

第二篇 交流绕组

第七章 交流电机的绕组和电动势



-1-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

本章基本要求

- 掌握交流绕组的排列方法
- 掌握交流绕组的电动势的计算及绕组因数的意义



-2-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

§ 7.1 交流绕组的基本概念

一、交流绕组概述

定义：在电机运行过程中**感应电动势**、**流过交流电流**的绕组，起到**实现机电能量转换**的作用。

应用：同步电机**电枢绕组**和异步电机**定子、转子绕组**。

对交流绕组的要求：

- 1) 三相感应电动势对称，即**大小相等**且**相位互差120°**；
- 2) 电动势和磁动势尽可能接近**正弦波**，尽可能大的基波电动势和磁动势，尽可能小的谐波电动势和磁动势；
- 3) 绝缘可靠，机械强度、散热良好，铜耗小、节省材料。



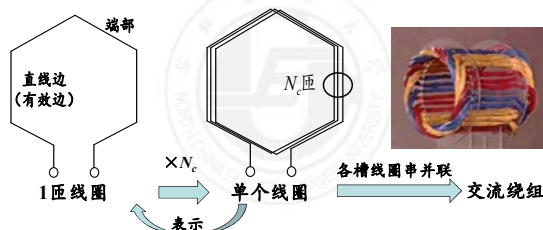
-3-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

二、交流绕组的有关术语

(1) 线图



● 作图时为了简便，通常用1匝线圈表示单个线圈

-4-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

典型的交流绕组：



交流绕组铜线



成型线圈

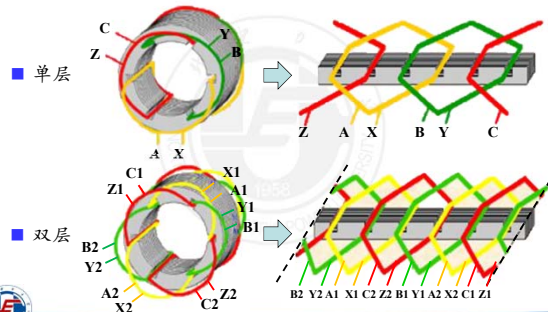


-5-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(2) 单层和双层绕组



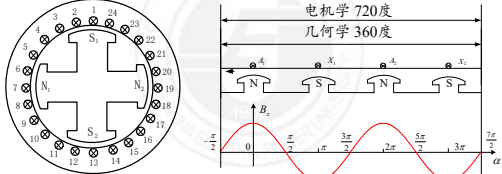
-6-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(3) 机械角度和电角度

- 几何学一个圆周的空间角度称为 360° **机械角度**
- 电机学中一对极所张空间角度为 360° **空间电角度**



空间电角度 α_{el} 和空间机械角度 α_{mac} 的关系： $\alpha_{el} = p \cdot \alpha_{mac}$



-7-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(4) 槽间角 α_1

相邻两槽相隔的空间电角度，用 α_1 表示。



- 当总槽数为 Z ，极对数为 p 时，槽间角： $\alpha_1 = \frac{p \times 360^\circ}{Z}$

思考：一对极电机，抽出转子，换为两对极转子，槽间角是否变化？



-8-

电力工程系

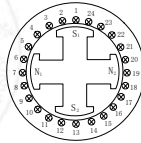
第七章 交流电机的绕组和电动势

(5) 每极每相槽数 q

- 绕组布置原则：①每相所占的槽数应该**相等**；
②各相绕组按一定顺序在铁心槽中**均匀分布**。

- p 对极、 m 相的电机：

$$q = \frac{Z}{2pm}$$



- | | |
|-------------|---------------------|
| $q=1$ ：集中绕组 | q =整数：整数槽绕组 |
| $q>1$ ：分布绕组 | q =分数：分数槽绕组（不做要求） |



-9-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(6) 相带

每极下一相绕组所占的宽度，用电角度表示。

- 对于三相绕组： $q\alpha_1 = \frac{Z}{2pm} \times \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{2m} = 60^\circ$ (**60度相带**)



(a) 1对极



(b) 2对极

60度相带的划分

A、X；B、Y；C、Z
互差180度电角度；
A、B、C；X、Y、Z
互差120度电角度。



-10-

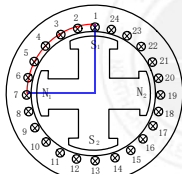
电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(7) 极距 τ

电枢表面相邻磁极轴线间的距离。

- 表示方法：



极距

- (1) 用电枢圆周长表示：
 $\tau = \pi D / 2p$ (米、厘米)
- (2) 用电枢槽数表示：
 $\tau = Z / 2p$ (槽/极)
- (3) 用空间电角度表示：
 $\tau = 180^\circ$ 电角度或 π 电弧度



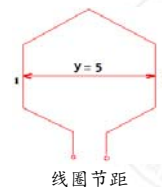
-11-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(8) 节距 y

一个线圈两有效边之间的距离，一般用**槽数**表示。



线圈节距

- 绕组按节距分类：

- 1) 整距绕组： $y = \tau$
- 2) 短距绕组： $y < \tau$
- 3) 长距绕组： $y > \tau$

为使线圈电动势接近最大，线圈的节距应**等于或近于极距**！



-12-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

§7.2 三相单层绕组

一、三相单层集中整距绕组



$$q = Z/2pm = 6/(2 \times 3) = 1 \text{ (集中绕组)}$$

$$y = \tau = Z/2p = 3 \text{ (整距绕组)}$$

集中整距绕组的优缺点：简单，但感应电动势波形不好，绕组集中，运行时散热困难，电枢表面空间利用率低。



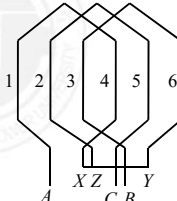
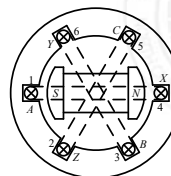
-13-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

绕组展开图：为表示各线圈的位置和连接，把定子沿轴剖开后展开，每槽用一直线表示，槽上编以号码，按照节距连成线圈。

■ 星形联结绕组展开图：

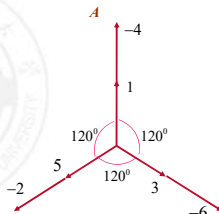
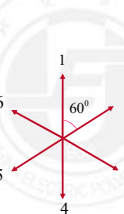
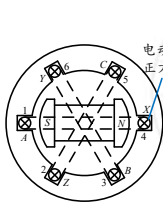


-14-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

槽电动势星形图：规定导体电动势正方向后，作出所有槽导体基波电动势相量后的相量图。



规定电动势穿进纸面为正

槽电动势星形图

三相对称电动势

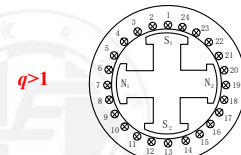
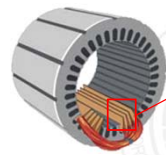


-15-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

二、三相单层分布绕组



■ 举例：一交流电机定子槽数 $Z=24$ ，极数 $2p=4$ ，绘制三相单层分布绕组的电动势星形图及绕组展开图。

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \quad \alpha_1 = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ \quad q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$



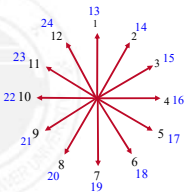
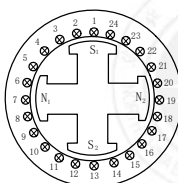
-16-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(1) 作槽电动势星形图

规定电动势穿进纸面为正



思考：2对极电机电动势星形重复两圈， p 对极电机呢？



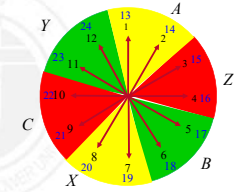
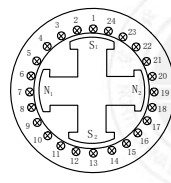
-17-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(2) 分相（根据 $q=2$ 把各槽号分配到各个相）

分相原则：使每相电动势最大，且三相电动势对称。



	A	Z	B	X	C	Y
第一对极	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12
第二对极	13,14	15,16	17,18	19,20	21,22	23,24



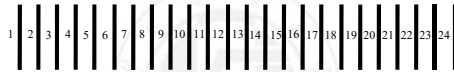
-18-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(3) 绘制绕组展开图

1) 画出槽展开图并标号



2) 根据槽电动势星形图分相



3) 根据槽电动势星形图和相带划分把槽中导体连成线圈
需要说明的是, 导体间连接的先后次序对合成电动势并无影响, 因此**连接方法有几种**。

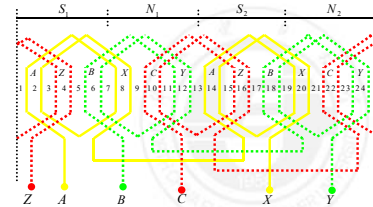


-19-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

a) **单层叠绕组**: 一个线圈组的 q 个线圈端部相叠。



特点: 端接较长, 费铜线。

- 每个线圈组由 q 个匝数为 N_c 的线圈串联而成;
- 每对极每相仅有1个线圈组**, 则电机**每相共有 p 个线圈组**;
- 每相 p 个线圈组可串可并, 则**最大并联支路数 $a=p$** 。

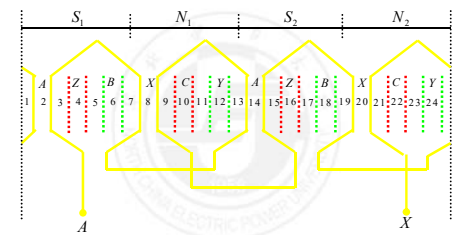


-20-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

*b) **链式绕组**: 各线圈的排列形如长链。



特点: 端接较短, 可节省铜线, 常用于4极、6极及部8极小型电机。

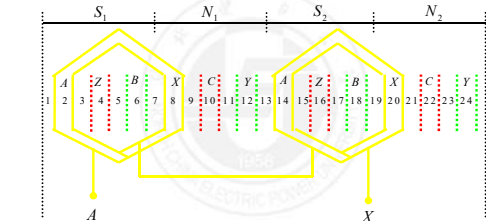


-21-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

*c) **同心式绕组**: 一个线圈套着一个线圈, 同一组的几个线圈是“同心”的。



特点: 两个线圈的节距不相等, 同一相线圈端部不交叠, 布置和嵌线方便, 常用于小型两极异步电机。



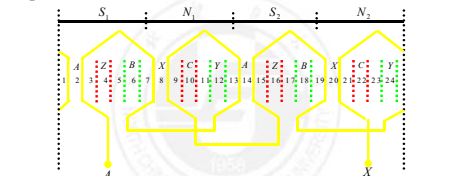
-22-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

*d) **交叉式绕组**: 每对极下依次按“二大一小”交叉排列。

- 当 q =偶数, 可把每个相带的槽分成两半连成链式绕组



- 但当 q =奇数, 每个相带的槽不能均分。

举例: $Z=36, 2p=4, m=3. (q=3)$

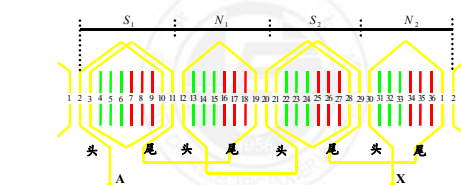


-23-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

	A	Z	B	X	C	Y
第一对极	1,2,3	4,5,6	7,8,9	10,11,12	13,14,15	16,17,18
第二对极	19,20,21	22,23,24	25,26,27	28,29,30	31,32,33	34,35,36



小结: 链式、同心式和交叉式绕组, 虽然线圈节距不等于整距, 但仍算整距绕组。



-24-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

三、单层绕组的特点

- 1) 每一线圈占用两个槽，绕组**总线圈数为总槽数一半**；
- 2) 不需要层间绝缘，提高了槽的利用率；没有层间绝缘击穿的问题，增加了电机工作的可靠性；
- 3) 嵌线方便；
- 4) 节距受到一定的限制（**单层绕组一定是整距**），不能改善电动势和磁势波形。



-25-

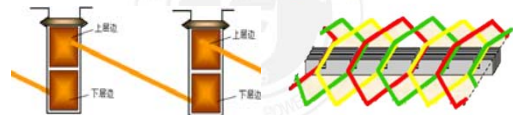
电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

§7.3 三相双层绕组

一、双层绕组的定义

每个槽内有上、下两个线圈边，线圈的**一条边放在某一槽的上层，另一条边则放在相隔 y 槽的下层**。



一个槽可以放两个有效边

一个线圈包含两个有效边

双层绕组线圈数正好**等于**槽数



-26-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

二、双层绕组的优点

- 1) 可以选择有利的节距（**短距**），并同时采用**分布**绕组，改善电动势和磁势波形；
- 2) 所有线圈具有同样的尺寸，便于制造；
- 3) 端部形状排列整齐，有利于散热和增强机械强度。



成型线圈



端部形状

10kW以上三相交流电机，定子绕组均采用双层绕组！



-27-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

三、双层绕组的分类

双层绕组根据各线圈连接的不同可分为**叠绕组**和**波绕组**。

■ **举例**：某交流电机定子绕组的 $Z=24$ ， $2p=4$ ， $m=3$ ，节距 $y=5$ ，试作出**线圈电动势的星形图**及**绕组展开图**。

计算：

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$



-28-

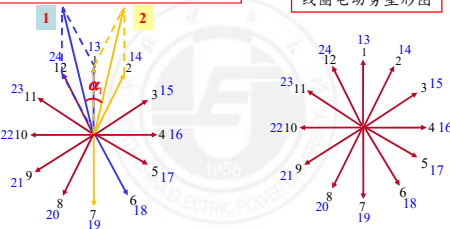
电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(1) 绘制线圈电动势相量图

线圈电动势向量=两个槽电动势向量和

槽电动势星形图代表线圈电动势星形图



槽电动势星形图

线圈电动势星形图



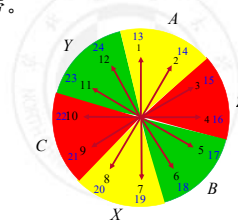
-29-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(2) 分相

按照 $q=2$ 把电动势星形图分成A、Z、B、X、C、Y六个相带。



由图知：1、2、7、8、13、14、19、20槽上层边属于A相。



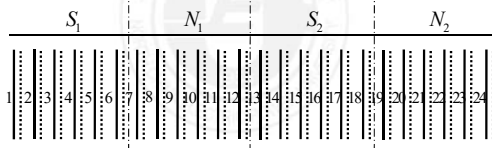
-30-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(3) 画绕组展开图

1) 把电枢展开, 每槽以**实线表示线圈上层边**, **虚线表示线圈下层边**, 在实线旁标以槽号, 把槽按极数等分成 $2p$ 份。

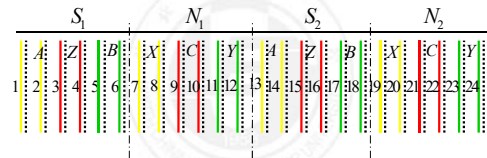


-31-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

2) 按电动势星形图把每对极下的槽分成A、Z、B、X、C、Y六个相带。**注意: 这些相带只表示该相线圈上层边所在槽。**



3) 根据线圈的节距 $y=5$, 把上、下层连成线圈。多个线圈串联形成一个线圈组。根据联接方式不同可以分为:

叠绕组和波绕组。

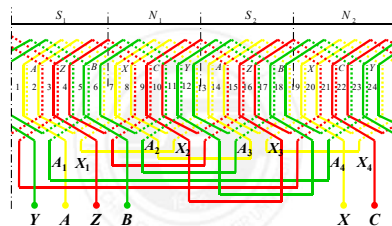


-32-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

a) 双层叠绕组



- 每个线圈组由 q 个匝数为 N_c 的线圈串联而成;
- 每对极每相含2个线圈组, 则电机每相共有 $2p$ 个线圈组;
- 每相 $2p$ 个线圈组可串可并, 则**最大并联支路数 $a=2p$** 。



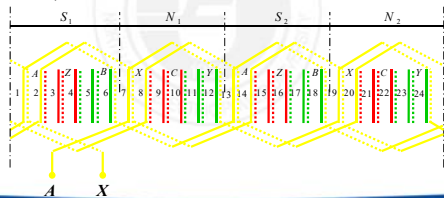
-33-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

*b) 双层波绕组

同一极性下属于同一相的线圈按照一定次序串联成一组, 再把另一极性下属于同一相的线圈按照一定次序串联成一组, 最后把两大组线圈接成串联或者并联, 构成一相。



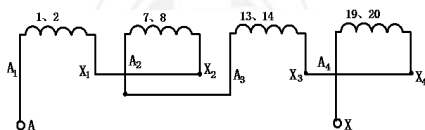
-34-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

4) 根据电压和电流的要求, 把一相的线圈组串联或并联组成一相绕组。

a) 双层叠绕组



(a) 三相双层叠绕组展开图 ($a=1$)

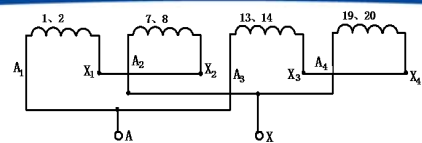
注: a 表示一相绕组的并联支路数



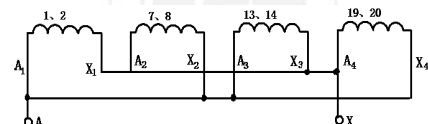
-35-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势



(b) 三相双层叠绕组展开图 ($a=2$)



(c) 三相双层叠绕组展开图 ($a=4$)

思考: p 对极, 双层叠绕组, 一相的最大并联支路数等于?

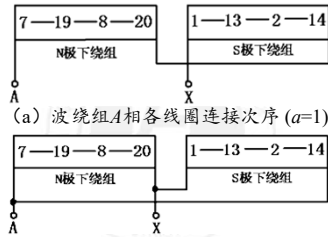


-36-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

*b) 双层波绕组



(a) 波绕组A相各线圈连接次序 ($a=1$)

(b) 波绕组A相各线圈连接次序 ($a=2$)

思考: p 对极, 双层波绕组, 一相的最大并联支路数等于?



-37-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

说明:

- 1) 波绕组采用短距可以改善电动势和磁动势波形, 但不能节约端部用铜。
- 2) 波绕组的组间连接线少, 绑扎固定比较简单, 重量分布易于平衡, 多用于大、中型水轮发电机定子绕组和绕线转子异步电机的转子绕组。



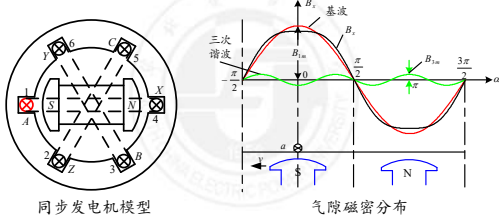
-38-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

§ 7.4 交流绕组的感应电动势

一、导体电动势



同步发电机模型

气隙磁密分布

$$B_x = B_{1m} \cos \alpha - B_{3m} \cos 3\alpha + B_{5m} \cos 5\alpha + \dots + B_{vm} \cos v\alpha \sin v \frac{\pi}{2} + \dots$$



-39-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

- 假定: 转子(磁场)不动, 定子导体以速度 v 反向方转动。

经过 t 秒, 导体转过电角度:

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} v t = \frac{\pi}{\tau} \frac{\pi D n}{60} \cdot t = \frac{\pi}{\tau} \left(2 \cdot \frac{\pi D}{2p} \cdot \frac{pn}{60} \right) \cdot t = \frac{\pi}{\tau} 2\tau f t = 2\pi f t = \omega t$$

因此, t 秒后导体处的磁密:

$$B_x = B_{1m} \cos \alpha - B_{3m} \cos 3\alpha + B_{5m} \cos 5\alpha + \dots + B_{vm} \cos v\alpha \sin v \frac{\pi}{2} + \dots$$

导体感应电动势瞬时值:

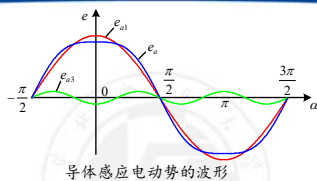
$$e_a = B_x l v = E_{1m} \cos \alpha - E_{3m} \cos 3\alpha + E_{5m} \cos 5\alpha + \dots + E_{vm} \cos v\alpha \sin v \frac{\pi}{2} + \dots$$



-40-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势



导体感应电动势的波形

导体基波和 v 次谐波电动势的有效值分别为:

$$E_{a1} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{B_{1m} l v}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{2} B_{1m} \right) l (2\tau f) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f (B_{1m} l \tau) = 2.22 f \Phi_1$$

$$E_{av} = \frac{E_{vm}}{\sqrt{2}} = \frac{B_{vm} l v}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{2} B_{vm} \right) l (2\tau f) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} v f \left(B_{vm} l \frac{\tau}{v} \right) = 2.22 v f \Phi_v$$

其中, $\Phi_1 = B_{1m} l \tau$ 、 $\Phi_v = B_{vm} l \frac{\tau}{v}$ 为基波、 v 次谐波每极磁通量



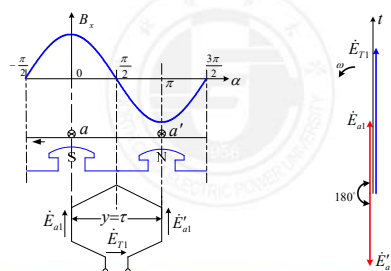
-41-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

二、线圈电动势与节距因数

(1) 整距线圈和线圈电动势



-42-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

整距**线圈**基波电动势：

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{a1} - \dot{E}'_{a1} = 2\dot{E}_{a1}$$

整距**线圈**基波电动势有效值：

$$E_{T1} = 2E_{a1} = 2 \times 2.22 f \Phi_1 = 4.44 f \Phi_1$$

整距**线圈**基波电动势有效值：

$$E_{c1} = N_c E_{T1} = 4.44 f N_c \Phi_1$$

整距**线圈** ν 次谐波电动势有效值：

$$E_{c\nu} = 4.44 \nu f N_c \Phi_\nu$$

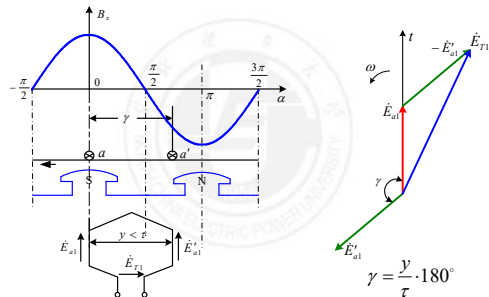


-43-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(2) 短距线圈和线圈电动势



-44-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

短距**线圈**基波电动势：

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{a1} - \dot{E}'_{a1}$$

短距**线圈**基波电动势有效值：

$$E_{T1} = 2E_{a1} \cos\left(\frac{180^\circ - \gamma}{2}\right) = 2E_{a1} \sin\left(\frac{\gamma}{2} \cdot 90^\circ\right) = 2E_{a1} k_{y1} = 4.44 f k_{y1} \Phi_1$$

定义： $k_{y1} = \sin\left(\frac{\gamma}{2} \cdot 90^\circ\right)$ 为绕组的**基波节距因数**。

短距**线圈**基波电动势有效值：

$$E_{c1} = 4.44 f N_c k_{y1} \Phi_1$$



■ **比较：**整距与短距线圈的基波电动势有何区别？

-45-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

对 ν 次谐波，短距**线圈**两导体间相隔的电角度为：

$$\nu \left(\frac{\gamma}{\tau} \times 180^\circ \right) = \nu \gamma$$

短距**线圈** ν 次谐波电动势有效值：

$$E_{c\nu} = 4.44 \nu f N_c k_{y\nu} \Phi_\nu$$

定义： $k_{y\nu} = \sin \nu \left(\frac{\gamma}{\tau} \cdot 90^\circ \right)$ 为绕组的 **ν 次谐波节距因数**。

■ **书例7-3：** $k_{y1} = \sin\left(\frac{\gamma}{2} \cdot 90^\circ\right) = \sin\left(3 \cdot \frac{7}{9} \cdot 90^\circ\right) = 0.94$

$$k_{y3} = \sin 3 \left(\frac{\gamma}{\tau} \cdot 90^\circ \right) = \sin \left(3 \cdot \frac{7}{9} \cdot 90^\circ \right) = -0.5$$

$$k_{y5} = \sin 5 \left(\frac{\gamma}{\tau} \cdot 90^\circ \right) = \sin \left(5 \cdot \frac{7}{9} \cdot 90^\circ \right) = -0.174$$



-46-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

■ **结论：**

- 1) 短距后基波电动势减小不多，谐波电动势有较大得削弱，故适当采用**短距可改善绕组电动势波形**。
- 2) 要消除 ν 次谐波电动势，只要使 $\gamma = \frac{\nu-1}{\nu} \tau$ 。

$$k_{y\nu} = \sin \nu \left(\frac{\gamma}{\tau} \cdot 90^\circ \right)$$

$$= \sin \nu \left(\frac{\nu-1}{\nu} \cdot 90^\circ \right)$$

$$= \sin (\nu-1) 90^\circ = 0$$

采用短距 $\gamma = \frac{\nu-1}{\nu} \tau$ 消除五次谐波电动势



-47-

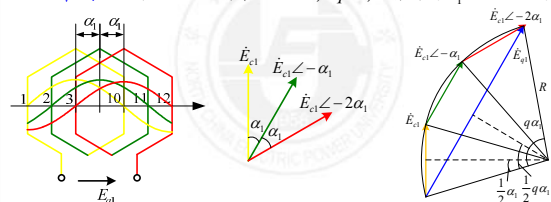
电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

三、线圈组电动势与分布因数

线圈组电动势： q 个串联线圈电动势**相量和**。

■ **举例：**三相四极36槽单层绕组， $q=3$ ，槽间角 $\alpha_1 = 20^\circ$ 电角度



-48-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

线圈组电动势有效值：

$$E_{q1} = 2R \sin \frac{q\alpha_1}{2} = 2 \frac{E_{c1}}{2 \sin \frac{\alpha_1}{2}} \sin \frac{q\alpha_1}{2} = qE_{c1} \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{\sin \frac{\alpha_1}{2}} = qE_{c1} k_{q1}$$

定义： $k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}}$ 为绕组的基波分布因数。

同理： $E_{qv} = qE_{cv} \frac{\sin v \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin v \frac{\alpha_1}{2}} = qE_{cv} k_{qv}$

定义： $k_{qv} = \frac{\sin v \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin v \frac{\alpha_1}{2}}$ 为绕组的v次谐波分布因数。



-49-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

■ 书例7-4：

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

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

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

■ 结论：分布后基波电动势削弱少，谐波电动势削弱多，故采用分布绕组也能改善绕组电动势波形。



-50-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

■ 同时采用短距和分布的线圈组：

1) 基波电动势有效值

$$E_{q1} = qE_{c1}k_{q1} = 4.44fN_c k_{y1} k_{q1} \Phi_1 = 4.44fN_c k_{w1} \Phi_1$$

定义： $k_{w1} = k_{y1} k_{q1}$ 为基波绕组因数。

2) v次谐波电动势有效值

$$E_{qv} = qE_{cv}k_{qv} = 4.44v fN_c k_{yv} k_{qv} \Phi_v = 4.44v fN_c k_{wv} \Phi_v$$

定义： $k_{wv} = k_{yv} k_{qv}$ 为v次谐波绕组因数。

■ 书例7-5： $k_{w1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.94 \times 0.96 = 0.92$

$$k_{w3} = k_{y3} \cdot k_{q3} = -0.5 \times 0.667 = -0.334$$

$$k_{w5} = k_{y5} \cdot k_{q5} = 0.766 \times (-0.177) = -0.136$$



-51-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

四、绕组的相电动势和线电动势

(1) 绕组的相电动势

■ 单层绕组：一相有p个线圈组，若连成a条支路，每条支路的线圈组数为p/a，一相的基波电动势：

$$E_{\phi 1} = \frac{p}{a} E_{q1} = 4.44f \frac{pqN_c}{a} k_{w1} \Phi_1 = 4.44fN \Phi_1$$

其中， $N = \frac{pqN_c}{a}$ 为单层绕组一相的串联匝数

■ 双层绕组：一相有2p个线圈组，若连成a条支路，每条支路的线圈组数为2p/a，一相的基波电动势：

$$E_{\phi 1} = \frac{2p}{a} E_{q1} = 4.44f \frac{2pqN_c}{a} k_{w1} \Phi_1 = 4.44fN \Phi_1$$

其中， $N = \frac{2pqN_c}{a}$ 为双层绕组一相的串联匝数



-52-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

一相绕组的谐波电动势有效值：

$$E_{\phi v} = 4.44v fN k_{wv} \Phi_v$$

考虑高次谐波电动势后，相电动势有效值：

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots + E_{\phi v}^2 + \dots}$$

$$= E_{\phi 1} \sqrt{1 + \left(\frac{E_{\phi 3}}{E_{\phi 1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{\phi 5}}{E_{\phi 1}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{E_{\phi v}}{E_{\phi 1}}\right)^2 + \dots} \approx E_{\phi 1}$$

■ 结论：高次谐波电动势对相电动势的数值影响较小，对波形影响较大。



-53-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

(2) 绕组的线电动势

■ 星形连接：三相的三及三的倍数次谐波电动势同相位，线电动势中不会出现三次和三的倍数次谐波：

$$E_l = \sqrt{3} E_{\phi} = \sqrt{3} \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 5}^2 + E_{\phi 7}^2 + \dots}$$

■ 三角形连接：三及三的倍数次谐波电动势在闭合的三角形内形成环流，谐波阻抗压降与电动势相平衡，线电压中也不出现三次和三的倍数次谐波。

$$E_l = E_{\phi} = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 5}^2 + E_{\phi 7}^2 + \dots}$$

环流引起附加损耗，导致温升增加和效率降低，现代交流发电机多采用星形联结而不采用三角形联结。



-54-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

§7.5 齿谐波电动势及其削弱方法

一、齿谐波电动势

■ **定义：**所有受齿槽影响产生的电动势的统称。

■ **产生原因：**

1) **微观方面：**电机定子开槽造成气隙磁阻不均匀，槽口气隙磁阻大，磁力线集中于齿部，转子旋转时，磁场分布形状周期性变化，在定子绕组中感应电动势。

2) **宏观方面：**齿槽改变每极下气隙总磁导，使每极磁通量发生周期性变化，在定子绕组中感应电动势。

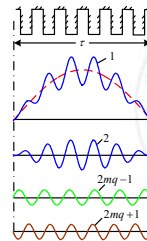


-55-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

齿谐波电动势可看成 $(2mq \pm 1)$ 两种不同谐波频率、等幅正弦电动势的合成。



$v = 2mq \pm 1$ 次齿谐波分布和节距因数：

$$k_{qv} = \frac{\sin v \frac{q\alpha_p}{2}}{q \sin v \frac{\alpha_p}{2}} = \frac{\sin(2mq \pm 1) \frac{q\alpha_p}{2}}{q \sin \frac{(2mq \pm 1)\alpha_p}{2}} = \frac{\sin \left[(2mq \pm 1) \frac{\pi}{2m} \right]}{q \sin \left[(2mq \pm 1) \frac{\pi}{2mq} \right]}$$

$$= \frac{\sin \left(q\pi \pm \frac{\pi}{2m} \right)}{q \sin \left(\pi \pm \frac{\pi}{2mq} \right)} = \pm \frac{\sin \frac{q\alpha_p}{2}}{q \sin \frac{\alpha_p}{2}} = \pm k_{q1}$$

$$k_{qv} = \sin v \frac{y}{\tau} \times 90^\circ = \sin \left[(2mq \pm 1) \frac{y}{\tau} \times 90^\circ \right]$$

$$= \sin \left(\frac{mqy}{\tau} \times 180^\circ \pm \frac{y}{\tau} \times 90^\circ \right) = \pm \sin \frac{y}{\tau} \times 90^\circ = \pm k_{y1}$$

$Z/(2p)=6$ 的情况



-56-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

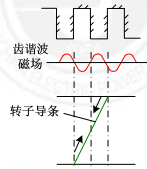
二、齿谐波电动势的削弱方法

1) 采用磁性槽楔或半闭口槽。

小型电机采用半闭口槽，中型电机采用磁性槽楔。

2) 采用斜槽。

通常斜一个定子齿距(中小型异步机、小型同步机)。



-57-

电力工程系

第七章 交流电机的绕组和电动势

3) **增大每极每相槽数 q 。** q 值越大，定子铁心内表面越接近于光滑，齿谐波的次数就越高，其影响就较小。

a. 汽轮发电机 q 值较大，齿谐波电动势影响不大；

b. 水轮发电机 q 值较小，齿谐波电动势影响较大，常采用分数槽绕组削弱齿谐波电动势。



-58-

电力工程系