电机与拖动课件之五

异步 电机

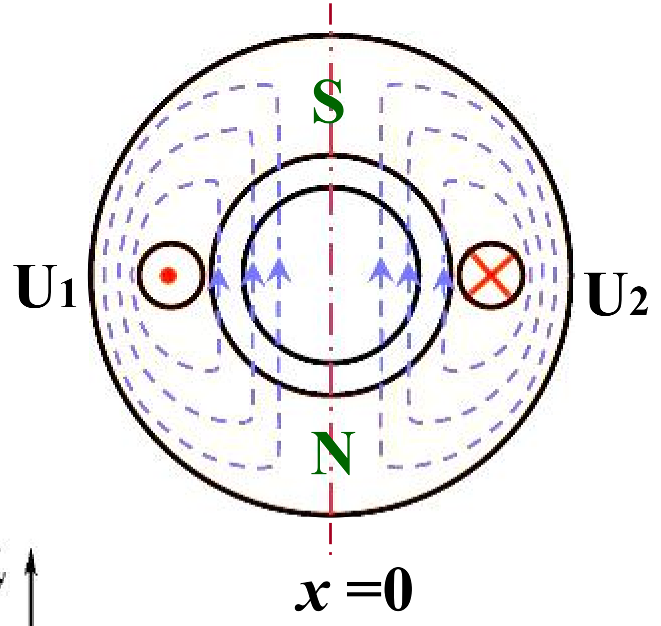
胡梦月、韩谷静

纺大电子电气

章节目录

一、集中整距线圈的磁动势

1、整距线圈磁动势波形



一台两极气隙均匀的交流电机,一个整距绕组通入交流电流,线圈磁动势在某瞬间的分布如图，由全电流定律得：

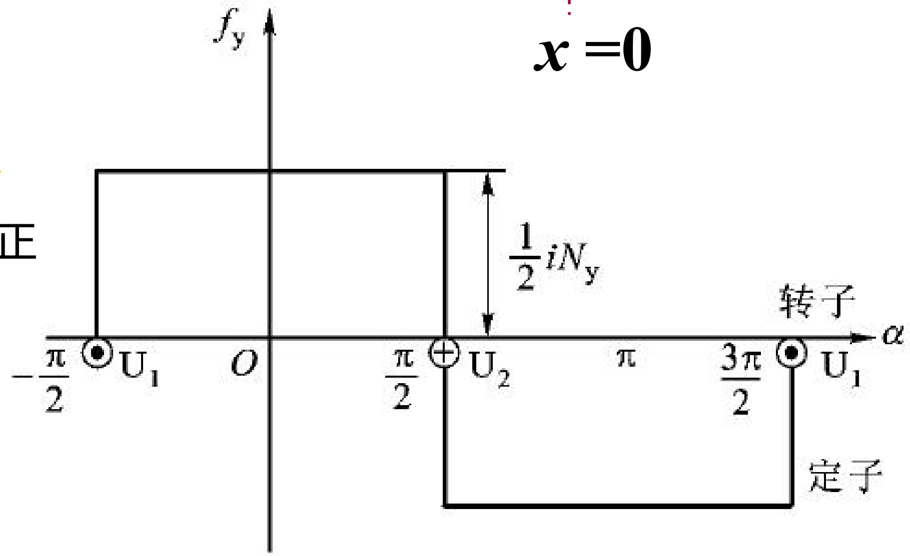
$$\oint H\,\mathrm{d}\,l = i = N_{\mathrm{y}} i$$

忽略铁心磁阻,磁动势完全降落在两个气隙上，每个气隙的磁动势为：

$$f_y = \frac{1}{2} N_y i$$

沿逆时针方向展开

规定：磁力线从定子到转子为正



结论：交流电机整距线圈磁动势空间分布波形为矩形波。

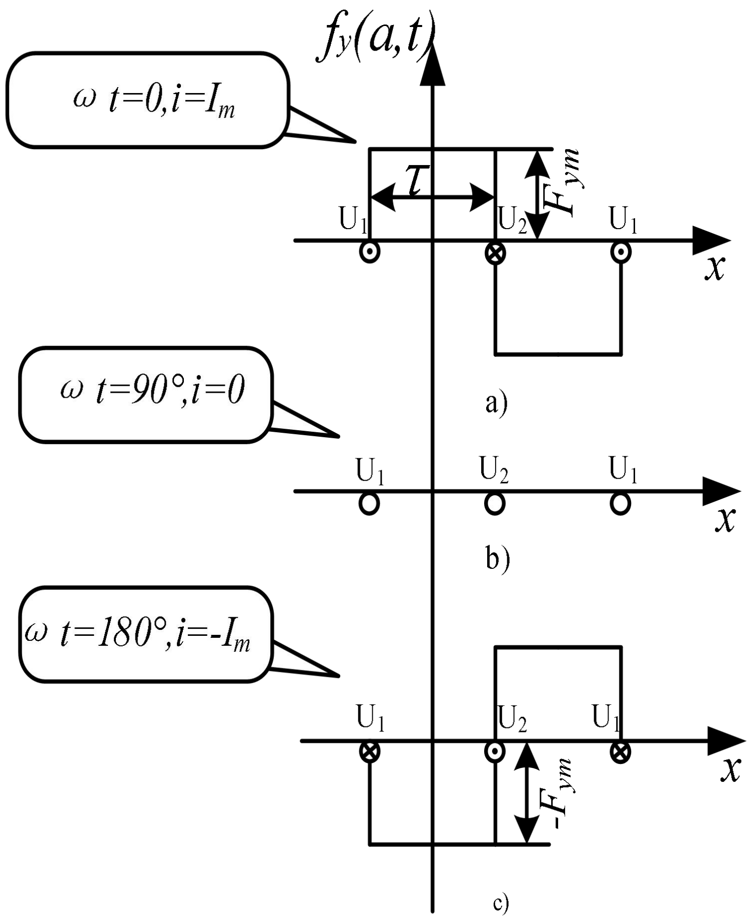
一、集中整距线圈的磁动势

2、矩形波磁动势瞬时值表达式

$$f_y(\alpha,t)=\frac{1}{2}N_y i \qquad i=\sqrt{2}I\cos\omega t$$

$$f_y(\alpha,t)=\begin{cases}\frac{\sqrt{2}}{2}N_y I\cos\omega t & (-\frac{\pi}{2}<\alpha<\frac{\pi}{2})\\ -\frac{\sqrt{2}}{2}N_y I\cos\omega t & (\frac{\pi}{2}<\alpha<\frac{3\pi}{2})\end{cases}$$

整距线圈的磁动势：空间分布为矩形波，随时间按余弦规律变化，变化频率为电流频率。



脉动磁动势：空间位置不变而幅值和方向随时间变化的磁动势，脉动频率为通入交流电流的频率。

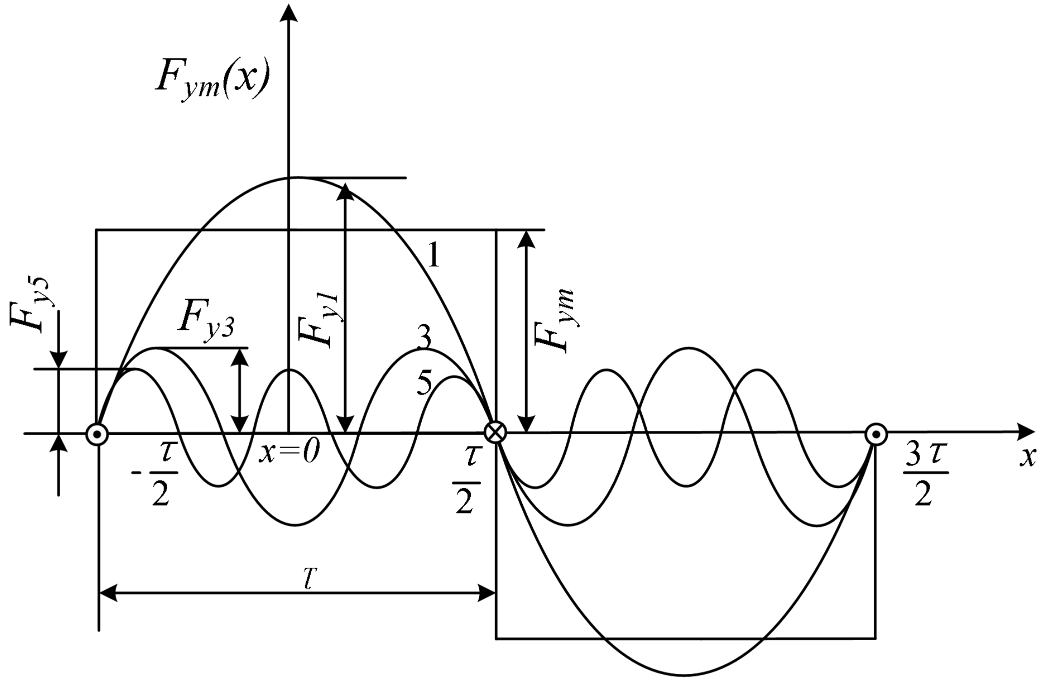
一、集中整距线圈的磁动势

3、整距线圈基波磁动势

$$f_y(x,t)=f_y(\alpha,t)$$

$$=\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}N_yI\cos\omega t(\cos\alpha-\frac{1}{3}\cos3\alpha+\frac{1}{5}\cos5\alpha-\dots)$$

$$=0.9N_yI\cos\omega t\left[\cos\frac{\pi}{\tau}x-\frac{1}{3}\cos3\frac{\pi}{\tau}x+\frac{1}{5}\cos5\frac{\pi}{\tau}x-\cdots\right]$$



基波磁动势为: $f_{y1}(x,t)=\frac{4}{\pi}\times\frac{\sqrt{2}}{2}N_y\,\boldsymbol{I\cos\omega t\cos\alpha}=0.9N_y\,\boldsymbol{I\cos\omega t\cos}\frac{\pi}{\tau}x$

基波磁动势幅值为: $\boldsymbol{F_{y1}=\frac{4}{\pi}\times\frac{\sqrt{2}}{2}N_yI=0.9N_yI}$

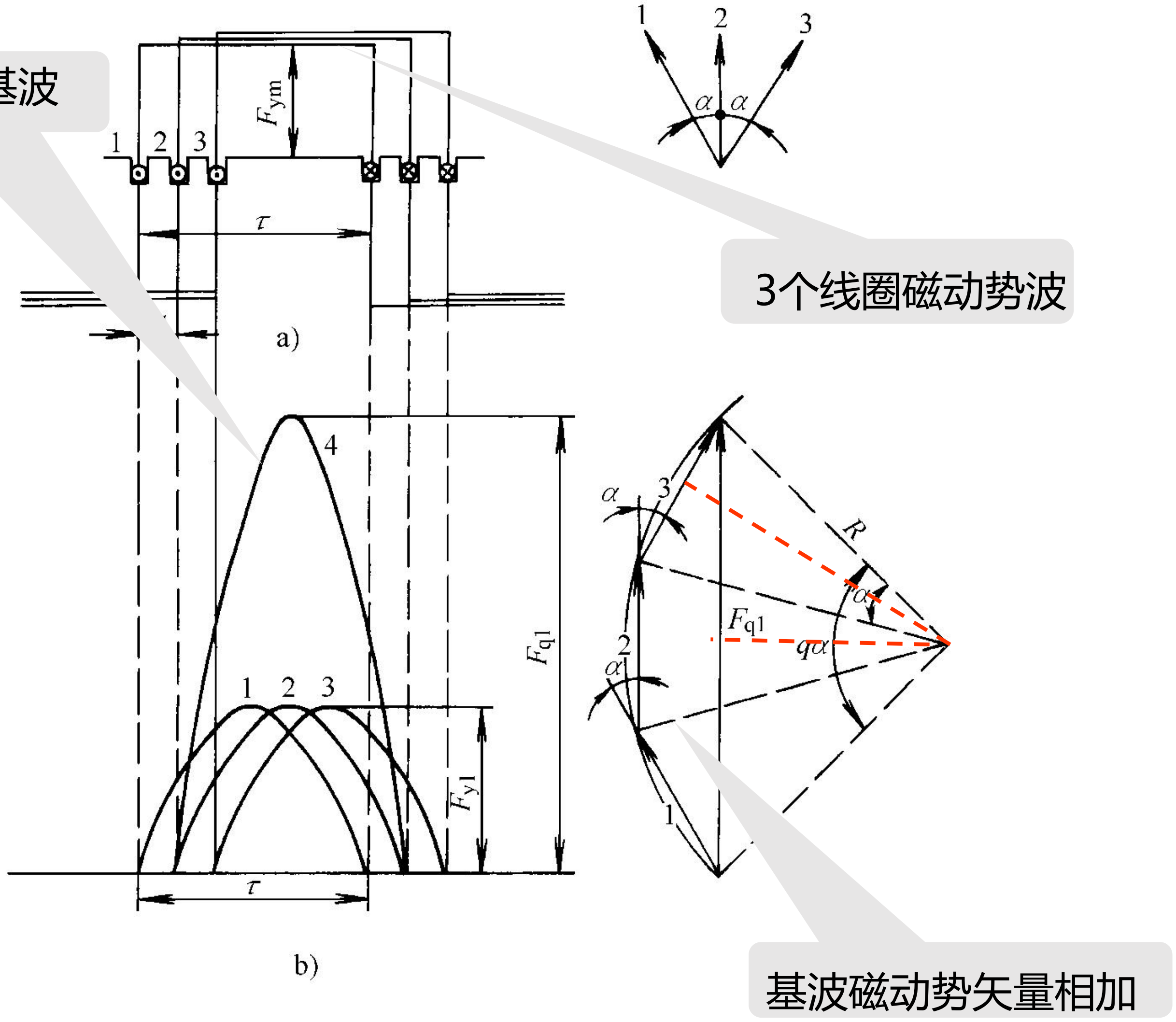
整距绕组基波磁动势特点：①在空间按余弦分布；②幅值（振幅）位于绕组轴线；③空间每一点的磁动势大小随时间按余弦规律变化；④为脉动磁动势。

二、整距线圈组的磁动势

（1）若每个线圈组由$q=3$个相同的线圈串联起来，各线圈之间相差一个槽距角α。

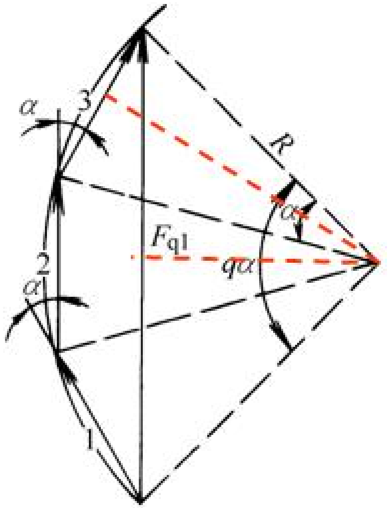
（2）线圈组的基波合成磁动势的相量可用q个依次相差α电角度的基波磁动势相量之和来表示：

$$\dot{F}_{q1}=F_{y1}\angle 0^{\circ}+F_{y1}\angle\alpha+\cdots+F_{y1}\angle(q-1)\alpha$$



二、整距线圈组的磁动势

(3) 整距线圈组的基波磁动势 $\dot{F}_{q1}=F_{y1}\angle 0^\circ+F_{y1}\angle\alpha+\cdots+F_{y1}\angle(q-1)\alpha$



基波磁动势幅值: $F_{q1}=qF_{y1}k_{q1}=0.9IN_yqk_{q1}$

基波分布系数: $k_{q1}=\dfrac{F_{q1}}{qF_{y1}}=\left(2R\sin\dfrac{q\alpha}{2}\Big/q2R\sin\dfrac{\alpha}{2}\right)=\left(\sin\dfrac{q\alpha}{2}\Big/q\sin\dfrac{\alpha}{2}\right)$

(4) 整距线圈组的谐波磁动势

谐波磁动势幅值: $F_{q\nu}=\dfrac{1}{\nu}\times 0.9IN_yqk_{q\nu}$

谐波分布系数: $k_{q\nu}=\sin q\dfrac{\nu\alpha}{2}\Big/q\sin\dfrac{\nu\alpha}{2}$

结论：采用分布绕组也可削弱磁动势中的高次谐波，使磁动势更接近正弦波。

三、短距线圈组的磁动势

（1）短距线圈组的磁动势：在q个整距线圈所组成线圈组产生的磁动势基础上，乘上一个短距系数k_y即可。

（2）短距线圈组的基波合成磁动势幅值：$$F_{q1(y<\tau)}=qF_{y1}k_{q1}k_{y1}=0.9IN_y qk_{q1}k_{y1}$$

（3）短距线圈组的基波短距系数：$$k_{y1}=\sin y\frac{\pi}{2}$$

（4） v次谐波短距系数：$$k_{y\nu}=\sin \nu y\frac{\pi}{2}$$

（5）短距线圈组的v次谐波合成磁动势幅值：$$F_{q\nu(y<\tau)}=\frac{1}{\nu}\times 0.9IN_y qk_{q\nu}k_{y\nu}$$

四、单相绕组产生的磁动势

是指气隙中的合成磁动势，即每一对磁极下对应的合成磁动势。

参数	单层绕组	双层绕组
相绕组基波磁动势幅值	$F_{\Phi1}=F_{q1}=0.9IqN_yk_{q1}k_{y1}$	$F_{\Phi1}=2F_{q1(y_1<\tau)}=2\times0.9IqN_yk_{q1}k_{y1}$
一相绕组总匝数	$N_1=pqN_y/b$	$N_1=2pqN_y/b$
线圈电流	$I=I_1/b$	$I=I_1/b$
绕组系数	$k_{N1}=k_{q1}k_{y1}$	$k_{N1}=k_{q1}k_{y1}$

单层绕组: $F_{\Phi1}=0.9IqN_yk_{q1}k_{y1}\xrightarrow[N_1=\frac{pqN_y}{b}\Rightarrow qN_y=\frac{bN_1}{p}]{I=\frac{I_1}{b},\quad k_{N1}=k_{q1}k_{y1}} F_{\Phi1}=0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}$

双层绕组: $F_{\Phi1}=2\times0.9IqN_yk_{q1}k_{y1}\xrightarrow[N_1=\frac{2pqN_y}{b}\Rightarrow 2qN_y=\frac{bN_1}{p}]{I=\frac{I_1}{b},\quad k_{N1}=k_{q1}k_{y1}} F_{\Phi1}=0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}$

结论：不论是单层或双层绕组，相绕组的基波磁动势幅值均为

$$F_{\Phi1}=0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}$$

四、单相绕组产生的磁动势

基波磁动势瞬时值表达式：

$$f_{\Phi 1}(x,t)=F_{\Phi 1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N}1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t$$

v次谐波磁动势幅值：

$$F_{\Phi v}=\frac{1}{v}0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N}v}$$

谐波磁动势瞬时表达式：

$$f_{\Phi v}=F_{\Phi v}\cos\omega t=\frac{1}{v}0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N}v}\cos\frac{v\pi}{\tau}x\cos\omega t$$

四、单相绕组产生的磁动势

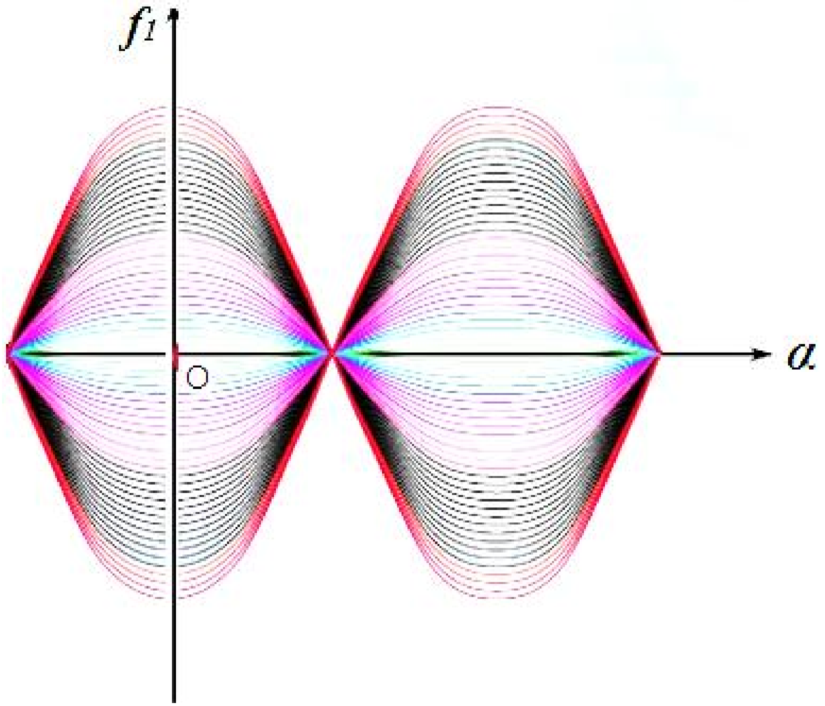
单相绕组磁动势特点：

1）脉振磁动势；

2）基波磁动势幅值的位置与绕组的轴线相重合；

3）谐波磁动势幅值与谐波次数成反比；

4）布及短距绕组，可显著减小高次谐波幅值，改善磁动势波形。



五、单相脉动磁动势的分解

$$f_{p1}(x,t)=F_{p1}\sin\omega t\cos\frac{\pi}{\tau}x=\frac{1}{2}F_{p1}\sin(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x)+\frac{1}{2}F_{p1}\sin(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x)=f_{p1}^{+}(x,t)+f_{p1}^{-}(x,t)$$

➢ 即一个脉动磁动势可以分解成两个幅值大小相等的磁动势。

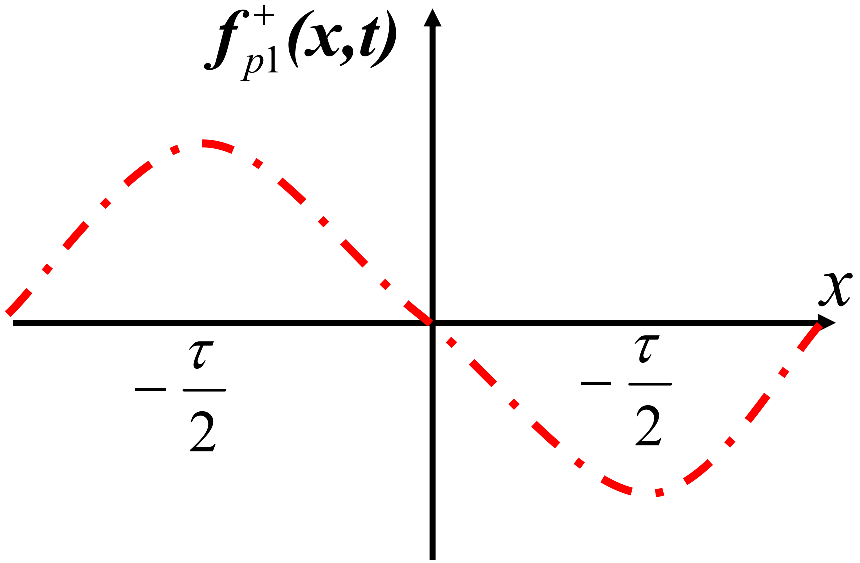
先分析 $f_{p1}^{+}(x,t)=\frac{1}{2}F_{p1}\sin(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x)$

取幅值点分析 $\omega t-\frac{\pi}{\tau}x=\frac{\pi}{2}$

$\omega t=0$时，$x=-\frac{\tau}{2}=-\frac{\pi}{2}$;

$\omega t=\frac{\pi}{2}$时，$x=0$;

$\omega t=\pi$时，$x=\frac{\tau}{2}=\frac{\pi}{2}$;



分析

1） $f_{p1}^{+}(x,t)$ 称为正向旋转磁动势；

2） $f_{p1}^{+}(x,t)$ 的幅值为单相基波磁动势幅值的一半；

3）线速度为 $v = dx/dt = 2f\tau(m/s)$

旋转速度为

$$n_1 = 2f\tau/2p\tau = f/p(r/s) = 60f/p(r/\min)$$

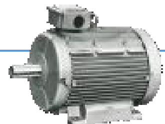
4） $f_{p1}^{-}(x,t)$ 的性质基本一致，只是旋转方向是 x 的负方向。

结论

1）单相绕组的基波磁动势为脉振，它可以分解为大小相等、转速相同而转速相反的两个旋转磁场；

2）反之，满足上述性质的两个旋转磁动势的合成即为脉动磁动势。

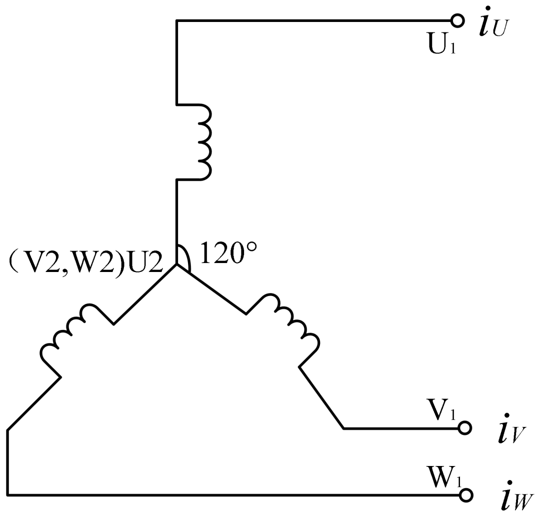
3）由于两个旋转磁动势在旋转过程中，大小不变，两矢量顶点的轨迹为一圆形，所以这两个磁动势为圆形旋转磁动势。

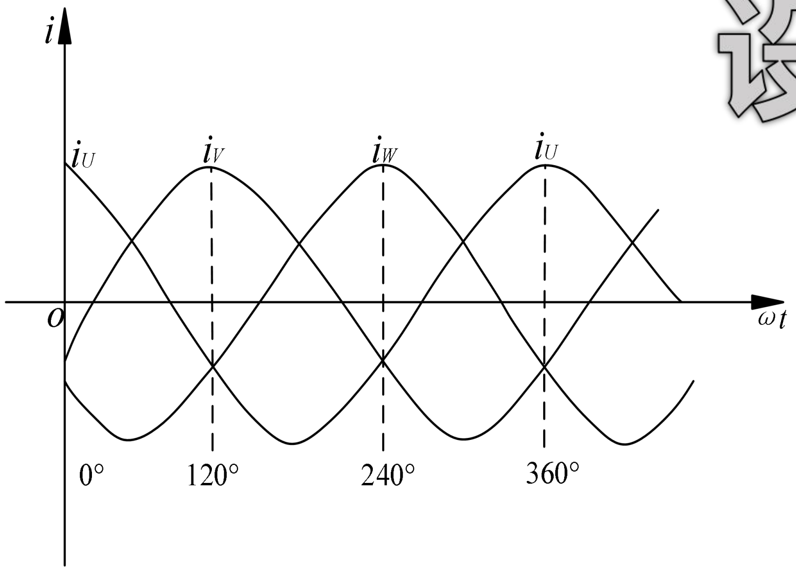


三相空间对称绕组通入三相时间对称电流，产生圆形旋转磁场。

一、图解法

三相绕组流过三相对称电流，每相绕组在各自的绕组轴线上产生脉振磁动势，它们在空间上彼此相差120°电角度。





设

- 三相对称电流按余弦规律变化
- U 相电流最大时为计时点
- 电流取首进尾出为正

$$i_U = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$i_V = \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ)$$

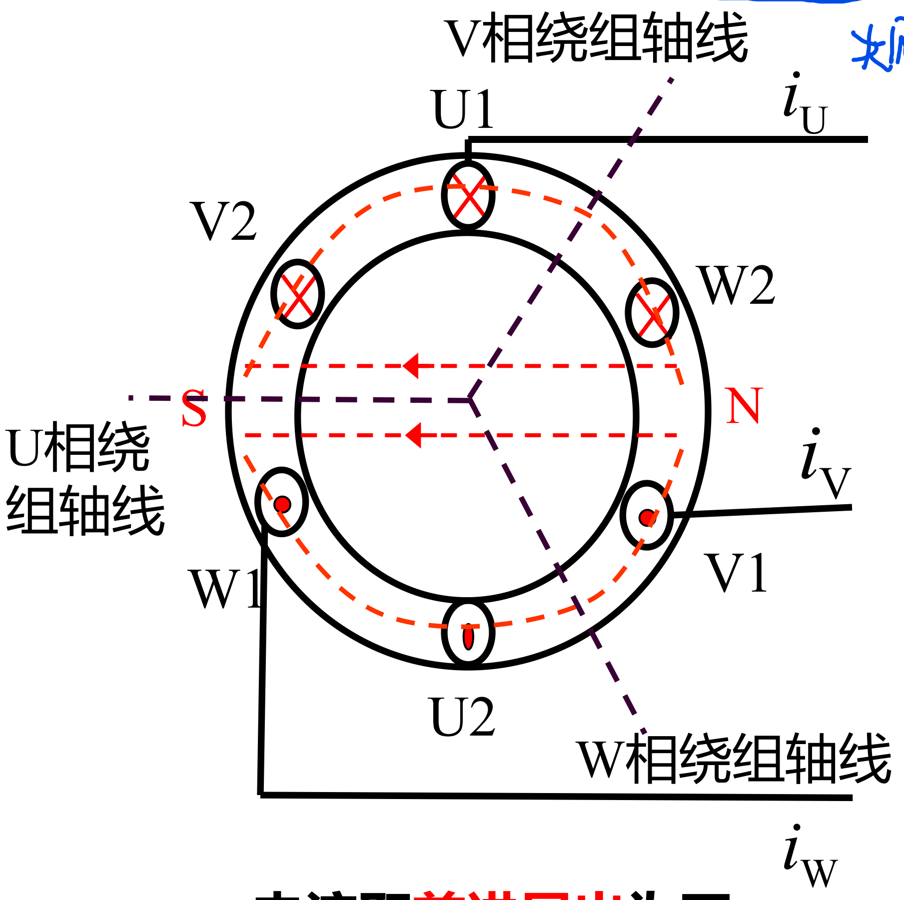
$$i_W = \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120^\circ)$$

一、图解法

$$i_U=\sqrt{2}I\cos\omega t,\quad i_V=\sqrt{2}I\cos(\omega t\text{-}120^\circ),\quad i_W=\sqrt{2}I\cos(\omega t+120^\circ)$$

(1)当ωt=0° 时，$i_U=\sqrt{2}I\cos 0=\sqrt{2}I>0,\ i_V=\sqrt{2}I\cos(\text{-}120^\circ)<0,\ i_W=\sqrt{2}I\cos(120^\circ)<0$

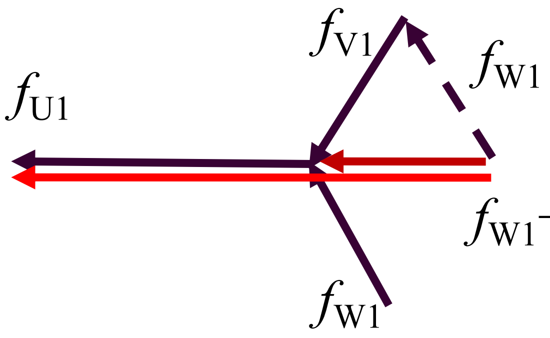
规定首进尾出为正



$$f_{U1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos0^\circ=F_{\Phi1}$$

$$f_{V1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(-120^\circ)=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{W1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(120^\circ)=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$



$f_1=f_{U1}+f_{V1}+f_{W1}=3/2F_{\Phi1}$

$f_{W1}+f_{V1}=1/2F_{\Phi1}$

电流取首进尾出为正

当$\omega t=0$时，U相电流幅值最大，合成磁动势轴线在U相绕组轴线上，$f_1=3/2F_{\Phi1}$

一、图解法

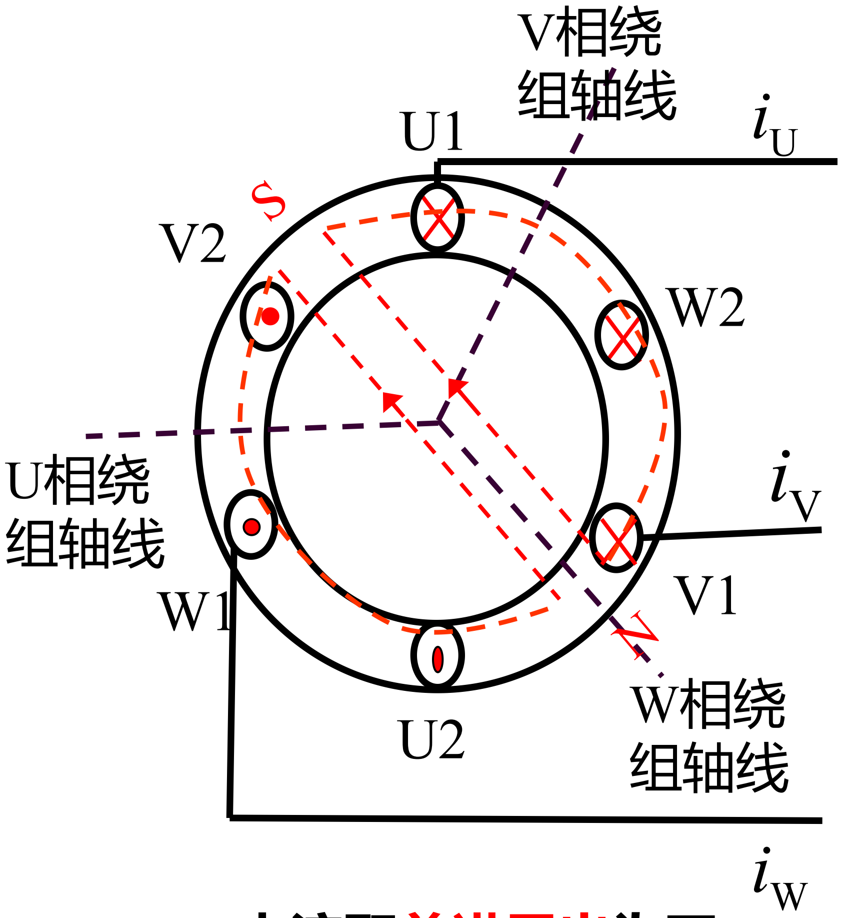
$$i_U=\sqrt{2}I\cos\omega t,\quad i_V=\sqrt{2}I\cos(\omega t\text{-}120^\circ),\quad i_W=\sqrt{2}I\cos(\omega t+120^\circ)$$

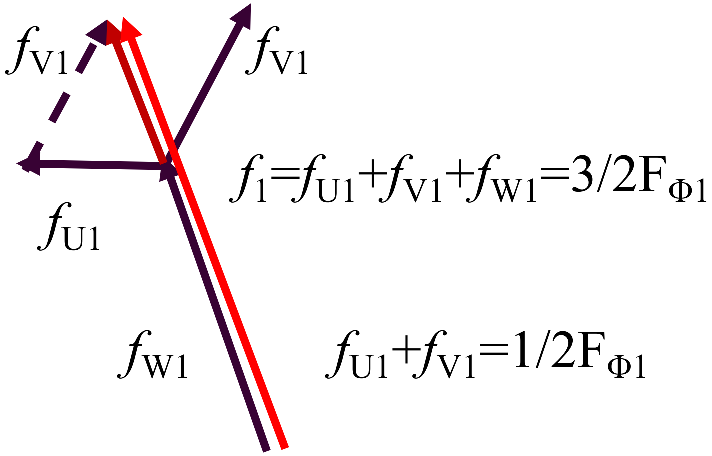
(2)当ωt=60 °， $i_U=\sqrt{2}I\cos 60^0>0$, $i_V=\sqrt{2}I\cos(\text{-}60^\circ)>0$, $i_W=\sqrt{2}I\cos(180^\circ)<0$

$$f_{U1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos 0^\circ\cos 60^\circ=\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{V1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos 0^\circ\cos(-60^\circ)=\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{W1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos 0^\circ\cos(180^\circ)=-F_{\Phi1}$$





电流取首进尾出为正

当ωt=60时,W相电流幅值最大，合成磁动势轴线在W相绕组轴线上，$f_1=3/2F_{\Phi1}$

一、图解法

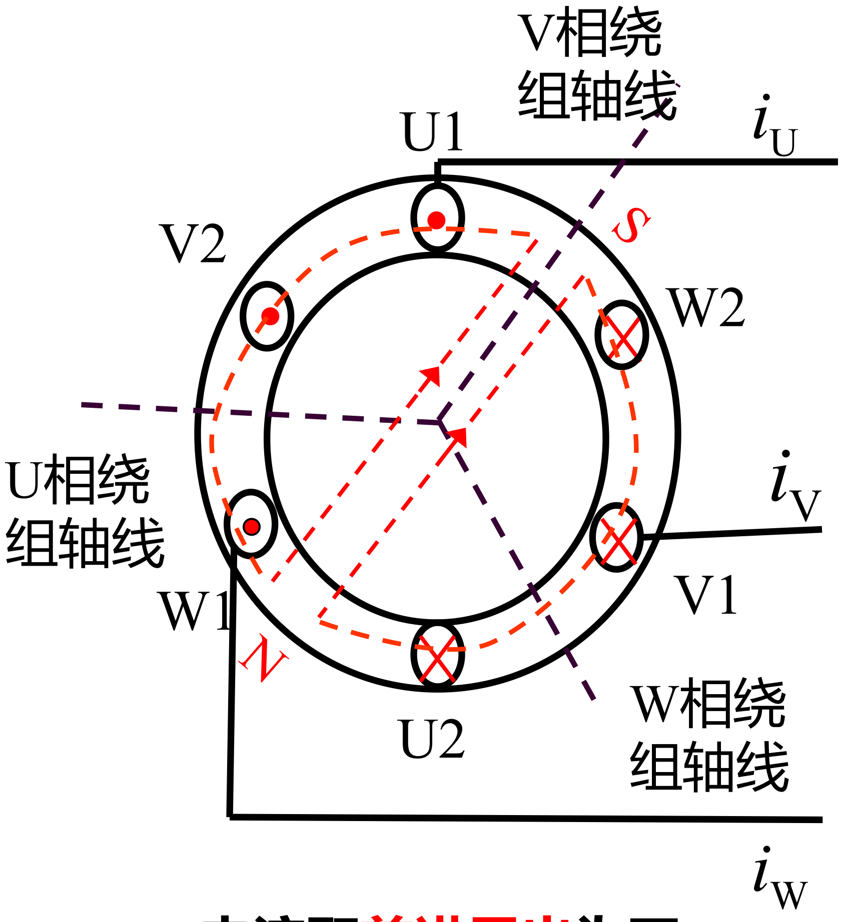
$$i_U=\sqrt{2}I\cos\omega t,\quad i_V=\sqrt{2}I\cos(\omega t\text{-}120^\circ),\quad i_W=\sqrt{2}I\cos(\omega t+120^\circ)$$

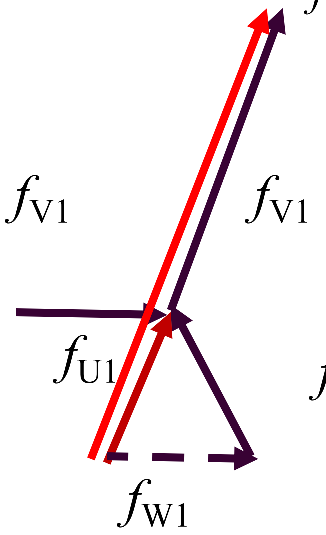
(3)当ωt=120°， $i_U=\sqrt{2}I\cos120^0<0,\quad i_V=\sqrt{2}I\cos(0^\circ)>0,\quad i_W=\sqrt{2}I\cos(240^\circ)<0$

$$f_{U1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos120^\circ=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{V1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(0^\circ)=F_{\Phi1}$$

$$f_{W1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(240^\circ)=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$





$f_{W1}+f_{V1}=1/2F_{\Phi1}$

$f_1=f_{U1}+f_{V1}+f_{W1}=3/2F_{\Phi1}$

电流取首进尾出为正

当ωt=120时,V相电流幅值最大,合成磁动势轴线在V相绕组轴线上，f_1=3/2$F_{\Phi1}$

一、图解法

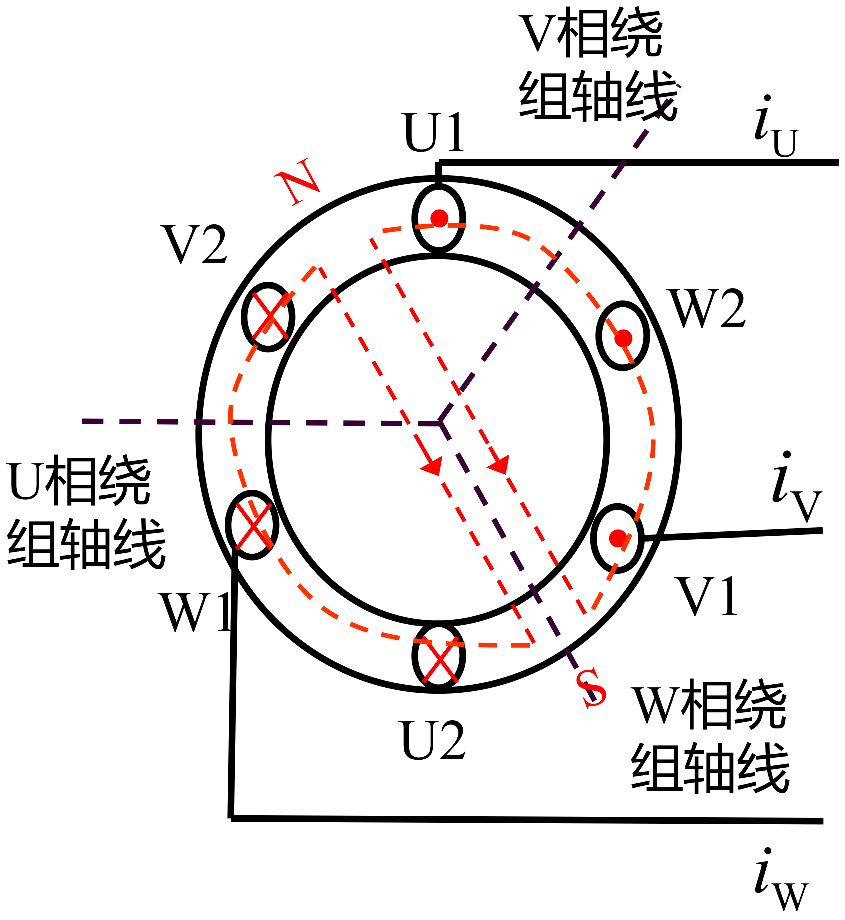
$i_U=\sqrt{2}I\cos\omega t$，$i_V=\sqrt{2}I\cos(\omega t\text{-}120^\circ)$，$i_W=\sqrt{2}I\cos(\omega t+120^\circ)$

(4)当ωt=240°， $i_U=\sqrt{2}I\cos240^0<0$, $i_V=\sqrt{2}I\cos(120^\circ)<0$, $i_W=\sqrt{2}I\cos(360^\circ)>0$

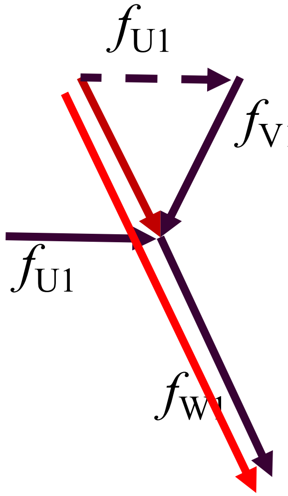
$$f_{U1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos240^\circ=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{V1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(120^\circ)=-\frac{1}{2}F_{\Phi1}$$

$$f_{W1}=F_{\Phi1}\cos\frac{\pi}{\tau}x\cos\omega t=F_{\Phi1}\cos0^\circ\cos(360^\circ)=F_{\Phi1}$$



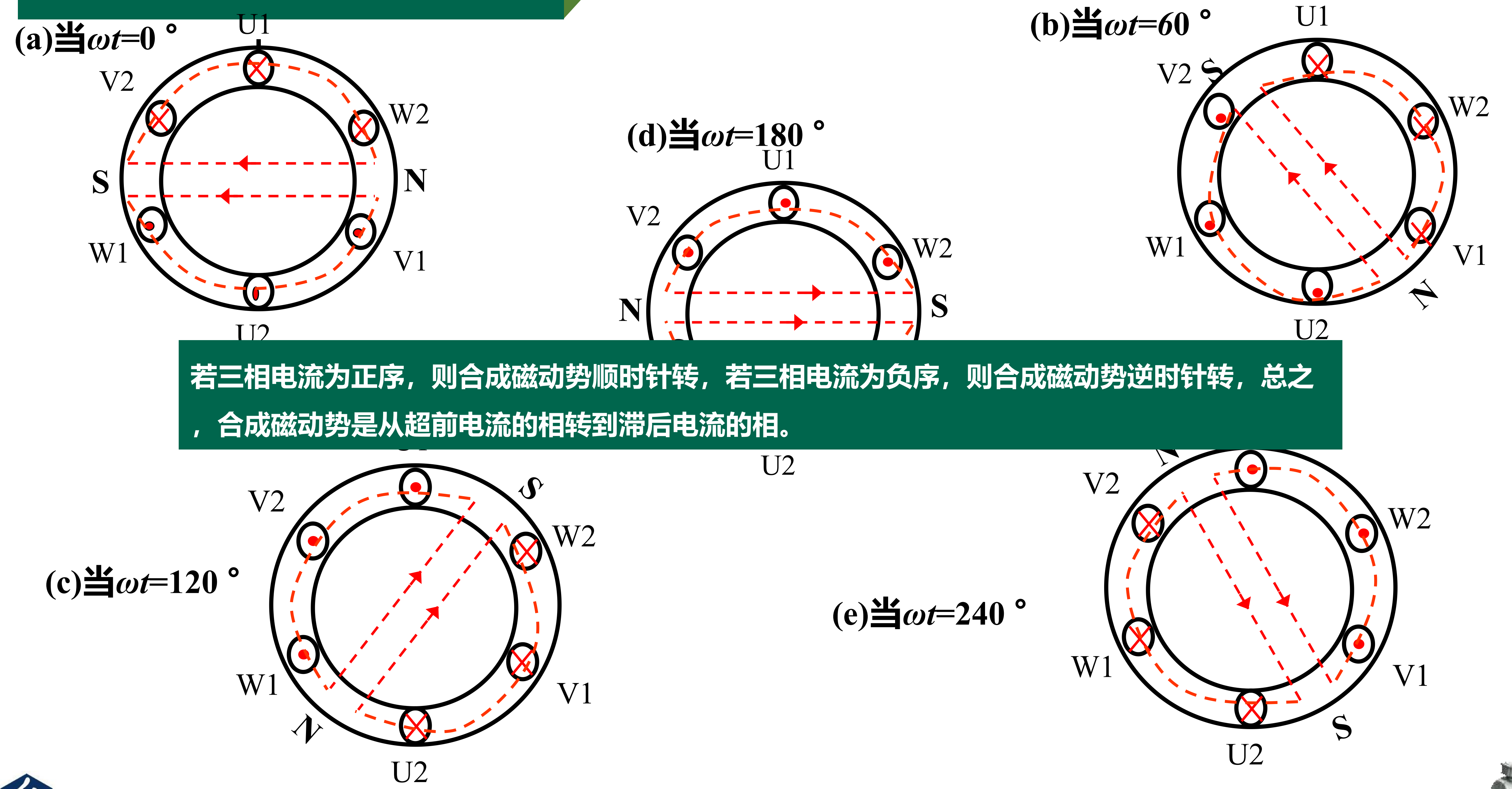
电流取**首进尾出**为正



$f_{U1}+f_{V1}=1/2F_{\Phi1}$

$f_1=f_{U1}+f_{V1}+f_{W1}=3/2F_{\Phi1}$

当ωt=240时,W相电流幅值最大,合成磁动势轴线在W相绕组轴线上，$f_1=3/2F_{\Phi1}$



若三相电流为正序，则合成磁动势顺时针转，若三相电流为负序，则合成磁动势逆时针转，总之，合成磁动势是从超前电流的相转到滞后电流的相。

一、图解法

三相绕组基波合成磁动势是一个幅值恒定不变的圆形旋转磁动势，它有以下主要性质：

幅值

- 幅值是单相脉动磁动势最大幅值的3/2倍；

转向

- 转向由电流相序决定，从超前电流相转到滞后电流相；

转速

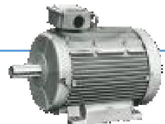
- 转速决定于电流的频率和电机的磁极对数：$n_1 = \dfrac{60\ f_1}{p}$

电网频率

磁极对数

位置

- 当某相电流达最大值时，旋转磁动势的幅值位置刚好转到该相绕组的轴线位置上。



二、数学分析法

三相空间对称绕组通入三相时间对称电流，产生圆形旋转磁场。

将空间坐标的纵轴取在U相绕组轴线上，以顺时针方向作为横坐标轴x的正方向，同时把U相电流达到最大值的瞬间作为t的起点，各相脉振磁动势的表达式为：

$$f_{U1}(x,t)=F_{\Phi1}\cos\left(\frac{\pi}{\tau}x\right)\cos\omega t$$

$$f_{V1}(x,t)=F_{\Phi1}\cos\left(\frac{\pi}{\tau}x-120^\circ\right)\cos\left(\omega t-120^\circ\right)$$

$$f_{W1}(x,t)=F_{\Phi1}\cos\left(\frac{\pi}{\tau}x+120^\circ\right)\cos\left(\omega t+120^\circ\right)$$

二、数学分析法

$$f_{\mathrm{U}1}(x,t)=\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)+\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x\right)$$

$$f_{\mathrm{V}1}(x,t)=\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)+\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x-240^{\circ}\right)$$

$$f_{\mathrm{W}1}(x,t)=\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)+\frac{1}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x-120^{\circ}\right)$$

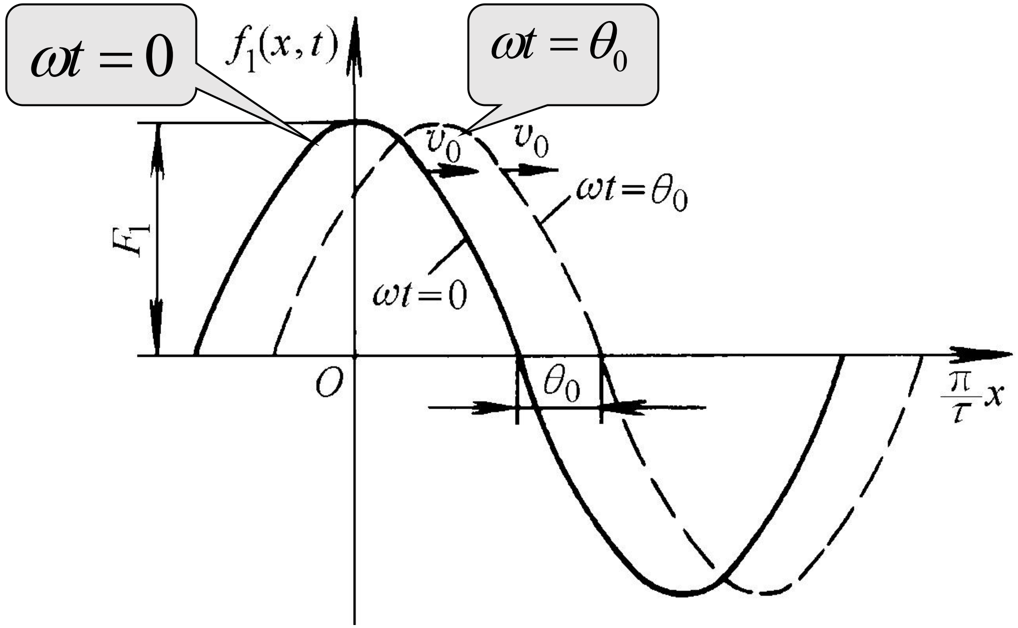
三相合成磁动势为：

$$f_1(x,t)=f_{\mathrm{U}1}(x,t)+f_{\mathrm{V}1}(x,t)+f_{\mathrm{W}1}(x,t)=\frac{3}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=\frac{3}{2}\times 0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N}1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)$$

$$=1.35\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N}1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)$$

二、数学分析法

$$f_1(x,t)=1.35\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N1}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=F_1\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)$$



$\omega t=0$和$\omega t=\theta_0$时磁动势波的位置

当$t=0$,即$\omega t=0$时，$f_1(x,t)=F_1\cos\left(-\frac{\pi}{\tau}x\right)$

当$t=t_1$,即$\omega t_1=\theta_0$时，$f_1(x,t)=F_1\cos\left(\theta_0-\frac{\pi}{\tau}x\right)$

三相合成磁动势表示的是一个在空间按余弦规律分布，幅值F_1恒定不变、随着时间前移而旋转的磁动势波。

二、数学分析法

$$f_1(x,t)=1.35\frac{I_1N_1}{p}k_{\mathrm{N1}}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=F_1\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)$$

磁动势波的旋转速度可由波上任意一点的移动速度来确定，若选择波幅点，则要求：

$$\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=1,\quad \text{即}\ \omega t-\frac{\pi}{\tau}x=0\ \text{或}\ x=\frac{\tau}{\pi}\omega t$$

则磁动势波移动的线速度：

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{\tau}{\pi}\omega=\frac{\tau}{\pi}2\pi f=2\tau f$$

则转速：

$$n_1=\frac{60v}{2p\tau}=\frac{60\times 2\tau f_1}{2p\tau}=\frac{60f_1}{p}\,(\mathrm{r/min})$$

二、数学分析法

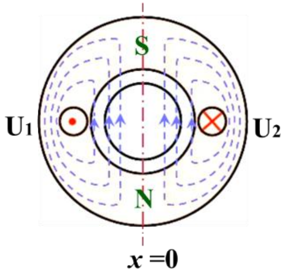
三相合成基波磁动势的特点

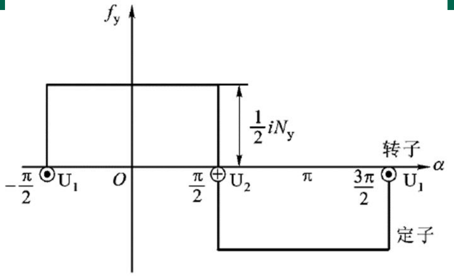
磁动势的性质	旋转磁动势
幅值	$F_1=1.35I_1N_1k_{N1}/p$
转向	由电流领先相转向电流滞后相
转速	$n_1=60f_1/p$ （r/min）
极对数	合成磁动势波长为2τ，极对数为电机极对数p
幅值瞬间位置	合成基波旋转磁动势在空间位置上与绕组电流时间上一致

小结

磁动势

集中整距线圈磁动势波形



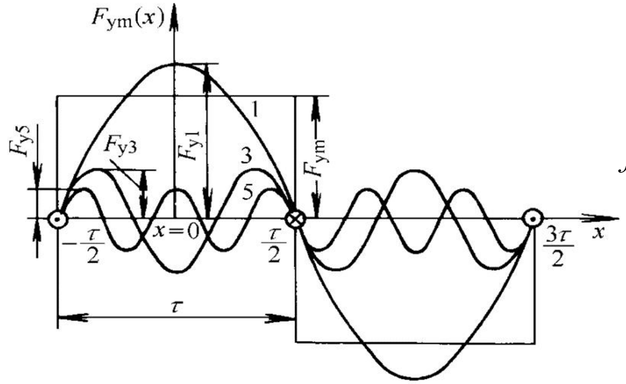


$$\oint H\,\mathrm{d}l = i = N_y i \qquad f_y(\alpha,t)=\frac{1}{2}N_y i \qquad i=\sqrt{2}I\cos\omega t$$

$$f_y=\frac{1}{2}N_y i$$

$$f_y(\alpha,t)=\begin{cases}\dfrac{\sqrt{2}}{2}N_y I\cos\omega t & (-\dfrac{\pi}{2}<\alpha<\dfrac{\pi}{2})\\ -\dfrac{\sqrt{2}}{2}N_y I\cos\omega t & (\dfrac{\pi}{2}<\alpha<\dfrac{3\pi}{2})\end{cases}$$

$$f_y(x,t)=f_y(\alpha,t)$$
$$=\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}N_y I\cos\omega t(\cos\alpha-\frac{1}{3}\cos 3\alpha+\frac{1}{5}\cos 5\alpha-\ldots)$$
$$=0.9N_y I\cos\omega t\left[\cos\frac{\pi}{\tau}x-\frac{1}{3}\cos 3\frac{\pi}{\tau}x+\frac{1}{5}\cos 5\frac{\pi}{\tau}x-\cdots\right]$$



$$f_{y1}(x,t)=\frac{4}{\pi}\times\frac{\sqrt{2}}{2}N_y\,I\cos\omega t\cos\alpha=0.9N_y\,I\cos\omega t\cos\frac{\pi}{\tau}x$$

$$F_{y1}=\frac{4}{\pi}\times\frac{\sqrt{2}}{2}N_y I=0.9\,N_y I$$

整距线圈磁动势

$$\dot{F}_{q1}=F_{y1}\angle 0^\circ+F_{y1}\angle\alpha+\cdots+F_{y1}\angle(q-1)\alpha \qquad F_{q1}=qF_{y1}k_{q1}=0.9IN_y qk_{q1}$$

$$k_{q1}=\frac{F_{q1}}{qF_{y1}}=\left(2R\sin\frac{q\alpha}{2}\Big/q2R\sin\frac{\alpha}{2}\right)=\left(\sin\frac{q\alpha}{2}\Big/q\sin\frac{\alpha}{2}\right)$$ 分布系数

谐波

$$F_{q\nu(y<\tau)}=\frac{1}{\nu}\times 0.9IN_y qk_{q\nu}k_{y\nu}$$
$$k_{y\nu}=\sin\nu y\frac{\pi}{2}$$
$$k_{q\nu}=\sin q\frac{\nu\alpha}{2}\Big/q\sin\frac{\nu\alpha}{2}$$

短距线圈磁动势

$$F_{q1(y<\tau)}=qF_{y1}k_{q1}k_{y1}=0.9IN_y qk_{q1}k_{y1} \qquad k_{y1}=\sin y\frac{\pi}{2}$$ 短距系数

单相绕组磁动势 脉振磁动势

$$F_{\Phi 1}=0.9IqN_y k_{q1}k_{y1} \xrightarrow[N_1=\frac{pqN_y}{b}\Rightarrow qN_y=\frac{bN_1}{p}]{I=\frac{I_1}{b},\quad k_{N1}=k_{q1}k_{y1}} F_{\Phi 1}=0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}$$

三相绕组磁动势 旋转磁动势（图解法，数学分析法）

$$f_1(x,t)=f_{U1}(x,t)+f_{V1}(x,t)+f_{W1}(x,t)=\frac{3}{2}F_{\Phi 1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=\frac{3}{2}\times 0.9\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)=1.35\frac{I_1N_1}{p}k_{N1}\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)$$