



第2篇

交流电机的共同问题

第2篇 交流电机的共同问题

引言

交流电机的分类

- 交流电机
 - 同步电机
 - 凸极同步电机
 - 隐极同步电机
 - 异步电机
 - 笼型异步电机
 - 绕线转子异步电机

既可用作发电机，也可用作电动机。

2

第2篇 交流电机的共同问题

引言

本篇内容

- 同步电机和异步电机虽然运行原理不同，但有很多共同或类似的地方。
- 交流绕组（定子绕组）在机电能量转换中有重要作用。
- 本篇讨论关于交流绕组的下列共同问题：
 - 基本构成
 - 感应电动势
 - 磁动势

3

第2篇 交流电机的共同问题

第5章 交流电机的绕组和电动势

学习目标

- 三相交流电机的基本工作原理
- 交流绕组的构成原则和基本型式
- 导体感应电动势与气隙磁场的关系
- 单层绕组和双层绕组的基本构成及其主要差别
- 绕组的分布、短距及其改善电动势波形的作用
- 绕组电动势（基波、谐波）的计算
- 利用电动势星形相量图设计交流绕组的基本方案

4

第5章 交流电机的绕组和电动势

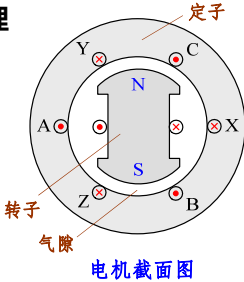
5.1 交流电机的基本工作原理，对交流绕组的基本要求

1. 交流电机的基本工作原理

(1) 同步电机的基本工作原理

同步电机的基本结构

- 定子（静止）：
定子铁心 + 定子绕组
- 气隙（很小）
- 转子（旋转）
转子铁心 + 励磁绕组




5

1. 交流电机的基本工作原理

(1) 同步电机的基本工作原理

同步电机的结构（外形）




汽轮同步发电机（卧式）

水轮同步发电机（立式）

6

(1) 同步电机的基本工作原理

凸极同步电机的结构



定子绕组 (局部)

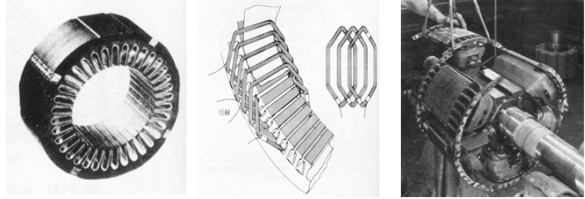
定子
(铁心+绕组+机座)

转子
(磁极+绕组+转轴)

7

(1) 同步电机的基本工作原理

凸极同步电机的结构 (续)



定子铁心
由硅钢片叠压而成，
内圆均匀开槽。

定子绕组
嵌放在槽中，由若干
线圈按一定规律联成。

转子
磁极+励磁绕组，固定
在转轴上，一同旋转。
转子磁极 (偶数个)
呈N、S极交替排列。

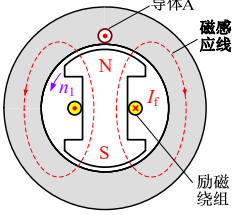
8

(1) 同步电机的基本工作原理

同步发电机的基本工作原理

感应电动势

- 转子励磁绕组通入**直流电流**，产生**气隙磁场**。
- 原动机**拖动转子以恒定转速 n_1 沿**逆时针方向旋转**。
- 定子铁心槽内的导体A与转子磁极之间产生**相对运动**。
- 由电磁感应定律可知，相对磁场运动（即切割磁感应线）的导体中产生**感应电动势**。
- 导体中感应电动势的方向可用 \Rightarrow N极下为 \bullet ，S极下为 \times **右手定则**判断。



同步电机截面图

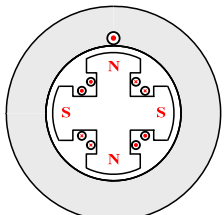
9

(1) 同步电机的基本工作原理

同步发电机的基本工作原理

感应电动势 (续)

- 定子导体每经过转子一对N、S磁极，感应电动势就**交变**一个周期。
- 若转子**极对数**为 p ，则转子每转一圈，定子导体就切割 p 对N、S磁极，于是导体感应电动势就交变了 p 个周期。
- 相邻的N、S磁极构成一对极。电机具有的磁极对数（磁极总数的一半）称为**极对数**，用 p 表示。



同步电机截面图
($p=2$)

10

(1) 同步电机的基本工作原理

同步发电机的基本工作原理

感应电动势 (续)

- 定子导体感应电动势**每秒内变化的周期数即为其频率 f (单位 Hz)**。
- 转子转速为 n_1 (单位 r/min) 时，感应电动势的频率为
$$f = \frac{pn_1}{60} \text{ (Hz)}$$
- 转子每秒转过 $n_1/60$ 圈；每转过一圈，电动势交变 p 次。

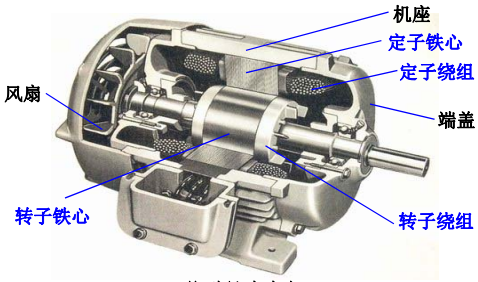
结论：极对数 p 一定时，定子导体感应电动势的频率 f 与转子转速 n_1 有上式所示的严格关系，称为**同步关系**。转子转速 n_1 称为**同步转速**。

11

1. 交流电机的基本工作原理

(2) 异步电机的基本工作原理

异步电机的结构



机座
定子铁心
定子绕组
端盖
转子铁心
转子绕组
风扇


笼型异步电机

12

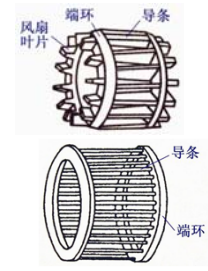
(2) 异步电机的基本工作原理

异步电机的结构 (续)

■ 笼型转子与笼型绕组



笼型转子 (铁心+绕组+转轴)



笼型绕组示意图

❖ 笼型绕组是自行闭合 (短路) 的绕组。

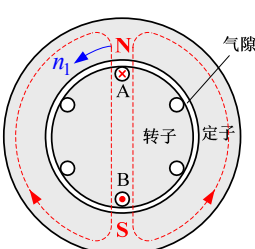
13

(2) 异步电机的基本工作原理

异步电动机的工作原理

■ 气隙磁场与转子电流的产生

- 三相定子绕组通入对称交流电流时, 产生**磁动势**, 在气隙中产生**旋转磁场** (设其转速为 n_1 , 转向为逆时针)。
- 转子与旋转磁场间存在相对运动, 转子导条切割磁感应线而产生**感应电动势**, 在闭合的转子绕组内产生**感应电流**。



笼型异步电机截面图 (未画定子绕组)

14

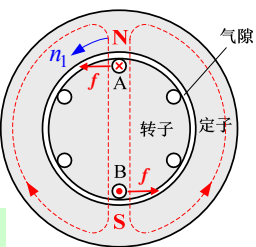
(2) 异步电机的基本工作原理

异步电动机的工作原理 (续)

■ 转矩与转速

- 转子电流在磁场中受到电磁力 f 作用, 形成**电磁转矩**, 使转子旋转。
- 转子转速 n 是否会等于定子磁场转速 n_1 ?
 $n \neq n_1$, 异步!

❖ 由于转子转速 n 与定子磁场转速 n_1 之间**没有严格的同步关系**, 因此称为异步电机。



笼型异步电机截面图 (未画定子绕组)

15

5.1 交流电机的基本工作原理, 对交流绕组的基本要求

2. 对交流绕组的基本要求

交流绕组

- 同步电机的电枢绕组 (通常为定子绕组) 和异步电机的定、转子绕组都通过交流电流, 是交流绕组。
- 交流绕组是电机进行机电能量转换的关键部件, 具有双重作用:

产生感应电动势 + 产生磁动势

↑ ↑

切割气隙磁场 流过电流

❖ 定量分析交流绕组中产生的电动势和磁动势, 是交流电机理论的核心问题。

16

2. 对交流电机的基本要求

交流绕组的分类 (常用)

■ 按槽内层数: 单层、双层、单双层

■ 按相数: 单相、两相、三相、多相

❖ 这两种分类方法常结合起来使用, 如: 三相双层绕组。

对交流绕组的基本要求

⇒ “高能低耗”

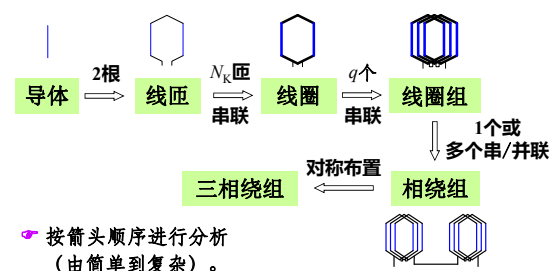
- 电动势和磁动势的**波形尽可能接近正弦**, 谐波较小;
- 各相绕组对称**, 即各相的感应电动势对称且阻抗相等;
- 一定数量的导体产生**尽可能大的基波电动势和磁动势**;
- 节省材料** (用铜量少)、功率损耗小;
- 有足够的机械强度、绝缘强度和散热条件;
- 制造工艺简单、维护方便。

17

2. 对交流电机的基本要求

交流绕组的构成步骤

交流绕组是由放置在铁心槽中的导体通过一定的方式联结而成的。将按其构成过程进行分析。



按箭头顺序进行分析 (由简单到复杂)。

18

第5章 交流电机的绕组和电动势

5.2 三相单层集中整距绕组及其电动势

1. 导体的感应电动势

以同步发电机为例进行分析。

(1) 引言

- 导体感应电动势一般表达式： $e = b_{\delta} l v$
 - l ——导体轴向长度（m）；
 - v ——导体相对磁场运动的线速度（m/s）；
 - b_{δ} ——导体所在处的气隙磁通密度（径向）（T）。
- 成立条件：导体、导体运动、磁感应线的方向相互垂直。
- 对于给定的电机，在轴向长度 l 和转子速度 v （转速 n_1 ）确定后，关键在于确定**气隙磁通密度 b_{δ} 的空间分布**。

1. 导体的感应电动势

(2) 空间坐标系与参考方向

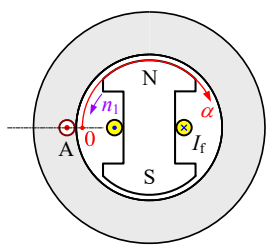
空间坐标系

为进行数学描述，在**转子外圆表面**上建立**直角坐标系**：

- 原点：N、S磁极间的中点；
- 横坐标 α ：空间角度（离原点的距离，用圆心角表示）；
- 纵坐标 b ：气隙磁通密度。

参考方向

- 空间角度 α ：顺时针为正。
- 磁通密度 b ：从转子到定子为正。
- 导体电动势 e ：出纸面为正。



空间直角坐标系
(随转子以转速 n_1 逆时针旋转)

1. 导体的感应电动势

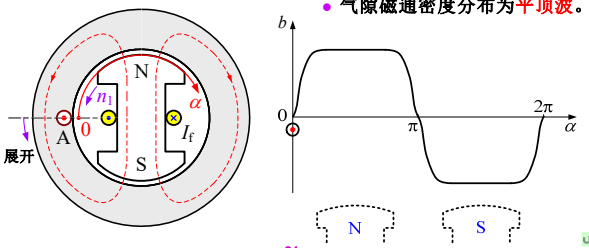
(3) 气隙磁通密度的空间分布

空间坐标系的展开

为描述方便，在原点处沿轴向剖开，并展开成直线。

气隙磁通密度分布

- 励磁绕组通入直流电流 I_f 产生磁动势，建立气隙磁场。
- 气隙磁通密度分布为**平顶波**。



(3) 气隙磁通密度的空间分布

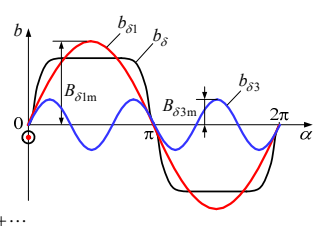
气隙磁通密度的分解

用叠加定理进行谐波分解。

- b_{δ} 空间分布特点
 - (a) 波形为平顶波；
 - (b) 关于原点奇对称。
- 分解结果
 - 傅立叶级数分解后，只含**奇数次正弦项**。

$$b_{\delta} = b_{\delta 1} + b_{\delta 3} + b_{\delta 5} + \dots$$
$$= B_{\delta 1m} \sin \alpha + B_{\delta 3m} \sin 3\alpha + B_{\delta 5m} \sin 5\alpha + \dots$$

- 分别研究各次谐波磁通密度产生的电动势（合成后，即得到总的电动势）。



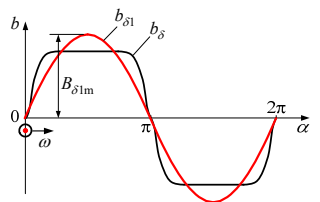
1. 导体的感应电动势

(4) 导体的基波感应电动势

基波气隙磁通密度

- 导体处于位置 α 时，基波气隙磁通密度为 $b_{\delta 1} = B_{\delta 1m} \sin \alpha$
- 设 $t=0$ 时导体位于 $\alpha=0$ 处，则在 t 时刻， $\alpha = \omega t$
 $b_{\delta 1} = B_{\delta 1m} \sin \omega t$
- 其中， $\omega = 2\pi \frac{p \cdot n_1}{60}$

气隙磁通密度波随转子一起逆时针旋转。在转子上看，导体以角速度 ω 向 $+\alpha$ 方向移动。



(4) 导体的基波感应电动势

基波感应电动势

瞬时值表达式

$$e_1 = b_{\delta 1} l v = B_{\delta 1m} l v \sin \omega t$$
$$= E_{1m} \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

- 最大值 $E_{1m} = B_{\delta 1m} l v$
- 有效值 $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}$

结论：空间上正弦分布的气隙磁通密度波，与转子一同**旋转**，在静止的定子导体中产生**时间上正弦变化**的感应电动势。

(4) 导体的基波感应电动势

基波感应电动势有效值公式

习惯上采用气隙每极磁通量计算电动势。

气隙每极磁通量（基波）

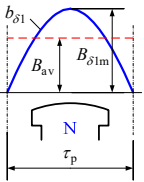
$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m} l \tau_p \quad (\text{Wb})$$

τ_p ——极距（每个磁极在定子内圆表面所占的空间距离）（单位：m）。

基波电动势有效值

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{\delta 1m} l v = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{\delta 1m} l (2 p r_p \frac{n_1}{60}) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} (\frac{2}{\pi} B_{\delta 1m} l \tau_p) (\frac{p n_1}{60})$$

结论： $E_1 = 2.22 f \Phi_1$



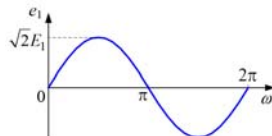
(4) 导体的基波感应电动势

基波电动势的三种描述方法

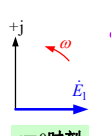
解析法

$$e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

波形图法



相量图法



一个相量图表示的是某一时刻的情况。

相量图三要素：

时间参考轴（+j）

相量（有向线段）

角频率和转向

(4) 导体的基波感应电动势

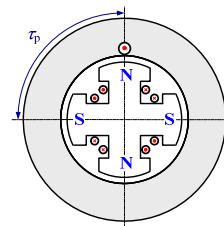
空间电角度

时空不一致问题

转子每转过一对磁极，定子导体基波磁通量就交变一周，即经过了一个空间电角度。

转子每转过一个机械角度，定子导体基波磁通量就交变 1/p 周，即经过了一个空间电角度。

矛盾：时空不一致！



$p=2$ 的同步电机

(4) 导体的基波感应电动势

空间电角度（续）

空间电角度与机械角度

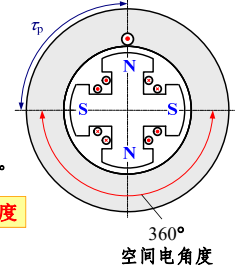
实际空间一周对应的360°几何角度称为空间机械角度。

将一对磁极表面占据的空间机械角度定义为360°空间电角度。

空间电角度 = p × 空间机械角度

(p为极对数)

结论：时间与空间得到统一，即基波电动势经过的时间电角度等于转子转过的空间电角度。



1. 导体的感应电动势

(5) 导体的谐波感应电动势

谐波气隙磁通密度

$$b_{\delta v} = B_{\delta vm} \sin v \alpha$$
$$= B_{\delta vm} \sin v \omega t$$

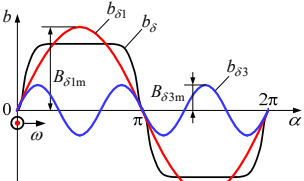
$b_{\delta v}$ 的波长为 $b_{\delta 1}$ 的 1/v。

谐波感应电动势

$$e_v = b_{\delta v} l v = B_{\delta vm} l v \sin v \omega t = \sqrt{2} E_{v1} \sin v \omega t$$

$E_v = 2.22 v f \Phi_v$ ，为导体v次谐波感应电动势的有效值；

$\Phi_v = \frac{2}{\pi} B_{\delta vm} l \frac{\tau_p}{v}$ ，为v次谐波每极磁通量。



5.2 三相单层集中整距绕组及其电动势

2. 整距线匝及其电动势

(1) 不同位置导体中基波感应电动势的关系

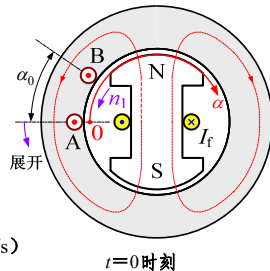
设导体B在空间上与导体A相距 α_0 电角度。

以转子磁场转向看，导体A位置在前（空间超前）。

在 t 时刻，导体B的空间位置（电角度）为

$$\alpha = \omega t + \alpha_0$$

电角速度
$$\omega = 2\pi p \frac{n_1}{60} \quad (\text{rad/s})$$



(1) 不同位置导体中基波感应电动势的关系

➤ 导体B的基波感应电动势

- 导体B处的基波磁通密度

$$b_{\delta 1} = B_{\delta 1m} \sin(\omega t + \alpha_0)$$
- 导体B的基波感应电动势

$$e_{B1} = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t + \alpha_0)$$

与导体A相比，导体B中基波感应电动势的有效值相同，但相位超前了 α_0 时间电角度。

导体A：

$$b_{\delta 1} = B_{\delta 1m} \sin \omega t$$

$$e_{A1} = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

(1) 不同位置导体中基波感应电动势的关系

➤ 两根导体的基波感应电动势——三种描述方法

- 解析法

$$e_{A1} = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

$$e_{B1} = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t + \alpha_0)$$
- 波形图法
- 相量图法

(1) 不同位置导体中基波感应电动势的关系

➤ 结论

不同空间位置的两导体中产生的基波感应电动势：

- 有效值关系相等。
- 相位关系
 - 沿着转子（气隙磁场）转向看，空间位置在前的导体，其基波感应电动势在时间上滞后。（简记为“空间超前、时间滞后”）
 - 相位差大小等于两导体空间相距的电角度（简记为：“时间电角度差=空间电角度差”）。

2. 整距线匝及其电动势

(2) 整距线匝的构成及其电动势

➤ 线匝的构成

- 嵌放在不同铁心槽中的两个导体A、X，通过端部联成一个线匝。
- 槽中直线部分为感应电动势的有效部分，端部仅起电路联结作用。
- 线匝有两个出线端，分别称为首端、末端。

❓ 问题：两个导体的位置关系

- 目标：使线匝的基波感应电动势最大。

(2) 整距线匝的构成及其电动势

➤ 整距线匝及其电动势

- 线匝基波电动势为

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1}$$
- 要使 E_{T1} 最大，应使 \dot{E}_{X1} 与 \dot{E}_{A1} 反相，即两导体空间位置应相差 180° 电角度。
- 两导体相距 180° 空间电角度，即一个极距 τ_p ，称为整距。
- 整距线匝基波电动势有效值

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

(2) 整距线匝的构成及其电动势

➤ 整距线匝及其电动势（续）

- 节距 y_1
 - 定义：线匝的两个导体在定子内圆表面所跨的距离。
 - 表述方式：(a) 空间电角度（电弧度）；(b) 定子槽数。
- 整距： $y_1 = 180^\circ$ 电角度 或 π 电弧度。
- 短距： $y_1 < \pi$ ；长距： $y_1 > \pi$ 。非整距线匝的基波电动势与整距的相比都有损失。
- 短距时端部联线较短；长距时端部联线较长（通常不用）。

5.2 三相单层集中整距绕组及其电动势

3. 整距线圈的构成及其电动势

整距线圈的构成

- 空间位置相同的 N_K 个线圈串联成一个匝数为 N_K 的线圈。
- 槽中导体部分称为线圈边，是产生电动势的有效部分。
- 各线圈彼此绝缘。线圈的两个出线端分别称为首端、末端。
- 节距 $y_1=\pi$ 时，为整距线圈。

基波感应电动势有效值

$$E_{K1} = N_K E_{T1} = 4.44 f N_K \Phi_1$$

端部

铁心

首端 末端

整距线圈构成示意图
(匝数 $N_K=2$)

5.2 三相单层集中整距绕组及其电动势

4. 三相单层集中整距绕组

(1) 用整距线圈构成三相对称绕组

- 三相对称绕组应产生三相对称基波感应电动势：
 - 有效值相等；
 - 相位互差 120° （正序时：A相超前B相，B相超前C相）。
- $p=1$ 时，用一个整距线圈作为A相绕组，布置如右图（首、末端分别为A、X）。

思考：B、C相绕组如何布置

(1) 用整距线圈构成三相对称绕组

确定B、C相绕组的节距、匝数

应与A相的相同。

理论依据： $E_{K1} = 4.44 f N_K \Phi_1$ ，三相应相等。

确定B、C相绕组的空间位置

B、C相的基波电动势分别滞后A相 120° 和 240°

↓

B、C相绕组应在空间分别超前A相绕组 120° 和 240°

理论依据：
(1) “空间超前，时间滞后”
(2) “时间电角度=空间电角度”

(1) 用整距线圈构成三相对称绕组

绕组展开图

用绕组展开图表示各相绕组的构成方式。

- 每个竖向线段表示一个定子槽以及置于其中的线圈边。
- 定子槽数为6，依次编号1~6。
- $p=1$ 时，整距线圈的节距 $y_1 = \tau_p = 3$ （用槽数表示）。
- A相线圈的两个线圈边，若一个在1号槽，则另一个应在 $1+y_1=4$ 号槽。
- B相线圈与A相线圈相距 120° 电角度，应跨过2个槽。C相线圈同理。

4. 三相单层集中整距绕组

(2) 三相绕组联结及其消除谐波作用

三相绕组联结

三相绕组可联成星形或三角形。

星形联结 (Y联结)
末端联在一起，首端引出。

三角形联结 (D联结)
首、末端顺次相联，首端引出。

(2) 三相绕组联结及其消除谐波作用

星形联结

对于3次谐波电动势，
$$e_{A3} = \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t$$
$$e_{B3} = \sqrt{2} E_3 \sin 3(\omega t - 120^\circ) = e_{A3}$$
$$e_{AB3} = e_{A3} - e_{B3} = 0$$

同理， $e_{BC3} = e_{CA3} = 0$ 。

以上结果对 $\nu=3k$ 次谐波均成立（ k 为正整数）。

结论：星形联结的三相交流绕组，其线电动势中不含3的整数倍次谐波。

(2) 三相绕组联结及其消除谐波作用

三角形联结

三相3次谐波电动势同相

$$e_{A3} = e_{B3} = e_{C3} = \sqrt{2}E_3 \sin 3\omega t$$

3次谐波循环电流

$$i_3 = \frac{3\dot{E}_3}{3Z_3} = \frac{\dot{E}_3}{Z_3}$$

3次谐波线电压

$$\dot{U}_{AB3} = -\dot{E}_{A3} + \dot{I}_3 Z_3 = 0$$

结论：三角形联结的三相交流绕组，其线电压中不含3的整数倍次谐波，但三相绕组中有相应的循环电流，产生损耗。

参考方向规定

43

4

4. 三相单层集中整距绕组

(3) 小结

特征

单层：每个槽内只放置一个线圈边 \Rightarrow 每个线圈占用2个槽；

集中：每对极下每相只有一个线圈；

整距：线圈节距等于极距。

优缺点

结构简单；

发热集中，散热困难；

空间利用不充分；

电动势的波形较差。

每对极下有3个线圈、6个槽

44

第5章 交流电机的绕组和电动势

5.3 三相单层分布整距绕组及其电动势

引言

为充分利用空间，在定子圆周上开多个槽、布置多个导体。

问题：如何将这此导体（或线圈边）联结成三相绕组

要求：

基波电动势尽可能大；

谐波电动势尽可能小；

三相对称。

绕组构成需满足电动势要求，因此利用电动势相量图进行分析。

45

5.3 三相单层分布整距绕组及其电动势

1. 利用电动势星形相量图布置三相绕组

(1) 电动势星形相量图

例：极对数 $p=2$ ，定子槽数 $Q=24$

极距（用槽数表示）

$$\tau_p = \frac{Q}{2p} = \frac{24}{2 \times 2} = 6$$

槽距角：相邻两槽间的空间电角度

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

根据槽距角，可画出各槽导体的基波电动势相量图。

46

(1) 电动势星形相量图

电动势星形相量图的画法

作图步骤：

给定子槽（槽中导体或线圈边）编号；

根据各槽导体（线圈边）的空间位置关系，画出某时刻各导体（线圈边）的基波电动势相量；

各相量等长、均布、同起点，构成星形。

编号顺序通常与转子转向一致。

$$\alpha = 30^\circ$$

$$p=2$$
 时，相量图重复2次（导体编号不同）。

线圈边基波电动势星形相量图

47

1. 利用电动势星形相量图布置三相绕组

(2) 三相单层分布整距绕组的布置

划分相带

每极下每相占有的区域称为相带。

将一对极下的导体（线圈边）均分为6组。每组属于同一相，占有 60° 空间电角度，称为 60° 相带。

每极每相槽数：相带内的槽数。

$$q = \frac{Q}{2pm}$$
 （ m 为相数）

线圈边基波电动势星形相量图

$$\tau_p = 6, \alpha = 30^\circ$$

$$q = 2$$

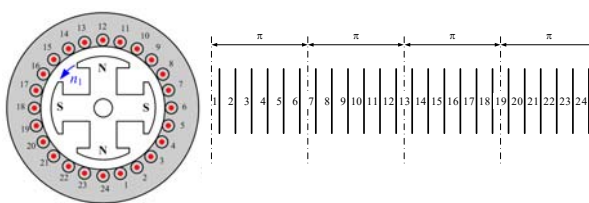
A-Z-B-X-C-Y。

48

(2) 三相单层分布整距绕组的布置

绕组展开图

画法：
① 画出与槽数 Q 相等的等间距竖向线段，每个线段表示一个定子槽以及置于其中的线圈边。
② 对各线圈边（定子槽）依次连续编号。

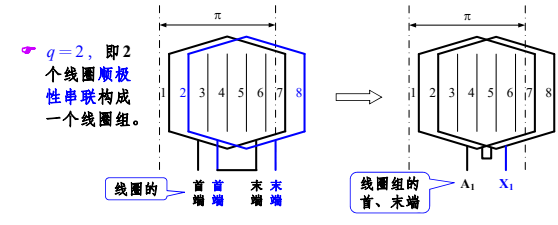


49

(2) 三相单层分布整距绕组的布置

绕组展开图（续）

画法（续）：
③ 按照相带划分结果，画出各线圈和线圈组。
举例：A相绕组构成——一个线圈组的构成

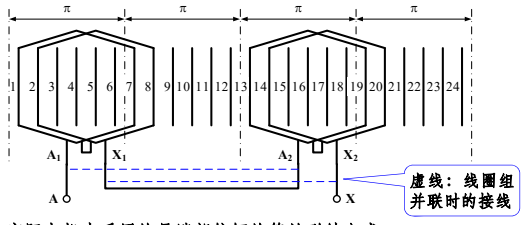


50

(2) 三相单层分布整距绕组的布置

绕组展开图（续）

画法（续）：
④ 将每相的各线圈组按极性串联或并联，形成各相绕组。
举例：A相绕组构成——相绕组的构成



虚线：线圈组并联时的接线

实际电机中采用的是端部较短的等效联结方式。

51

(2) 三相单层分布整距绕组的布置

三相单层分布整距绕组的布置——小结

■ 布置方法（要点）

- 正、负极性相带中的线圈边联成线圈；
- 一对极下每相有 q 个线圈，顺极性串联成一个线圈组；
- p 对极下每相可联成 p 个线圈组，各线圈组首、末端按极性相联：
 - 串联时：末端→首端；
 - 并联时：首端→首端。

■ 特点

- 每相绕组有 p 个线圈组。
- 最大可能的并联支路数： $a=p$ 。

52

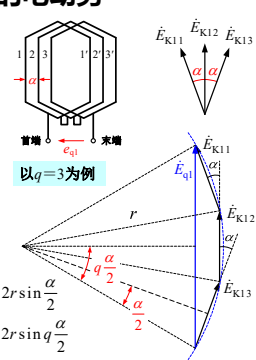
5.3 三相单层分布整距绕组及其电动势

2. 三相单层分布整距绕组的电动势

(1) 分布因数

基波分布因数

- 同相带中 q 个分布线圈的基波电动势叠加后，总的有效值 E_{q1} 小于单个线圈的 q 倍。
- 基波分布因数 k_{d1}
定义： $k_{d1} = \frac{E_{q1}}{qE_{K1}}$
 $\Rightarrow k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$



以 $q=3$ 为例

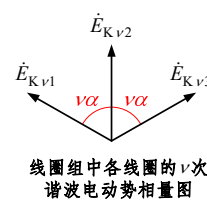
$E_{K1} = 2r \sin \frac{\alpha}{2}$
 $E_{q1} = 2r \sin q \frac{\alpha}{2}$

53

(1) 分布因数

谐波分布因数

- 同相带内 q 个线圈中的第 ν 次谐波电动势叠加后，其总幅值也小于单个线圈第 ν 次谐波电动势幅值的 q 倍。
- ν 次谐波分布因数 $k_{d\nu}$
定义： $k_{d\nu} = \frac{E_{q\nu}}{qE_{K\nu}}$
 $\Rightarrow k_{d\nu} = \frac{\sin \frac{q\nu\alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha}{2}}$



线圈组中各线圈的 ν 次谐波电动势相量图（以 $q=3$ 为例）

相邻两个线圈第 ν 次谐波电动势的相位差为基波的 ν 倍，即 $\nu\alpha$ 。

54

(1) 分布因数

➤ 分布因数算例

例如：4极电机，定子24槽。

因 $p=2$ ， $Q=24$ ，故 $\alpha=30^\circ$ ， $q=2$ 。

$$k_{d1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin(2 \times \frac{30^\circ}{2})}{2 \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0.9659$$

$$k_{d5} = \frac{\sin q \frac{5\alpha}{2}}{q \sin \frac{5\alpha}{2}} = \frac{\sin(2 \times \frac{5 \times 30^\circ}{2})}{2 \sin \frac{5 \times 30^\circ}{2}} = 0.2588$$

$$k_{d7} = -0.2588$$

主要谐波（5、7次）
被大幅削弱！

结论：分布绕组对基波电动势影响很小，但可显著削弱特定次谐波电动势，从而改善相电动势波形。

55

2. 三相单层分布整距绕组的电动势

(2) 电动势有效值

线圈： $E_{Kv} = 4.44v f N_K \Phi_v$

线圈组： $E_{qv} = q E_{Kv} k_{dv} = 4.44v f q N_K k_{dv} \Phi_v$

一相绕组（ p 对极， a 条并联支路）： $E_{\phi v} = \frac{p}{a} E_{qv} = 4.44v f N_1 k_{d1} \Phi_v$

每相串联匝数 $N_1 = \frac{pq N_K}{a}$

• 一相基波电动势有效值 $E_{\phi 1} = 4.44 f N_1 k_{d1} \Phi_1$

56

5.3 三相单层分布整距绕组及其电动势

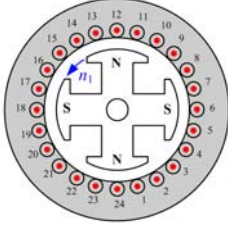
3. 单层分布绕组的优缺点

➤ 优点

- 可有效利用铁心表面空间；
- 可削弱绕组的谐波电动势；
- 每个槽内只有一个线圈边，嵌线和布置绝缘方便；
- 便于散热。

➤ 缺点

- 节距不能任意选择。



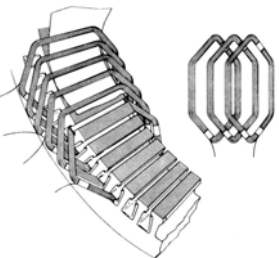
57

第5章 交流电机的绕组和电动势

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

引言

- 在分布绕组的基础上，使线圈短距，以进一步削弱谐波电动势。
- 为了实现线圈短距，在每个槽中布置上、下两层线圈边（分属不同的线圈），构成双层绕组。



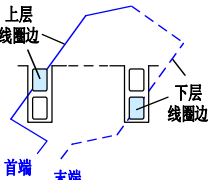
双层分布叠绕组示意图

58

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

1. 短距线圈的布置方式

- 每个槽分为上、下两层，每层放置一个线圈边；
- 一个线圈有两个线圈边：上层边置于某槽的上层，下层边则置于另一个槽的下层。
- 线圈数等于槽数。
- 线圈节距不受限制，可取为需要的值。



双层绕组的一个线圈布置方式示意图

目的：改善相电动势波形。

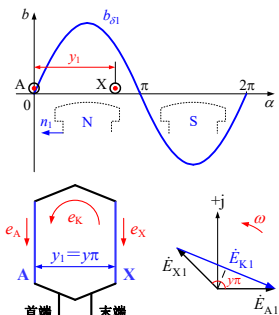
59

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

2. 短距线圈的电动势

(1) 基波电动势

- 两个线圈边的基波电动势，在整距时反相；在短距时不再反相，叠加得到的总有效值小于整距时的值。
- 基波节距因数 k_{p1}
- 定义： $k_{p1} = \frac{E_{K1}}{2E_{A1}}$
- $\Rightarrow k_{p1} = \sin y \frac{\pi}{2}$
- 节距比 y ：线圈节距与极距之比。



短距线圈及其基波电动势相量图

60

2. 短距线圈的电动势

(2) 谐波电动势

- 两个线圈边的 ν 次谐波电动势，在整距时也是反相的。但在短距时，其相位差为基波的 ν 倍，即 $\nu y\pi$ 。
- ν 次谐波节距因数 $k_{p\nu}$

定义： $k_{p\nu} = \frac{E_{K\nu}}{2E_{A\nu}}$

$\Rightarrow k_{p\nu} = \sin \nu y \frac{\pi}{2}$

例： $y=5/6$ 时， $k_{p1}=0.9659$ ，
 $k_{p5}=k_{p7}=0.2588$ 。

短距线圈谐波电动势相量图

2. 短距线圈的电动势

(3) 短距线圈节距的选择

短1/3整距，可消除3次谐波

短1/5整距，可消除5次谐波

结论：

- 线圈短 $1/\nu$ 整距，即节距比 $y=(1-1/\nu)$ 时，可完全消除第 ν 次谐波电动势。
- 为同时削弱5、7次谐波电动势，通常取 $y=5/6$ 。

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

3. 三相双层分布短距绕组的布置

各短距线圈的构成完全相同；
线圈数=槽数 Q 。

例：极对数 $p=2$ ，
定子槽数 $Q=36$ 。

计算槽距角 α

$\alpha = p \frac{360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$

画电动势星形相量图

- 每个相量表示一个短距线圈的基波电动势。

线圈基波电动势星形相量图

3. 三相双层分布短距绕组的布置

例：极对数 $p=2$ ，定子槽数 $Q=36$

划分相带

- 采用 60° 相带，将每对极下的线圈均分至6个相带中。
- 相带的基波电动势相位顺序：A-Z-B-X-C-Y。
- 每个相带中的 q 个线圈顺极性串联；
- 每极下每相可联成一个线圈组，称为极相组。
- 每相最大并联支路数
 $a=2p$

$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$

3. 三相双层分布短距绕组的布置

例：极对数 $p=2$ ，定子槽数 $Q=36$

画绕组展开图

$\tau_p=9$ ；取 $y_1=7$ ，即 $y=7/9$ 。

画法：

- ① 用一对实、虚线段表示一个定子槽的上、下层和置于其中的上、下层线圈边；等间距画出表示各槽的线段。
- ② 对各槽依次连续编号（也指上层边置于该槽的线圈）。

3. 三相双层分布短距绕组的布置

例：极对数 $p=2$ ，定子槽数 $Q=36$

画绕组展开图（续）

画法：

- ③ 按节距 y_1 联出各线圈（下层端部用虚线）；每一相带的 q 个线圈顺极性串联，构成一个极相组，引出其首、末端。
- ④ 一相的 $2p$ 个极相组串联或并联，构成一相绕组。

相邻的两个极相组，因其基波电动势反相，故串联时应“首-首”或“末-末”相联。

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

4. 三相双层分布短距绕组的电动势有效值

(1) 基波电动势有效值

- 短距线圈 $E_{K1}=4.44fN_Kk_{p1}\Phi_1$
- 极相组 $E_{q1}=qE_{K1}k_{d1}=4.44fqN_Kk_{d1}k_{p1}\Phi_1$
- 相绕组 $E_{\phi1}=\frac{2p}{a}E_{q1}=\frac{2p}{a}4.44fqN_Kk_{d1}k_{p1}\Phi_1$
 $\Rightarrow E_{\phi1}=4.44fN_1k_{dp1}\Phi_1$

- 每相串联匝数 $N_1=\frac{2pqN_K}{a}$
- 基波绕组因数 $k_{dp1}=k_{d1}k_{p1}$
- 每相有效匝数 N_1k_{dp1}

67

4. 三相双层分布短距绕组的电动势

(2) 谐波电动势有效值

- 短距线圈 $E_{Kv}=4.44vfN_Kk_{pv}\Phi_v$
- 极相组 $E_{qv}=qE_{Kv}k_{dv}=4.44vfqN_Kk_{dv}k_{pv}\Phi_v$
- 相绕组 $E_{\phi v}=\frac{2p}{a}E_{qv}=\frac{2p}{a}4.44vfqN_Kk_{dv}k_{pv}\Phi_v$
 $\Rightarrow E_{\phi v}=4.44vfN_1k_{dpv}\Phi_v$

v 次谐波绕组因数： $k_{dpv}=k_{dv}k_{pv}$

68

5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势

5. 总结

(1) 交流绕组削弱谐波电动势的主要方法

- 采用短距或分布绕组。
- 三相绕组的联结。
- 合理设计磁极形状或励磁绕组的分布，使气隙磁场分布波形接近正弦。

(2) 双层绕组与单层绕组的比较（主要差别）

比较的项目	单层绕组	双层绕组
线圈数	$Q/2$	Q
每相串联匝数	$N_1=pqN_K/a$	$N_1=2pqN_K/a$
最大并联支路数	p	$2p$
短距	不能任意短距	可任意短距
极相组	无	有

69

第5章 交流电机的绕组和电动势

小 结

- ✓ 交流电机的基本工作原理；对交流绕组的基本要求。
- ✓ 导体感应电动势与气隙磁场的关系。
- ✓ 空间位置不同的两个导体的电动势关系（基波、谐波）。
- ✓ 整距线圈的构成；三相单层集中整距绕组的构成；三相绕组联结对消除电动势谐波的作用。
- ✓ 分布线圈组的构成及其对改善电动势波形的作用；单层分布整距绕组的构成及其电动势有效值计算公式。
- ✓ 短距线圈的构成及其对改善电动势波形的作用；双层分布短距绕组的构成及其电动势有效值计算公式。
- ✓ 利用电动势星形相量图布置交流绕组。

70

第5章 交流电机的绕组和电动势

小 结（续）

- ✓ 利用绕组展开图表示绕组构成方式。
- ✓ 主要概念
(空间)机械角度；空间电角度；
极数、极对数；定子槽数；极距；节距、节距比；
导体；线匝；线圈；线圈组；极相组；首端、末端；
绕组：整距、短距，集中、分布，单层、双层；
电动势：基波、谐波；相量图；电动势星形相量图；
槽距角；相带、60°相带；每极每相槽数；
分布因数、节距因数、绕组因数（基波与谐波）；
并联支路数；每相串联匝数；有效匝数；
每极磁通量（基波与谐波）；绕组展开图

71

第2篇 交流电机的共同问题

第6章 交流绕组的磁动势

▼ 学习目标

- 交流绕组磁动势的基本特点（时空函数）
- 整距线圈的基波和谐波磁动势及其关系
- 脉振磁动势和旋转磁动势的性质与关系
- 磁动势的描述方法，分析合成磁动势的解析法与矢量图法
- 绕组分布、短距对其磁动势的影响
- 产生圆形磁动势的条件

72

第6章 交流绕组的磁动势

引言

电机气隙磁场沿圆周的空间分布与产生该磁场的磁动势的空间分布有关。

交流绕组通电产生的磁动势

在空间分布
因电流交变而变化

既是空间函数，
也是时间函数

研究目标

磁动势在空间的分布、随时间的变化
(波形、幅值、性质)

73

第6章 交流绕组的磁动势

引言 (续)

学习思路

一个整距线圈的磁动势

电流恒定时——恒定磁动势在空间分布

电流交变时——脉振磁动势在空间分布、随时间变化

一相绕组的脉振磁动势

三相绕组脉振磁动势的合成

分布、短距绕组对合成磁动势的影响

以均匀气隙、 $p=1$ 的情况为例 (不计铁心磁位降)。

74

第6章 交流绕组的磁动势

6.1 单层集中整距绕组的磁动势

1. 整距线圈的磁动势

(1) 空间坐标系与参考方向

在定子内圆表面 (静止坐标系)；

横坐标：沿圆周的空间位置，以 α (电角度) 表示，逆时针为正；

纵坐标：磁动势 f ，出定子、进转子为正；

坐标原点：线圈轴线 $+A$ 的位置。

电流参考方向：如图 (与 $+A$ 轴符合右手螺旋定则)。

75

第6章 交流绕组的磁动势

1. 整距线圈的磁动势

(1) 空间坐标系与参考方向

空间坐标系的展开

为表述方便，将电机展开成直线；定子在下，转子在上。

展开

定子

转子

电流参考方向与 $+A$ 轴符合右手螺旋定则

76

第6章 交流绕组的磁动势

1. 整距线圈的磁动势

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

线圈磁动势的空间分布

不计铁心磁阻，气隙均匀，因此线圈磁动势 $N_K i$ 被两段气隙均分。

展开

定子

转子

线圈磁动势 $N_K i$ 被两段气隙均分。

77

第6章 交流绕组的磁动势

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

磁动势空间分布的数学描述

$f(\alpha) = f_K = \frac{1}{2} N_K i \quad \alpha \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$

$f(\alpha) = -f_K = -\frac{1}{2} N_K i \quad \alpha \in (\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]$

结论：整距线圈通入恒定电流产生的气隙磁动势，沿气隙圆周的空间分布波形为矩形波。

78

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

矩形波磁动势的分解

波形的对称性:

- 关于纵轴呈偶对称
- 关于横轴呈奇对称

↓

波形分解后只含奇数次余弦项

$$f(\alpha) = f_{K1} + f_{K3} + f_{K5} + \dots = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} c_v \cos v\alpha$$

空间谐波

其中，各次谐波幅值为

$$c_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \cos v\alpha d\alpha = \frac{4}{\pi} f_K \frac{1}{v} \sin \frac{v\pi}{2}$$

v 为谐波次数。

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

矩形波磁动势的分解 (续)

■ 基波、谐波、矩形波磁动势的幅值关系

矩形波磁动势

$$f_K = \frac{1}{2} N_K i$$

$c_v = \frac{4}{\pi} f_K \frac{1}{v} \sin \frac{v\pi}{2}$

基波磁动势

$$f_{K1} = \frac{4}{\pi} f_K \cos \alpha$$

v 次谐波磁动势

$$f_{Kv} = \frac{1}{v} \frac{4}{\pi} f_K \cos v\alpha \left(\sin \frac{v\pi}{2} \right)$$

符号项

结论:

- 基波磁动势的幅值为矩形波的 $4/\pi$;
- v 次谐波磁动势的幅值为基波的 $1/v$ 。

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

矩形波磁动势的分解 (续)

■ 基波、谐波、矩形波磁动势的波长关系

结论:

- 基波磁动势的波长、极对数均与原矩形波的相同;
- 基波波长为 $2\tau_p$ ，即 2π 电角度 (360° 电角度);
- v 次谐波: 波长=基波的 $1/v$ ，极对数= $p v$ 。

(2) 整距线圈的磁动势——电流恒定时

矩形波磁动势的分解 (续)

■ 基波、谐波磁动势幅值的空间位置

结论:

- 该位置的不同次数的谐波幅值，有的为正 ($v = 4k+1$ 时)，有的为负 ($v = 4k-1$ 时)。

1. 整距线圈的磁动势

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

设 $i = \sqrt{2} I_K \cos \omega t$ (交变)

则 $f_K = \frac{1}{2} N_K i$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \cos \omega t$$

特征

- 磁动势的空间分布仍为矩形波。
- 磁动势幅值随时间以电流的角频率 ω 交变。

与电流恒定时不同

不同时刻的线圈磁动势

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

矩形波磁动势的分解

$$f(\alpha) = f_{K1} + f_{K3} + f_{K5} + \dots = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\sin \frac{v\pi}{2} \right) \frac{1}{v} \frac{4}{\pi} f_K \cos v\alpha$$
$$f_K = \frac{1}{2} N_K i = \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \cos \omega t$$

■ 基波磁动势

时间交变

空间分布

$$f_{K1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \cos \omega t \cos \alpha = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha$$

最大幅值

■ 基波磁动势的最大幅值

$$F_{K1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K = 0.9 N_K I_K$$

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

► 矩形波磁动势的分解 (续)

■ ν 次谐波磁动势

$$f_{K\nu} = (\sin \nu \frac{\pi}{2}) \frac{1}{\nu} \frac{4\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \cos \omega t \cos \nu \alpha$$

$$= (\sin \nu \frac{\pi}{2}) \frac{1}{\nu} F_{K1} \cos \omega t \cos \nu \alpha \quad F_{K1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K$$

例如：3次谐波 $f_{K3} = -\frac{1}{3} F_{K1} \cos \omega t \cos 3\alpha$

5次谐波 $f_{K5} = \frac{1}{5} F_{K1} \cos \omega t \cos 5\alpha$

- ν 次谐波磁动势的最大振幅是基波的 $1/\nu$

$$F_{K\nu} = \frac{1}{\nu} F_{K1}$$

85

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

■ 结论

- 整距线圈通入交流电流所产生的气隙磁动势，沿定子内圆呈矩形波分布，其幅值随时间交变。
- 矩形波磁动势分解出的基波和谐波磁动势，都在空间按余弦分布，都是 α 的函数；幅值都随时间按电流的频率交变，是时间电角度 ωt 的函数。

$$f_{K1} = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{K\nu} = (\sin \nu \frac{\pi}{2}) \frac{1}{\nu} F_{K1} \cos \omega t \cos \nu \alpha$$

基波和谐波磁动势都既是空间函数，又是时间函数。

86

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

■ 结论 (续)

- 基波和谐波磁动势振幅的位置均在线圈轴线 $+A$ 处 (坐标原点)，不随时间变化。
- 脉振磁动势 (驻波)

定义：振幅位置不变，振幅随时间交变的磁动势。

脉振角频率：等于产生磁动势的电流的角频率 ω 。

87

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

► 基波脉振磁动势的分解

基波脉振磁动势 $f_{K1} = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha$

分解： $f_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)$

$$= f'_{K1} + f''_{K1}$$

两部分： $\begin{cases} f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t) \\ f''_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t) \end{cases}$

88

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

► 基波脉振磁动势的分解 (续)

■ 第一部分 $f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$

比较不同时刻的情况：

$\omega t = 0$

$$f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos \alpha$$

$\omega t = 30^\circ$

$$f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - 30^\circ)$$

幅值不变，位置改变。

89

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

► 基波脉振磁动势的分解 (续)

■ 第一部分 $f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$

- 是基波磁动势，且在电流 I_K 一定时，幅值不变。
- 正幅值始终在 $\cos(\alpha - \omega t) = 1$ 处，即 $\alpha = \omega t$ 位置。

正向旋转 (朝 α 正方向)，旋转的电角速度为 $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$ 。

- 电流 i 达到正最大值时， f'_{K1} 正幅值位于线圈轴线 ($+A$ 轴)。

■ 旋转磁动势 (行波)

定义：幅值不变，沿气隙圆周旋转的磁动势。

旋转的电角速度：(绝对值) 等于产生它的电流的角频率 ω 。

90

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

➤ 基波脉振磁动势的分解 (续)

■ 第二部分 $f_{K1}'' = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)$

- 是基波磁动势，且在电流 I_K 一定时，幅值不变。
- 正幅值始终在 $\cos(\alpha + \omega t) = 1$ 处，即 $\alpha = -\omega t$ 位置。

↓

反向旋转（朝 α 负方向），旋转的电角速度为 $\frac{d\alpha}{dt} = -\omega$ 。

- 电流 i 达到正最大值时， f_{K1}'' 正幅值仍位于线圈轴线（+A轴）。

91

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

➤ 基波脉振磁动势的分解 (续)

■ 结论

- 一个基波脉振磁动势可分解为两个波长与其相同、转向相反的基波旋 $f_{K1} = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha = f_{K1}' + f_{K1}''$

$$f_{K1}' = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t) \quad \text{正转} \quad f_{K1}'' = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t) \quad \text{反转}$$

- 其他重要关系
 - 两个旋转磁动势的电角速度大小等于电流角频率 ω ；
 - 两个旋转磁动势的幅值均为脉振磁动势最大幅值的一半；
 - 当电流达到正最大值时，脉振磁动势振幅最大，两个旋转磁动势的正幅值恰好都转至线圈轴线处。

92

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

➤ 谐波脉振磁动势的分解

谐波脉振磁动势 $f_{Kv} = (\sin v \frac{\pi}{2}) F_{Kv} \cos \omega t \cos v\alpha$

以 3 次谐波磁动势为例：

$$f_{K3} = -F_{K3} \cos \omega t \cos 3\alpha$$

分解： $f_{K3} = -\frac{1}{2} F_{K3} \cos(3\alpha - \omega t) - \frac{1}{2} F_{K3} \cos(3\alpha + \omega t) = f_{K3}' + f_{K3}''$

两部分： $\begin{cases} f_{K3}' = -\frac{1}{2} F_{K3} \cos(3\alpha - \omega t) & \text{正转} \\ f_{K3}'' = -\frac{1}{2} F_{K3} \cos(3\alpha + \omega t) & \text{反转} \end{cases} \Rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} \frac{\omega}{3} \\ -\frac{\omega}{3} \end{cases}$

93

(3) 整距线圈的磁动势——电流交变时

➤ 谐波脉振磁动势的分解 (续)

■ 结论（与基波的类型）

- 一个 v 次谐波脉振磁动势可分解为两个波长与其相同、转向相反的 v 次谐波旋转磁动势（反之亦然）。
- 其他重要关系
 - 两个旋转磁动势的电角速度大小等于 ω/v ；
 - 两个旋转磁动势的幅值均为脉振磁动势最大幅值的一半；
 - 当电流达到正最大值时，两个旋转磁动势的正幅值（ $v = 4k+1$ ）或负幅值（ $v = 4k-1$ ）恰好都转至线圈轴线处。

94

1. 整距线圈的磁动势

(4) 磁动势的矢量表示法

空间呈正弦波分布的磁动势可用空间矢量表示：

- 矢量的长度等于磁动势幅值；
- 矢量的位置表示磁动势正幅值所在的位置。

磁动势行波

❓ 思考：用矢量表示脉振磁动势

95

(4) 磁动势的矢量表示法

➤ 在空间极坐标系中表示磁动势矢量

■ 不同时刻的矢量图

解析表达式

$$i = \sqrt{2} I_K \cos \omega t$$

$$f_{K1} = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{K1}' = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$$

$$f_{K1}'' = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)$$

96

(4) 磁动势的矢量表示法

在空间极坐标系中表示磁动势矢量 (续)

脉振磁动势分解为两个旋转磁动势

解析表达式

$$i = \sqrt{2} I_K \cos \omega t$$
$$f_{K1} = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha$$
$$f'_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$$
$$f''_{K1} = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$\omega t = 0$

$\omega t = 45^\circ$

97

6.1 单层集中整距绕组的磁动势

2. 一相单层集中整距绕组的磁动势

一个整距线圈是最简单的一相单层集中整距绕组。
二者磁动势的性质相同。

脉振磁动势最大振幅表达式
用相电流有效值 I 和每相串联匝数 N_1 表示

$$F_{Kv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \xrightarrow[N_1 = \frac{p N_K}{a}]{} F_{\phi v} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 I}{p}$$

下标 ϕ 表示“相”

98

6.1 单层集中整距绕组的磁动势

3. 三相单层集中整距绕组的磁动势

三相对称绕组通入三相对称电流

三相对称绕组（空间上
轴线互差120°电角度）

三相对称电流（时间上
互差120°电角度）

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

(正序)

99

3. 三相单层集中整距绕组的磁动势

(1) 三相合成基波磁动势

各相绕组产生的基波脉振磁动势

空间上，分别以各相绕组轴线为中心作余弦分布。

时间上，分别随各相电流以角频率 ω 脉振。

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

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

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

空间上，B、C相轴线分别超前A相轴线120°、240°电角度；
时间上，B、C相电流分别滞后A相电流120°、240°电角度。

100

(1) 三相合成基波磁动势

三三相合成基波磁动势的分析

解析法

“三部曲”

列出每相脉振磁动势的解析表达式（见前页）；

每相磁动势分解为正、反转磁动势；

三相合成（正、反转量分别求和，再相加）。

$$f_1 = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1}$$

正转

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

反转

$$= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) = F_1 \cos(\alpha - \omega t)$$

101

(1) 三相合成基波磁动势

三三相合成基波磁动势的分析 (续)

结论

$$f_1(\alpha, t) = F_1 \cos(\alpha - \omega t), \quad F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1}$$

总体结论：三相对称绕组通入对称电流产生基波旋转磁动势。

具体结论（合成基波旋转磁动势的4个特征）

幅值：恒定，是一相基波脉振磁动势最大振幅的3/2倍。

速度：旋转的电角速度等于电流角频率 $\omega = 2\pi f$ (rad/s)；
相应的转速为 $n_1 = 60f/p$ (r/min)。

转向：朝+ α 方向（正转）；
规律：从电流超前相轴线转向电流滞后相轴线。

位置：某相电流达到正最大值时，三相合成基波旋转磁动势的正幅值正好位于该相绕组轴线处。

102

(1) 三相合成基波磁动势

➤ 三相合成基波磁动势的分析 (续)

■ 空间矢量图法

作某一时刻的矢量图。
(通常选取某相电流为**正最大值**的时刻)

“三部曲”

- 分解：画出各相相轴和各相脉振磁动势的**正、反转磁动势分量**；
- 合成：分别求得三相正、反转磁动势的矢量和；
- 综合：先确定合成正、反转磁动势的性质，再综合二者得到总的合成磁动势。

(1) 三相合成基波磁动势

➤ 三相合成基波磁动势的分析 (续)

■ 空间矢量图法 (续)

选取 $i_A = +\max$ 时刻作图。

若画图时刻为 $\alpha = 0$ ，
则 $f_1 = F_1 \cos(\alpha - \alpha)$

三相反序分量相互抵消，仅存正转磁动势。

$F_1 = 3F_{A1} = \frac{3}{2}F_{\phi 1}$

$F_{A1} = F_{A1}'' = \frac{1}{2}F_{\phi 1}$

注意相轴位置

(1) 三相合成基波磁动势

➤ 三相合成基波磁动势的分析 (续)

■ 空间矢量图法 (续)

结论：
三相对称绕组通入频率为 f 的对称**正序**电流，产生合成**基波旋转**磁动势，它以电角速度 $\omega = 2\pi f$ **正转**，幅值为一相基波脉振磁动势最大振幅的**3/2倍**。

☞ 比较：

- 与解析法得到的结果一致。
- 分析过程比解析法直观，但定量计算不够方便。

3. 三相单层集中整距绕组的磁动势

(2) 三相合成3次谐波磁动势

☞ 注意：空间3次谐波的极距是基波的1/3。

$f_{A3} = -F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha$
 $f_{B3} = -F_{\phi 3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3(\alpha - 120^\circ)$
 $f_{C3} = -F_{\phi 3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3(\alpha - 240^\circ)$
 $\Rightarrow f_3 = f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} = 0$

结论：三相3次谐波磁动势互相抵消；
三相3的整数倍次谐波也都相互抵消。

3. 三相单层集中整距绕组的磁动势

(3) 三相合成5次谐波磁动势

☞ 注意：空间5次谐波的极距是基波的1/5。

$f_{A5} = F_{\phi 5} \cos \omega t \cos 5\alpha$
 $f_{B5} = F_{\phi 5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 5(\alpha - 120^\circ)$
 $f_{C5} = F_{\phi 5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 5(\alpha - 240^\circ)$
 $\Rightarrow f_5 = f_{A5} + f_{B5} + f_{C5} = F_5 \cos(5\alpha + \omega t)$

结论：三相合成5次谐波磁动势的电角速度为 $-\omega/5$ ，是**反转**谐波磁动势。（可推广到 $v = 6k - 1$ 次谐波）

与基波转向相反

3. 三相单层集中整距绕组的磁动势

(4) 三相合成7次谐波磁动势

☞ 注意：空间7次谐波的极距是基波的1/7。

$f_{A7} = -F_{\phi 7} \cos \omega t \cos 7\alpha$
 $f_{B7} = -F_{\phi 7} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 7(\alpha - 120^\circ)$
 $f_{C7} = -F_{\phi 7} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 7(\alpha - 240^\circ)$
 $\Rightarrow f_7 = f_{A7} + f_{B7} + f_{C7} = F_7 \cos(7\alpha - \omega t)$

结论：三相合成7次谐波磁动势的电角速度为 $\omega/7$ ，是**正转**谐波磁动势。（可推广到 $v = 6k + 1$ 次谐波）

与基波转向相同

思考：空间矢量图法分析合成谐波磁动势

第6章 交流绕组的磁动势

6.2 双层分布短距绕组的磁动势

1. 单层整距分布线圈组的磁动势

(1) 线圈组构成

- 位于**同一相带**的 q 个整距线圈串联；
- 相邻线圈**轴线**在空间**错开**一个槽距角（电角度）；
- 各线圈的电流相同，脉振磁动势的最大振幅及其**随时间变化规律相同**。

单层分布整距线圈组示例
($q=3$)

109

1. 单层整距分布线圈组的磁动势

(2) 基波磁动势

将同一相带 q 个线圈的基波脉振磁动势矢量求和，得到线圈组的**合成基波脉振磁动势**；其最大振幅为 $F_{q1} = qF_{K1}k_{d1}$

其中， $F_{K1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K = 0.9 N_K I_K$

基波分布因数 $k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$

$q=3$ 时的基波矢量图
 F_{K1j} 是第 j 个线圈的基波脉振磁动势矢量， $j=1, 2, \dots, q$

110

1. 单层整距分布线圈组的磁动势

(3) 谐波磁动势

将同一相带 q 个线圈的同次谐波脉振磁动势矢量求和，得到线圈组的**合成谐波脉振磁动势**；其最大振幅为 $F_{qv} = qF_{Kv}k_{dv}$

其中， $F_{Kv} = \frac{1}{v} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K = \frac{1}{v} F_{K1}$

v 次谐波分布因数 $k_{dv} = \frac{\sin \frac{qv\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}$

$q=3$ 时的谐波矢量图
 F_{Kvj} 是第 j 个线圈的 v 次谐波脉振磁动势矢量， $j=1, 2, \dots, q$

111

6.2 双层分布短距绕组的磁动势

2. 双层短距线圈组的磁动势

(1) 线圈组构成

最简单的一相双层绕组：

- 每极下只有一个短距线圈（ $q=1$ ）；
- 一对极（ $p=1$ ）。

注意：

- 双层绕组每对极下极相组总是**成对出现**；
- 每对极下两个极相组的**电流方向相反**。

双层集中短距线圈组
($p=1, q=1$)

112

2. 双层短距线圈组的磁动势

(2) 一个短距线圈的磁动势

> 前一极距内短距线圈产生的磁动势

线圈将一对极空间分为其内、外两部分，分别对应两段磁阻；
每段磁动势幅值取决于总磁动势在该段磁阻上的分压。

$F_{\text{内}} y_1 = F_{\text{外}} (2\pi - y_1)$
 $F_{\text{内}} + F_{\text{外}} = N_K i$

$y = y_1 / \pi$

$F_{\text{内}} y_1 = F_{\text{外}} (2\pi - y_1)$
 $F_{\text{内}} + F_{\text{外}} = N_K i$

113

2. 双层短距线圈组的磁动势

(2) 一个短距线圈的磁动势（续）

> 后一极距内短距线圈产生的磁动势

$y = y_1 / \pi$

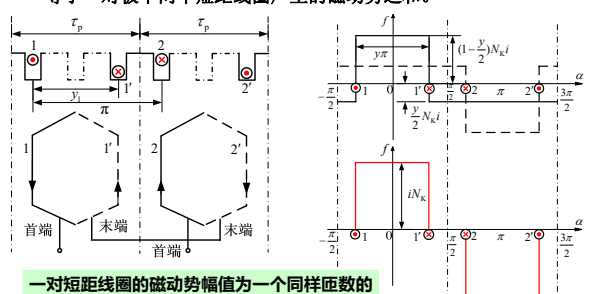
$F_{\text{内}} y_1 = F_{\text{外}} (2\pi - y_1)$
 $F_{\text{内}} + F_{\text{外}} = N_K i$

114

2. 双层短距线圈组的磁动势

(3) 短距线圈组的磁动势

等于一对极下两个短距线圈产生的磁动势之和。



一对短距线圈的磁动势幅值为一个同样匝数的整距线圈的2倍，但每极下波形宽度减为yπ。

115

2. 双层短距线圈组的磁动势

(3) 短距线圈组的磁动势（续）

对波形进行分解，可得基波和奇数次谐波。

$$f(\alpha) = f_{K1} + f_{K3} + f_{K5} + \dots$$
$$= \sum_{v=1,3,5,\dots} c_v \cos v\alpha$$

各次谐波的幅值为

$$c_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \cos v\alpha d\alpha = \frac{1}{v} \frac{4}{\pi} N_K i \sin v \frac{y\pi}{2} = \frac{1}{v} \frac{4}{\pi} N_K i k_{pv}$$

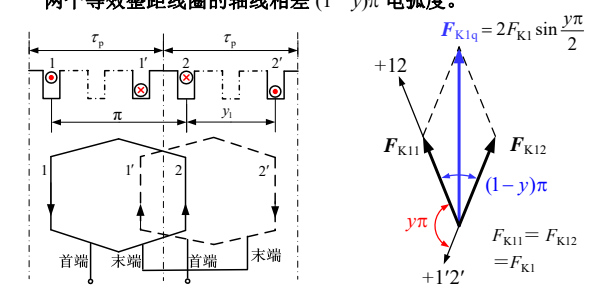
v次谐波节距因数 $k_{pv} = \sin v \frac{y\pi}{2}$

116

2. 双层短距线圈组的磁动势

(4) 短距线圈组的磁动势——用空间矢量法分析

两个短距线圈的上、下边分别构成等效的整距线圈；
两个等效整距线圈的轴线相差 $(1-y)\pi$ 电弧度。



$$F_{K1q} = 2F_{K11} \sin \frac{y\pi}{2}$$
$$F_{K11} = F_{K12} = F_{K1}$$

117

6.2 双层分布短距绕组的磁动势

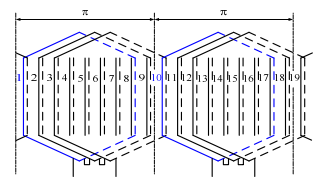
3. 双层分布短距绕组的磁动势

(1) 基波磁动势

一相绕组：
一对极下属于同一相的 $2q$ 个短距线圈的基波脉振磁动势矢量求和，得到该相绕组的**基波脉振磁动势**，其最大振幅为

$$F_{\phi 1} = q(2F_{K1} \sin \frac{y\pi}{2})k_{d1} = 2qF_{K1}k_{d1}k_{p1} = 2qF_{K1}k_{dp1}$$

基波绕组因数 $k_{dp1} = k_{d1}k_{p1}$



双层短距分布绕组示例
(q=3, 一对极范围)

118

3. 双层分布短距绕组的磁动势

(1) 基波磁动势（续）

➤ 一相绕组基波脉振磁动势的最大振幅

$$F_{\phi 1} = 2qF_{K1}k_{dp1} = 2q \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_K I_K}{2} k_{dp1}$$
$$= \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{2pqN_K}{a} \right) \left(\frac{aI_K}{p} \right) k_{dp1}$$
$$F_{\phi 1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$

双层绕组

$$N_1 = \frac{2pqN_K}{a}$$
$$I_K = \frac{I}{a}$$

➤ 三相合成基波旋转磁动势的幅值

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_1 I}{p} k_{dp1} = 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$

119

3. 双层分布短距绕组的磁动势

(2) 谐波磁动势

➤ 一相绕组谐波脉振磁动势的最大振幅

$$F_{\phi v} = \frac{1}{v} \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_1 I}{p} k_{dpv}$$

v次谐波绕组因数 $k_{dpv} = k_{dv}k_{pv}$

➤ 三相合成谐波旋转磁动势的幅值

$$F_v = \frac{3}{2} F_{\phi v} = \frac{3}{2} \frac{1}{v} \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_1 I}{p} k_{dpv} = \frac{1}{v} 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dpv}$$
$$(\nu = 6k \pm 1, k \text{ 为正整数})$$

通过适当分布或短距，可在基波磁动势幅值损失较小的前提下，使主要谐波磁动势幅值减小很多，从而改善磁动势波形。

120

第6章 交流绕组的磁动势

6.3 椭圆形磁动势

问题：多相绕组通电产生的磁动势性质
(脉振？旋转？或其他？)

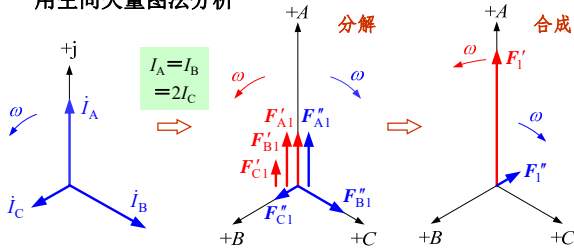
分析方法

- 一相绕组产生的磁动势是脉振性质的，可分解为正转和反转磁动势。
- 将各相绕组产生的正、反转磁动势分别叠加，得到总的正、反转磁动势。
- 将总的正、反转磁动势合成，得到总的合成磁动势。

6.3 椭圆形磁动势

例：三相对称绕组通入不对称电流

用空间矢量图法分析



结论：一般情况下，合成基波磁动势中既有正转磁动势，又有反转磁动势。

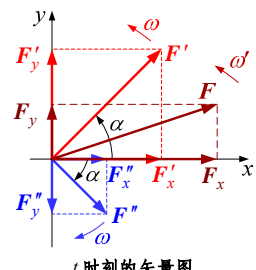
6.3 椭圆形磁动势

合成磁动势的性质

确定合成磁动势的轨迹

- 以正、反转磁动势矢量 F' 、 F'' 重合的位置作为 x 轴，重合时刻为 $t=0$ 。
- 在 t 时刻， F' 、 F'' 分别位于 $\alpha = \omega t$ 和 $\alpha = -\omega t$ 处。
- x 、 y 轴上的投影之和分别为

$$F_x = F'_x + F''_x = F' \cos \alpha + F'' \cos \alpha = (F' + F'') \cos \omega t$$
$$F_y = F'_y + F''_y = F' \sin \alpha - F'' \sin \alpha = (F' - F'') \sin \omega t$$



6.3 椭圆形磁动势

合成磁动势的性质 (续)

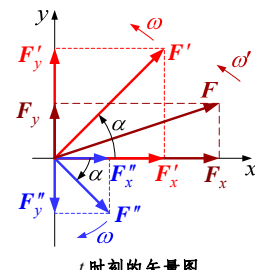
确定合成磁动势的轨迹

- 合成磁动势的参数方程

$$F_x = (F' + F'') \cos \omega t$$
$$F_y = (F' - F'') \sin \omega t$$

- 合成磁动势的轨迹方程

$$\frac{F_x^2}{(F' + F'')^2} + \frac{F_y^2}{(F' - F'')^2} = 1$$



结论：幅值不同的正、反转磁动势，其合成磁动势为椭圆形旋转磁动势，转向与幅值较大的正/反转磁动势相同。

6.3 椭圆形磁动势

合成磁动势性质——小结

- 一般情况： $F' \neq F''$

F' 正转

F'' 反转

性质：椭圆形（旋转）磁动势。
 - 幅值、转速时变
 - 转向由 F' 、 F'' 中幅值较大者决定
- 特例： $F' = F''$

性质：脉振磁动势。
- 特例： $F'' = 0$ ，或 $F' = 0$


性质：圆形（旋转）磁动势（正转，或反转）。

幅值、转速不变（ I 、 f 一定时）

第6章 交流绕组的磁动势

小结

- 一相集中整距绕组的脉振磁动势（基波、谐波）的特征。
- 对称三相绕组通入对称三相电流产生的合成磁动势（基波、谐波）的性质与特征。
- 脉振磁动势的分解；合成磁动势的分析方法（解析法/空间矢量图法）。
- 绕组分布、短距对磁动势幅值的影响，对改善磁动势波形的作用。
- 圆形旋转磁动势及其产生条件。
- 主要概念
磁动势：基波、谐波，脉振、旋转，圆形、椭圆形；
磁动势幅值、脉振磁动势最大振幅；空间矢量图



第2篇 交流电机的共同问题

总结

1. 对交流绕组的基本要求。


2. 空间位置不同的导体（或线圈）的感应电动势的关系（基波、谐波）。

3. 分布线圈组与集中线圈组的异同，短距线圈与整距线圈的异同（构成、电动势）；单层分布绕组和双层分布短距绕组的构成。

4. 导体、线匝、线圈、线圈组（极相组）、相绕组的感应电动势（基波、谐波）的计算与相互关系。

5. 利用电动势星形相量图布置交流绕组；绘制绕组展开图。

127



第2篇 交流电机的共同问题

总结（续）

6. 一相绕组通入交流电流产生的磁动势（基波、谐波）的性质与特征。

7. 对称三相绕组通入对称三相交流电流产生的合成磁动势（基波、谐波）的性质与特征。


8. 合成磁动势的分析（解析法/空间矢量图法）。

9. 脉振磁动势与旋转磁动势的区别与关联；产生圆形磁动势的条件。

10. 三相对称绕组改善电动势与磁动势波形的方法（分布、短距、绕组联结）。

11. 空间量（磁通密度、磁动势）与时间量（电动势、电流）的区别及其基波、谐波的相互关系。

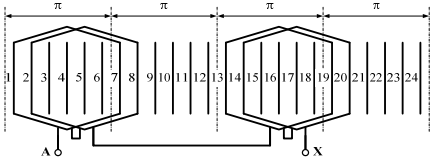
128



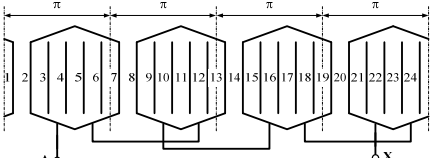
(2) 三相单层分布整距绕组的布置

绕组展开图（续）——端部较短的等效联结方式

线圈实际跨距为6



线圈实际跨距为5



129