

第二篇 交流绕组

第八章 交流绕组的磁动势



-1-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

本章基本要求

- 掌握交流绕组磁动势的分析与计算方法
- 掌握交流绕组脉振、圆形旋转磁动势的性质及相互关系
- 了解漏磁通的概念及漏抗的物理意义。



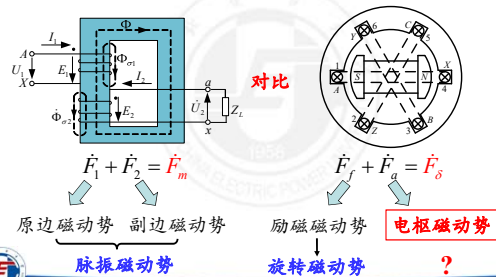
-2-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

§8.1 概述

一、旋转电机气隙磁场的形成



-3-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

二、磁动势分析的基础

(1) 两个定律

■ 安培环路定律: $\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i = F$

■ 磁路欧姆定律: $F = \Phi \sum_{k=1}^n R_{mk}$

(2) 三个假定

- 定、转子铁心磁导率 $\mu_{Fe} = \infty$, 磁动势全部消耗在气隙;
- 槽内电流集中于槽中心, 不考虑齿槽效应, 定、转子间气隙均匀, 气隙磁阻是常数;
- 绕组中的电流随时间按余弦规律变化。



-4-

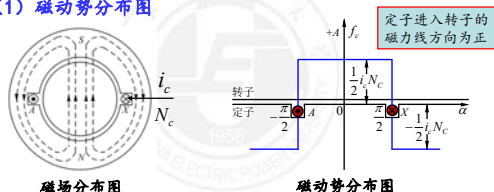
电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

§8.2 一相绕组的磁动势

一、整距线圈的磁动势

(1) 磁动势分布图



-5-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

整距线圈磁动势: $f_c(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{2} i_c N_c & (-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{1}{2} i_c N_c & (\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$ (空间函数)

线圈中的电流: $i_c = \sqrt{2} I_c \cos \omega t$ (时间函数)

$f_c(\alpha, t) = \pm \frac{1}{2} \sqrt{2} I_c N_c \cos \omega t = F_{cm}(\alpha) \cos \omega t$ (空间、时间函数)

式中: $F_{cm}(\alpha) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} I_c N_c = F_{cm} & (-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} I_c N_c = -F_{cm} & (\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$

其中, F_{cm} 为矩形波磁动势的最大幅值。

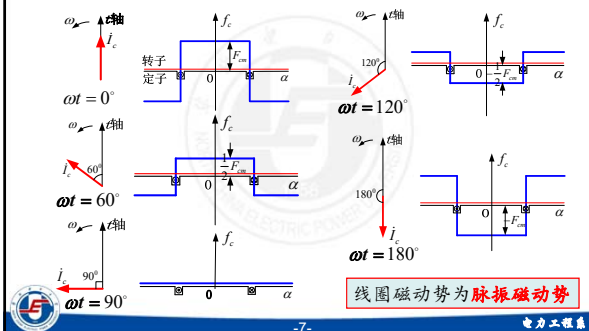


-6-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

线圈磁动势 $f_c(\alpha, t) = F_{cm}(\alpha) \cos \omega t$ 随时间变化情况见下图：

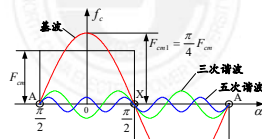


第八章 交流绕组的磁动势

脉振磁动势： $f_c(\alpha, t)$ 波形在**空间位置固定**、**幅值随时间变化**，物理学称之为驻波或脉振波，磁动势称为脉振磁动势。

(2) 磁动势的谐波分析

■ 整距线圈磁动势在空间呈周期性的矩形分布，可以按傅里叶级数分解成**基波**和**一系列高次谐波磁动势**。



第八章 交流绕组的磁动势

只含**余弦项**和**奇数项**，用傅里叶级数可表示为：

$$F_{cm}(\alpha) = F_{cm1} \cos \alpha + F_{cm3} \cos 3\alpha + F_{cm5} \cos 5\alpha + \dots + F_{cmv} \cos v\alpha + \dots$$

其中， v 次谐波的最大幅值为：

$$F_{cmv} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F_{cm}(\alpha) \cos v\alpha d\alpha = \frac{4}{\pi} F_{cm} \frac{1}{v} \sin v \frac{\pi}{2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} I_c N_c \sin v \frac{\pi}{2}$$

式中， $\sin v \frac{\pi}{2}$ 表示傅里叶级数各项的正负。

($v=1, 5, 9, \dots$ 时磁动势为正； $v=3, 7, 11, \dots$ 时为负)

整距线圈的脉动磁动势可表示为：

$$f_c(\alpha, t) = F_{cm}(\alpha) \cos \omega t = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c N_c \left[\cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha + \dots + \frac{1}{v} \cos v\alpha \sin v \frac{\pi}{2} + \dots \right] \cos \omega t$$

第八章 交流绕组的磁动势

1) 基波磁动势

$$f_{c1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c N_c \cos \omega t \cos \alpha = F_{cm1} \cos \omega t \cos \alpha = F_{c1} \cos \alpha$$

式中： $F_{cm1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c N_c = 0.9 I_c N_c$ 为**基波磁动势最大值**。

$F_{c1} = F_{cm1} \cos \omega t = 0.9 I_c N_c \cos \omega t$ 为**基波磁动势幅值**。

2) v 次谐波磁动势

$$f_{cv} = \left(\frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} I_c N_c \sin v \frac{\pi}{2} \right) \cos \omega t \cos v\alpha = F_{cmv} \cos \omega t \cos v\alpha = F_{cv} \cos v\alpha$$

式中： $F_{cmv} = \frac{0.9}{v} I_c N_c \sin v \frac{\pi}{2}$ 为 **v 次谐波磁动势最大值**。

$F_{cv} = F_{cmv} \cos \omega t = \frac{0.9}{v} I_c N_c \sin v \frac{\pi}{2} \cos \omega t$ 为 **v 次谐波磁动势幅值**。

由表达式可知： $F_{cmv} = \frac{1}{v} F_{cm1}$

第八章 交流绕组的磁动势

■ 基波磁动势的矢量表示法



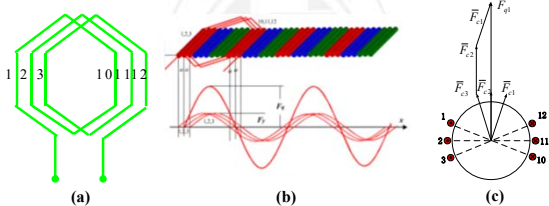
基波磁动势的矢量表示法

- 注意：**
- 1) 磁动势用空间矢量 \vec{F}_{c1} 表示，以区别于时间相量；
 - 2) 矢量的**长度**代表基波磁动势幅值，随时间变化；
 - 3) 矢量**位置**位于线圈轴线+A上，**指向**与线圈电流的方向符合右手螺旋定则。

第八章 交流绕组的磁动势

二、整距线圈组的磁动势

一个线圈组由 q 个匝数相同的线圈串联构成，它们空间相距 α_1 电角度，以 $q=3$ 的整距线圈组为例。



整距线圈组的磁动势 ($q=3$)

第八章 交流绕组的磁动势

用空间矢量法可以求得线圈组的基波合成磁动势幅值：

$$F_{q1} = qF_{c1} \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = qF_{c1} k_{q1}$$

定义： $k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}}$ 为 **基波磁动势的分布因数**。

$$F_{q1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c q N_c k_{q1} \cos \omega t = 0.9 I_c q N_c k_{q1} \cos \omega t$$

$$= F_{qm1} \cos \omega t \text{ 为整距线圈组基波磁动势幅值。}$$

$$F_{qm1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c q N_c k_{q1}$$

$$= 0.9 I_c q N_c k_{q1} \text{ 为整距线圈组基波磁动势最大幅值。}$$



-13-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

整距线圈组的基波磁动势表达式：

$$f_{q1} = F_{q1} \cos \alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c (q N_c) k_{q1} \cos \omega t \cos \alpha$$

线圈组 v 次谐波合成磁动势幅值及其分布因数为：

$$F_{qv} = qF_{cv} k_{qv} \quad k_{qv} = \frac{\sin \frac{vq\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{v\alpha_1}{2}}$$

则整距线圈组的 v 次谐波合成磁动势表达式为：

$$f_{qv} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{2} I_c (q N_c) k_{qv} \sin v \frac{\pi}{2} \cos \omega t \cos v \alpha = F_{qmv} \cos \omega t \cos v \alpha = F_{qv} \cos v \alpha$$

$$\text{式中： } F_{qmv} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{2} I_c (q N_c) k_{qv} \sin v \frac{\pi}{2} \text{ 和 } F_{qv} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{2} I_c (q N_c) k_{qv} \sin v \frac{\pi}{2} \cos \omega t$$

为整距线圈组 v 次谐波磁动势的最大幅值和幅值。



-14-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

■ 课本例7-4：

观察：

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20'}{2}}{3 \sin \frac{20'}{2}} = 0.96$$

$$k_{q3} = \frac{\sin \frac{3q\alpha_1}{2}}{3 \sin \frac{3\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 3 \times 20'}{2}}{3 \sin \frac{3 \times 20'}{2}} = 0.667$$

$$k_{q5} = \frac{\sin \frac{5q\alpha_1}{2}}{5 \sin \frac{5\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{5 \times 3 \times 20'}{2}}{5 \sin \frac{5 \times 20'}{2}} = 0.217$$

结论：

?

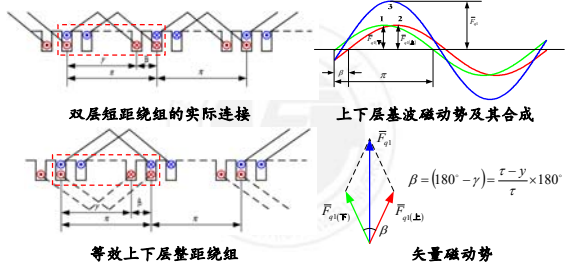


-15-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

三、双层短距线圈组的磁动势



-16-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

定义： $k_{y1} = \sin(\frac{y}{\tau} 90^\circ)$ 为 **基波磁动势的节距因数**。

$$\therefore F_{q1(\text{上})} = F_{q1(\text{下})} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c q N_c k_{q1} \cos \omega t = 0.9 I_c q N_c k_{q1} \cos \omega t$$

\therefore 一对极下双层短距线圈组基波合成磁动势幅值为：

$$F_{q1} = 2F_{q1(\text{上})} k_{y1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c (2q N_c) k_{y1} k_{q1} \cos \omega t$$

$$= 0.9 I_c (2q N_c) k_{w1} \cos \omega t = F_{qm1} \cos \omega t$$

其中， $F_{qm1} = 0.9 I_c (2q N_c) k_{w1}$ 为 **基波合成磁动势最大幅值**。

定义： $k_{w1} = k_{y1} k_{q1}$ 为 **基波磁动势的绕组因数**。



-17-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

一对极下双层短距线圈组 v 次谐波磁动势幅值为：

$$F_{qv} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{2} I_c (2q N_c) k_{yv} k_{qv} \cos \omega t = \frac{0.9}{v} I_c (2q N_c) k_{wv} \cos \omega t = F_{qmv} \cos \omega t$$

其中， $F_{qmv} = \frac{0.9}{v} I_c (2q N_c) k_{wv}$ 为 v 次谐波磁动势最大幅值。

定义： $k_{yv} = \sin v(\frac{y}{\tau} 90^\circ)$ 为 v 次谐波磁动势的节距因数。

$k_{wv} = k_{yv} k_{qv}$ 为 v 次谐波磁动势的绕组因数。

■ 一对极下双层短距线圈组的基波和 v 次谐波磁动势表达式：

$$f_{q1} = F_{q1} \cos \alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_c (2q N_c) k_{w1} \cos \omega t \cos \alpha$$



-18-

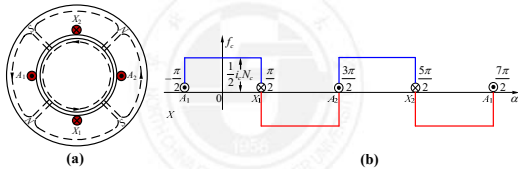
电力工程系

$$f_{qv} = F_{qv} \cos v \alpha = F_{qmv} \cos \omega t \cos v \alpha = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{2} I_c (2q N_c) k_{wv} \cos \omega t \cos v \alpha$$

第八章 交流绕组的磁动势

四、一相绕组的磁动势

一相绕组磁动势等于一对极下一相线圈组的磁动势。



对于多对极电机，由于各对极下磁动势与磁阻组成一个对称的分支磁路，每相绕组处在各对极下产生的磁动势不作用在同一磁路上，所以不能相加。



-19-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

习惯用每相绕组的串联匝数 N 和相电流有效值 I 表示磁动势。

1) 双层绕组

一相绕组的基波和谐波磁动势表达式为：

$$f_{q1} = F_{q1} \cos \alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_c (2qN_c) k_{w1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{qv} = F_{qv} \cos v\alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos v\alpha = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1}{v} I_c (2qN_c) k_{wv} \cos \omega t \cos v\alpha$$

将 $N_c = Na/2pq$ 和 $I_c = I/a$ 代入上式，得：

$$f_{\phi 1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{IN}{p} k_{w1} \cos \omega t \cos \alpha = F_{\phi m1} \cos \omega t \cos \alpha = F_{\phi 1} \cos \alpha$$

$$f_{\phi v} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1}{v} \frac{IN}{p} k_{wv} \cos \omega t \cos v\alpha = F_{\phi mv} \cos \omega t \cos v\alpha = F_{\phi v} \cos v\alpha$$



-20-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

2) 单层绕组

一相绕组的基波和谐波磁动势表达式为：

$$f_{q1} = F_{q1} \cos \alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_c (qN_c) k_{w1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{qv} = F_{qv} \cos v\alpha = F_{qm1} \cos \omega t \cos v\alpha = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1}{v} I_c (qN_c) k_{wv} \sin v \frac{\pi}{2} \cos \omega t \cos v\alpha$$

将 $N_c = aN/pq$ 和 $I_c = I/a$ 代入，表达式与双层绕组情况相同。

■ 因此，一相绕组磁动势：

$$f_{\phi} = 0.9 \frac{IN}{p} \left[k_{w1} \cos \alpha + \frac{1}{3} k_{w3} \cos 3\alpha + \dots + k_{wv} \cos v\alpha + \dots \right] \cos \omega t$$



-21-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

五、脉振磁动势的分解

(1) 解析表达

$$\begin{aligned} f_{\phi 1} &= F_{\phi m1} \cos \omega t \cos \alpha \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t + \alpha) \quad \leftarrow \text{积化和差} \\ &= f'_{\phi 1} + f''_{\phi 1} \end{aligned}$$

■ 一个脉振磁动势可以分解为两个幅值为 $\frac{1}{2} F_{\phi m1}$ 的磁动势。

$$f'_{\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t - \alpha) \quad f''_{\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t + \alpha)$$



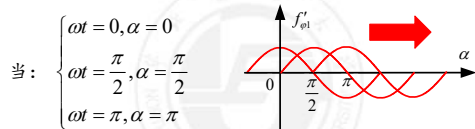
-22-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

考察其幅值所在位置

对： $f'_{\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t - \alpha)$ 令： $\omega t - \alpha = 0$ 则： $\alpha = \omega t$



右行（逆时针）；且角速度为： $\frac{d\alpha}{dt} = \omega (\text{rad/s})$ ← 电弧度

转速为： $\frac{\omega \cdot 60}{p \cdot 2\pi} = \frac{2\pi f_1 \cdot 60}{p \cdot 2\pi} = \frac{60 f_1}{p} = n_1 (\text{r/min})$

同步转速



-23-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

考察其幅值所在位置

对： $f''_{\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos(\omega t + \alpha)$ 令： $\omega t + \alpha = 0$ 则： $\alpha = -\omega t$



左行（顺时针）；且角速度为： $\frac{d\alpha}{dt} = -\omega (\text{rad/s})$ ← 电弧度

转速为： $\frac{-\omega \cdot 60}{p \cdot 2\pi} = \frac{-2\pi f_1 \cdot 60}{p \cdot 2\pi} = \frac{-60 f_1}{p} = -n_1 (\text{r/min})$

同步转速

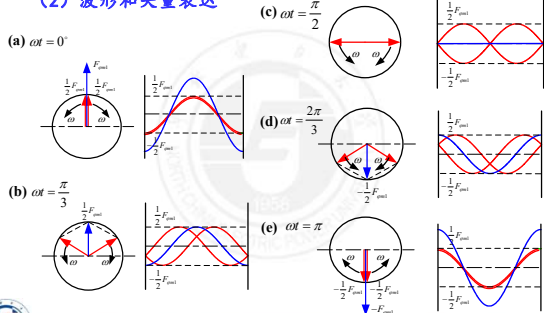


-24-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

(2) 波形和矢量表达



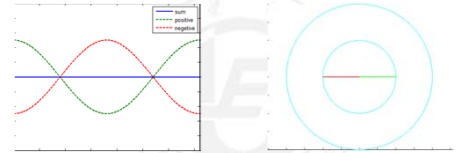
-25-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

$$f_{\phi 1} = F_{\phi m 1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\phi m 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m 1} \cos(\omega t + \alpha)$$

正向旋转磁势 负向旋转磁势



- ① 在空间按正弦分布，幅值随时间按正弦规律变化的脉振磁动势可以分解为两个旋转磁动势分量；
- ② 脉振磁动势的节点和幅值位置不变；
- ③ 每个旋转磁动势：振幅为脉振磁动势振幅的一半，旋转速度相同，旋转方向相反。

-26-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

(3) 结论

- 一相绕组的磁动势为空间位置固定，幅值随时间变化的脉振磁动势，脉振的频率等于电流的频率，脉振磁动势的幅值位于相绕组的轴线上。
- 一个脉振磁动势可分解成两个幅值相等、转向相反、转速相同的圆形旋转磁动势，反之亦然。
所谓圆形旋转是指：磁动势空间矢量的端点随时间的变化在空间移动出的轨迹为圆形。
- 一相绕组基波与谐波脉振磁动势最大幅值与电流最大值成正比，幅值与电流瞬时值成正比。

-27-

电力工程系

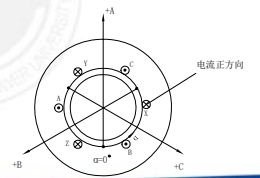
第八章 交流绕组的磁动势

§ 8.3 三相绕组的磁动势

一、基本概念

- 等效绕组及有效匝数：一相绕组用一等效的单层整距集中绕组来代替，该绕组匝数为 Nk_{w1} 。
- 绕组轴线：绕组按照规定正方向流过电流产生的磁势基波幅值的空间位置
- 分析方法：

- 数学分析法
- 波形合成法
- 矢量合成法



-28-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

二、时间和空间坐标的建立

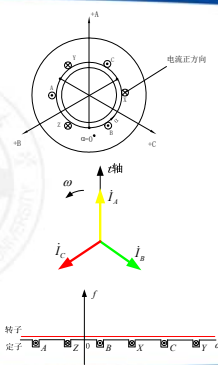
- 时间坐标：A相电流正最大为时间起点，逆时针为正，三相对称电流为：

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

- 空间坐标（二维坐标）：

- 纵坐标：A相绕组轴线，代表磁动势（安匝/极）

- 横坐标：设于定子内圆表面，以空间电角度表示，且逆时针为正。



-29-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

三、三相绕组的基波磁动势

三个相绕组的脉振磁动势合成得三相绕组的合成磁动势。

(1) 数学分析法

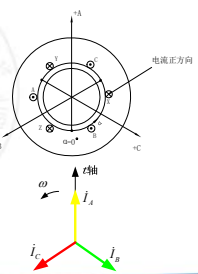
$$f_{A1} = F_{\phi m 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{B1} = F_{\phi m 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi m 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ)$$

$$\text{其中, } F_{\phi m 1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{IN}{p} k_{w1} = 0.9 \frac{IN}{p} k_{w1} (\text{安/极})$$

为每相绕组基波磁动势最大幅值。



-30-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

经积化和差：

$$f_{A1} = F_{\varphi m1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t + \alpha)$$

$$f_{B1} = F_{\varphi m1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) = \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t + \alpha - 240^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\varphi m1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) = \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ)$$

三相基波磁势：

$$f_1 = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \frac{3}{2} F_{\varphi m1} \cos(\omega t - \alpha) = F_1 \cos(\omega t - \alpha)$$

$$\text{其中, } F_1 = \frac{3}{2} F_{\varphi m1} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{IN}{2} k_{w1} = 1.35 \frac{IN}{p} k_{w1} (\text{安/极}) \text{ 为三相基波}$$

合成磁动势幅值。



-31-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

三相基波合成磁动势具有以下性质：

1) **性质**：幅值不变的旋转磁动势，又称为**圆形旋转磁动势**。

2) **幅值**：幅值为单相基波脉振磁动势最大幅值的**3/2倍**。

3) **位置**：当某相电流达到最大时，基波合成磁动势的波幅刚好转到该相绕组的轴线上。磁动势的方向与绕组中电流方向符合右手螺旋定则。

4) **转速**：三相基波合成磁动势的转速与电流频率保持如下严格不变的关系： $n_1 = \frac{60f}{p}$

5) **转向**：三相基波合成磁动势的转向总是**从电流超前的相绕组向电流滞后的相绕组方向转动**。



-32-

电力工程系

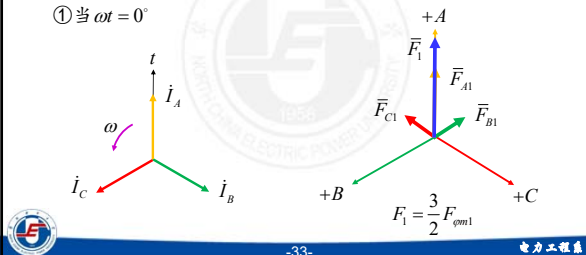
第八章 交流绕组的磁动势

(2) 矢量合成法

三相对称绕组中通入三相对称电流。

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, \quad i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ), \quad i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ)$$

① 当 $\omega t = 0^\circ$



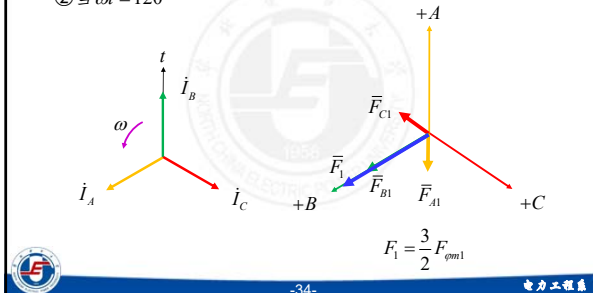
-33-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, \quad i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ), \quad i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ)$$

② 当 $\omega t = 120^\circ$



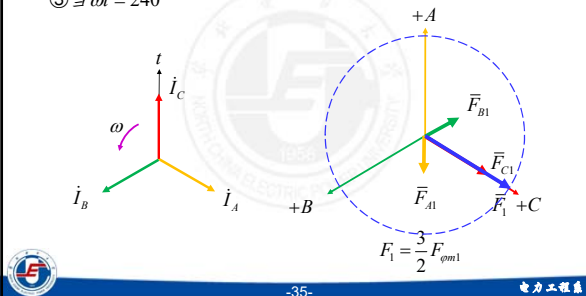
-34-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, \quad i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ), \quad i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ)$$

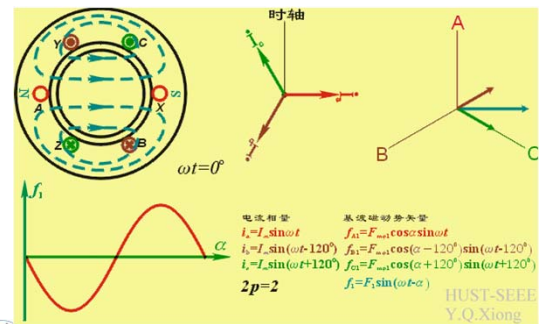
③ 当 $\omega t = 240^\circ$



-35-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势



-36-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

四、三相绕组的谐波磁动势

(1) 三相三次谐波磁动势

$$f_{A3} = F_{\phi m3} \cos \omega t \cos 3\alpha$$

$$f_{B3} = F_{\phi m3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3(\alpha - 120^\circ) = F_{\phi m3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3\alpha$$

$$f_{C3} = F_{\phi m3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3(\alpha - 240^\circ) = F_{\phi m3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3\alpha$$

$$f_3 = f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} = 0$$

思考：三相绕组的合成磁动势是否还包含其他3的倍数(9、15...)次谐波？



-37-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

(2) 三相五次谐波磁动势

$$f_{A5} = F_{\phi m5} \cos \omega t \cos 5\alpha = \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t - 5\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t + 5\alpha)$$

$$f_{B5} = F_{\phi m5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 5(\alpha - 120^\circ) = \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t - 5\alpha + 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t + 5\alpha)$$

$$f_{C5} = F_{\phi m5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 5(\alpha - 240^\circ) = \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t - 5\alpha - 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t + 5\alpha)$$

$$f_5 = f_{A5} + f_{B5} + f_{C5} = \frac{3}{2} F_{\phi m5} \cos(\omega t + 5\alpha) = F_5 \cos(\omega t + 5\alpha)$$

$$\text{其中, } F_5 = \frac{3}{2} F_{\phi m5} = \frac{3}{2} \frac{0.9}{5} \frac{IN}{p} k_{w5} = \frac{1}{5} \times 1.35 \frac{IN}{p} k_{w5} (\text{安/极})$$

为五次谐波合成磁动势的幅值。



-38-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

结论：

1) 三相五次谐波合成磁动势是一幅值恒定的旋转磁动势。

2) 旋转磁动势的幅值等于一相脉振磁动势五次谐波最大幅值的3/2倍。

3) 旋转磁动势的转速可由 $(\omega t + 5\alpha) = 0$ 求出：

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{1}{5} \omega \quad n_5 = -\frac{1}{5} n_1$$

4) $\nu = 6k - 1$ (k 为正整数) 次谐波合成磁动势都为旋转磁动势，旋转方向与基波的相反，转速为基波的 $1/(6k - 1)$ 。



-39-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

(3) 三相七次谐波磁动势

$$f_{A7} = F_{\phi m7} \cos \omega t \cos 7\alpha = \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t - 7\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t + 7\alpha)$$

$$f_{B7} = F_{\phi m7} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 7(\alpha - 120^\circ) = \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t - 7\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t + 7\alpha - 240^\circ)$$

$$f_{C7} = F_{\phi m7} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 7(\alpha - 240^\circ) = \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t - 7\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t + 7\alpha - 120^\circ)$$

$$f_7 = f_{A7} + f_{B7} + f_{C7} = \frac{3}{2} F_{\phi m7} \cos(\omega t - 7\alpha) = F_7 \cos(\omega t - 7\alpha)$$

$$\text{其中, } F_7 = \frac{3}{2} F_{\phi m7} = \frac{3}{2} \frac{0.9}{7} \frac{IN}{p} k_{w7} = \frac{1}{7} \times 1.35 \frac{IN}{p} k_{w7} (\text{安/极})$$

为七次谐波合成磁动势的幅值。



-40-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

结论：

1) 三相七次谐波合成磁动势是一幅值恒定的旋转磁动势。

2) 旋转磁动势的幅值等于一相脉振磁动势七次谐波最大幅值的3/2倍。

3) 旋转磁动势的转速可由 $(\omega t - 7\alpha) = 0$ 求出：

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{7} \omega \quad n_7 = \frac{1}{7} n_1$$

4) $\nu = 6k + 1$ (k 为正整数) 次谐波合成磁动势都为旋转磁动势，旋转方向与基波一致，转速为基波的 $1/(6k + 1)$ 。



-41-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

$$\text{思考: } \nu = \begin{cases} 3k \\ 6k + 1 \quad (k \text{ 为正整数}) \\ 6k - 1 \end{cases} \text{ 能否包含所有谐波?}$$

谐波磁动势的影响：

1) **同步电机：**谐波磁动势产生的谐波磁场将在转子表面产生涡流损耗，引起电机发热，并降低电机效率；

2) **异步电机：**谐波磁动势除产生发热损耗外，还会产生一定的寄生转矩，影响电机的起停性能，有时电机根本不能起动或达不到正常转速。

问题：如何削弱或消除磁动势中的高次谐波？



-42-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

§8.4 椭圆形旋转磁动势*

举例：已知三相交流绕组的电流：

$$i_A = \sqrt{2}I_A \cos \omega t$$

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

$$i_C = 0$$

分析：三相交流绕组的磁动势：

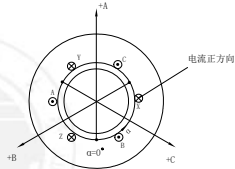
$$f_{A1} = F_{\text{pm1}} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t + \alpha) = F'_{A1} + F''_{A1}$$

$$f_{B1} = F_{\text{pm2}} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) = \frac{1}{2} F_{\text{pm2}} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\text{pm2}} \cos(\omega t + \alpha - 240^\circ) = F'_{B1} + F''_{B1}$$

$$f_{C1} = 0$$

定义：正转磁动势 $\bar{F}_1^+ = \bar{F}'_{A1} + \bar{F}'_{B1}$

反转磁动势 $\bar{F}_1^- = \bar{F}''_{A1} + \bar{F}''_{B1}$



-43-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

1) 椭圆形旋转磁动势幅值：

$$F_1 = \sqrt{F_1^{+2} + F_1^{-2} + 2F_1^+ F_1^- \cos \beta}$$

2) 椭圆形旋转磁动势的转向：

与磁动势强的转向一致

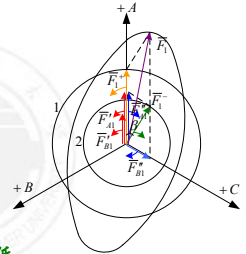
3) 椭圆形旋转磁动势的转速：

$$n' = \frac{F_1^{+2} - F_1^{-2}}{F_1^2} n_1$$

短轴处转速最高，长轴处转速最低。

$$\text{平均转速 } n_1 = \frac{60f}{p} \text{ r/min}$$

椭圆形旋转磁动势

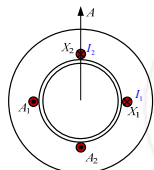


-44-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

旋转磁动势产生条件：只要电机两相以上绕组在空间上有相位差，通入时间上有相位差的电流，就能产生旋转磁动势。



$$I_1 = I \cos \omega t \quad I_2 = I \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$f_{A1} = F_{\text{pm1}} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t + \alpha)$$

$$f_{A2} = F_{\text{pm1}} \cos(\omega t - 90^\circ) \cos(\alpha - 90^\circ)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\text{pm1}} \cos(\omega t + \alpha - 180^\circ)$$

$$f_1 = f_{A1} + f_{A2} = F_{\text{pm1}} \cos(\omega t - \alpha)$$

1) 圆形旋转磁动势。条件： \bar{F}_1^+ 、 \bar{F}_1^- 中一个为零；

2) 椭圆形旋转磁动势。条件： $\bar{F}_1^+ \neq 0$ 且 $\bar{F}_1^- \neq 0$ 且 $\bar{F}_1^+ \neq \bar{F}_1^-$ ；

3) 脉振磁动势。条件： $\bar{F}_1^+ = \bar{F}_1^- \neq 0$ 。



-45-

电力工程系

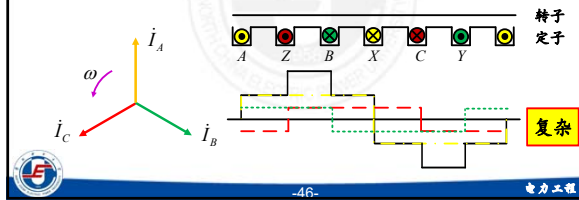
第八章 交流绕组的磁动势

§8.5 三相绕组合成磁动势波形图

对电机磁场定性分析时，希望直接作出磁动势的空间分布。

一、磁动势迭加法

三相的三个脉振磁动势逐点相加。

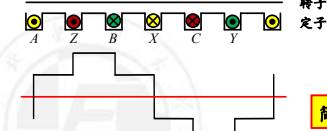
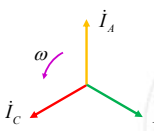


-46-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

二、磁动势积分法



- ① 根据每极每相槽数确定各槽属于哪一相；
- ② 根据瞬时电流大小和方向，确定各槽安匝数和电流方向；
- ③ 磁动势只在槽的位置发生改变，两槽间保持不变，遇到槽电流为⊙时上升一个高度，槽电流为⊗时下降一个高度；
- ④ 作出横坐标，使坐标轴上下曲线包围的面积相等；



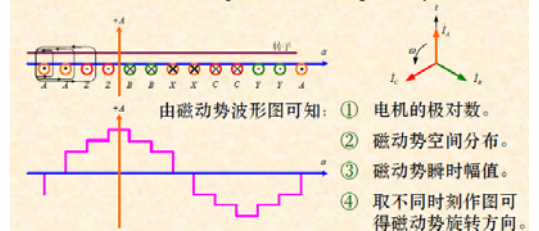
-47-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

举例说明：

已知单层绕组： $m=3$ $p=1$ $Z=12$ $q=2$ $y=\tau=6$



-48-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

§8.6 交流绕组漏磁通和漏抗的概念

一、交流绕组磁通的划分

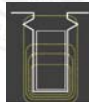
(1) 主磁通

通过空气隙与定、转子绕组同时相交链的磁通。

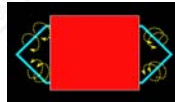
(2) 漏磁通

仅与定子绕组交链或即使进入转子也不产生有用转矩的磁通。

- a. 槽漏磁通
- b. 端部漏磁通
- c. 谐波漏磁通



槽漏磁通



端部漏磁通



-49-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

问题：为何将谐波磁通归为漏磁通？

- 1) 虽然谐波漏磁通与定转子绕组同时相交链，但在转子绕组中感应的电动势**不会产生有用转矩**；
- 2) 谐波漏磁通与槽部和端部漏磁通在定子绕组中感应的电动势**频率相同**。

- 槽漏磁通**随时间交变**在一相绕组感应电动势频率为 f ；
- 端部漏磁通**随时间交变**在一相绕组感应电动势频率为 f ；
- 谐波漏磁通的**空间旋转**在一相绕组感应的电动势亦为 f 。

$$f_v = \frac{p_r n_r}{60} = \frac{(vp)(n_1/v)}{60} = \frac{pn}{60} = f$$

漏磁通随时间变化的频率即为感应电动势的频率



-50-

电力工程系

第八章 交流绕组的磁动势

二、漏磁通感应电动势的表达

漏磁电动势：漏磁通在定子绕组里感应的电动势。

■ 仿照变压器中**场化路**的分析方法：

交流绕组漏磁通随时间交变，在一相绕组中感应的电动势可以用电流在一电抗上的压降加以表示：

$$\dot{E}_\sigma = -jI\dot{X}_\sigma$$

式中： I 为定子电流的有效值； X_σ 为定子绕组的漏电抗。

■ 漏电抗对电机运行性能的影响

漏电抗影响端电压、励磁电流、稳态、暂态短路电流。



-51-

电力工程系