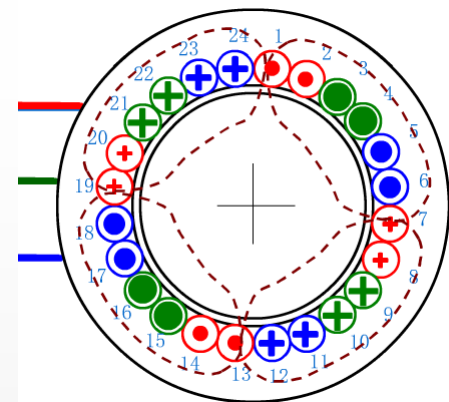
若气隙均匀，基波磁场也是一个以同步速旋转的圆形旋转磁场

主磁场（机电能量转换），它与
定子绕组交链的磁通称为主磁通 Φ_m

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{不考虑铁耗} \Rightarrow B_1 \text{与} F_1 \text{重合} \\ \text{考虑铁耗} \Rightarrow B_1 \text{滞后于} F_1 \text{一个铁耗角} \alpha_{Fe} \end{array} \right.$



2极电机



4极电机

谐波磁动势 $\longleftrightarrow$ 气隙中形成旋转谐波磁场

$$f_v = F_v \cos(\omega t \pm v\theta)$$

数值较小；

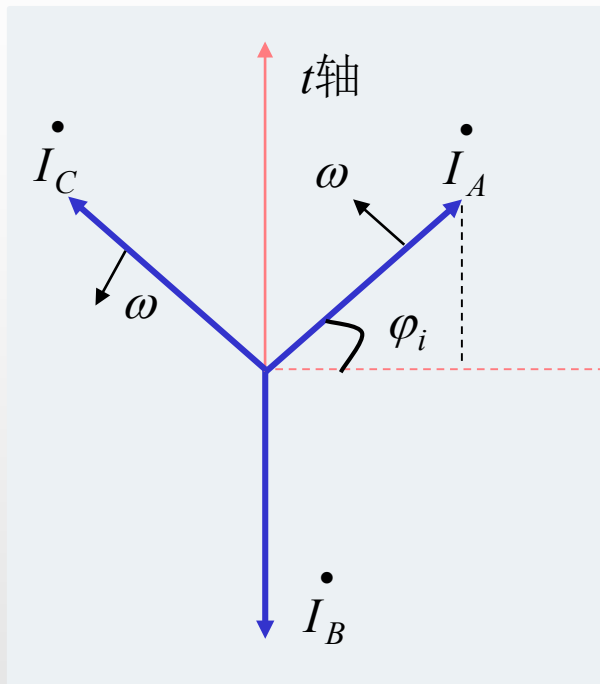
不会对转子产生有效的转矩；

但它在定子绕组中的感应电动势会影响定子回路的
电压平衡关系（作漏磁场处理）

$$f_v = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{vp \frac{n_1}{v}}{60} = f_1$$



四、交流电机的时空矢量图



$$i_A = \sqrt{2} I_A \sin(\omega t + \varphi_i) \text{ 用 } \dot{I}_A \text{ 表示}$$

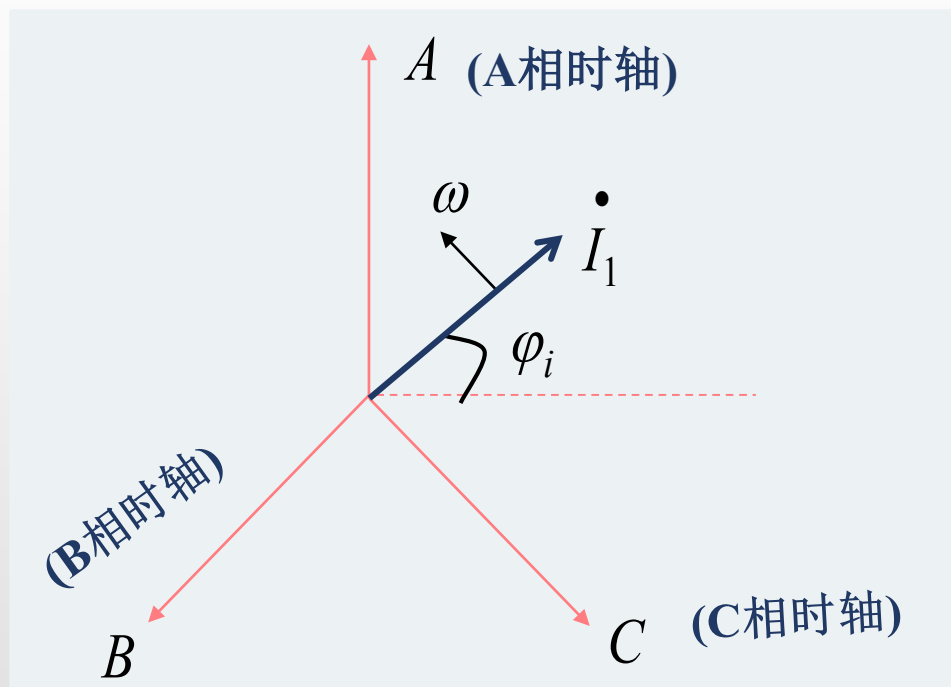
相量在 t 轴上的投影为该物理量瞬时值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$

单时轴多相量



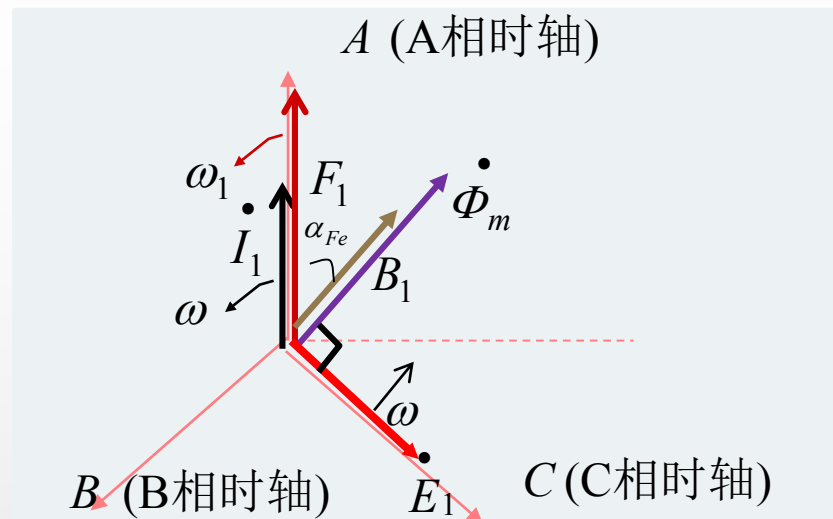
多时轴单相量

多时轴单相量



定子电流用一根统一的相量 $\dot{I}_1$ 表示

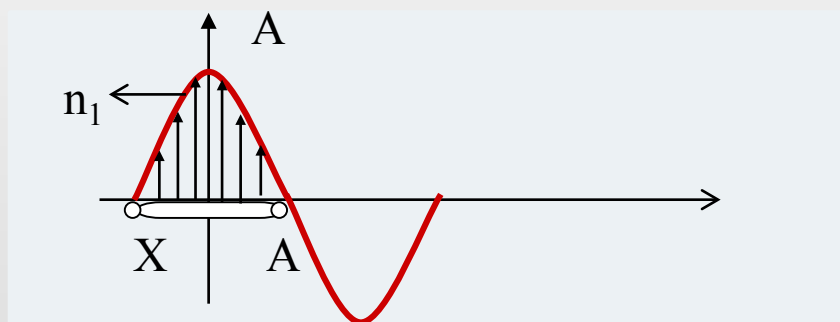
时空矢量图



当 $i_A = +I_m$ 时, $\dot{I}_1$ 与A相时轴重合, F_1 亦与A轴重合

F_1 与 $\dot{I}_1$ 重合, 且 F_1 旋转的电角速度 ω_1 与

$\dot{I}_1$ 的角频率 ω 相等, $\therefore$ 始终重合



$\dot{\Phi}_m$ 与 B_1 重合, $\dot{\Phi}_m$ 的角频率 ω 与 B_1 的旋转速角速度 ω_1

时一空矢量图（对称多相系统）画法规则（四步）

- (1)以相轴作为各相的时轴，同一物理量用一根统一的时间向量表示。
- (2)统一电流相量与旋转基波磁动势同相, B_1 与磁通相量同相
- (3)考虑铁耗，基波磁密矢量 B_1 滞后 F_1 一个铁耗角
- (4)由统一的相量及空间矢量及电机的基本方程式，画出其它相(矢)量

基波

$$F_1 = \frac{3}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_\phi = 1.35 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_\phi$$

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_1$$

谐波

$$F_v = \frac{3}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{wv}}{vp} I_\phi = 1.35 \frac{N_1 k_{wv}}{vp} I_\phi$$

$$E_v = 4.44 f_v N_1 k_{wv} \Phi_v$$

	$y_1/\tau=5/6$	$y_1/\tau=8/9$
k_{y1}	$\sin(75)=0.9659$	$\sin(80)=0.9848$
k_{y5}	$\sin(5*75)=0.2588$	$\sin(5*80)=0.6428$
k_{y7}	$\sin(7*75)=0.2588$	$\sin(7*80)=-0.342$
k_{q1}	$\sin(2*30/2)/(2*\sin(30/2))=0.9659$	$\sin(3*20/2)/(3*\sin(20/2))=0.9597$
k_{q5}	0.2588	0.2175
k_{q7}	-0.2588	-0.1774
k_{w1}	0.933	0.945
k_{w5}	0.0669	0.114
k_{w7}	-0.0669	-0.0606



浙江大学电气工程学院

T H A N K S