

# 电机与拖动基础

下 册

李发海 王 岩 编

中央广播电视大学出版社

# 目 录

<b>第四章 交流电机的绕组电势与磁势</b> .....	1
内容提要 .....	1
§ 4-1 交流电机的电枢绕组和感应电势 .....	1
§ 4-2 交流电机电枢绕组产生的磁势 .....	23
基本要求 .....	50
习题 .....	52
<b>第五章 三相异步电动机原理</b> .....	54
内容提要 .....	54
§ 5-1 三相异步电动机的简单结构与用途 .....	54
§ 5-2 三相异步电动机在转子不转时 ( $n=0$ ) 的状况 .....	60
§ 5-3 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系 .....	78
基本要求 .....	95
习题 .....	97
<b>第六章 三相异步电动机的特性</b> .....	99
内容提要 .....	99
§ 6-1 三相异步电动机的机械特性 .....	99
§ 6-2 三相异步电动机的工作特性及其测试方法 .....	114
§ 6-3 三相异步电动机的参数测定 .....	116
基本要求 .....	118
习题 .....	119
<b>第七章 三相异步电动机的电力拖动</b> .....	121
内容提要 .....	121
§ 7-1 鼠笼式三相异步电动机的起动方法 .....	121
§ 7-2 绕线式三相异步电动机的起动 .....	133
§ 7-3 三相异步电动机的调速方法 .....	147
§ 7-4 三相异步电动机各种运行状态 .....	169
基本要求 .....	186
习题 .....	190
<b>第八章 三相异步电动机继电器接触器控制线路</b> .....	192
内容提要 .....	192
§ 8-1 概述 .....	192
§ 8-2 三相异步机的继电器接触器控制方法 .....	203
基本要求 .....	220
习题 .....	221
<b>第九章 同步电动机</b> .....	223

内容提要	223
§ 9-1 同步电动机的基本结构	223
§ 9-2 同步电动机工作原理	225
基本要求	240
习题	241
<b>第十章 微控电机</b>	<b>242</b>
内容提要	242
§ 10-1 单相异步电动机	242
§ 10-2 伺服电动机	250
§ 10-3 微型同步电动机	258
§ 10-4 步进电动机	263
§ 10-5 旋转变压器	272
§ 10-6 自整角机	279
§ 10-7 测速发电机	288
基本要求	293
<b>第十一章 电力拖动电动机的选择</b>	<b>298</b>
内容提要	298
§ 11-1 电力拖动系统中电动机选择的主要内容	298
§ 11-2 电动机的发热与冷却	299
§ 11-3 电动机的额定功率	301
§ 11-4 电动机额定功率的选择	306
基本要求	324
习题	328
<b>附 习题答案</b>	<b>330</b>
<b>参考书目</b>	<b>334</b>

## 第四章 交流电机的绕组电势与磁势

### 内 容 提 要

为了研究交流电机的各种性能，我们把其中一些共同的内容抽出来，加以介绍，例如所有交流电机都有交流电枢绕组以及绕组感应电势的问题；当绕组里流过交流电流时，又有产生磁势的问题。

为了容易学习，本章先从一根导体感应电势讲起，然后到线圈电势、整距或短距线圈电势，几个线圈分布后的电势，直至相绕组电势的计算。并介绍了根据对电势的要求，反过来去连接合乎要求的单层、双层电枢绕组。

关于磁势问题也是如此，即先从简单的一个线圈产生的磁势开始，直到单相、三相绕组产生的合成磁势。

不管是电势还是磁势，我们都希望能得到较大的基波分量，为此介绍了一些削弱谐波电势、磁势的一套办法。

在分析方法上，虽然也用了解析法，导了许多公式，但用向量表示电势与磁势仍是很重要的方法。

### §4-1 交流电机的电枢绕组和感应电势

交流电机的电枢绕组与直流电机的电枢绕组就其功能来说，是完全一样的，他们都是电机中能量转换必不可少的一部分。但在绕组的具体联接上，二者有同有异。

交流电机的绕组种类很多：有单层绕组、双层绕组、单双层绕组、正弦绕组、变极绕组、分数槽绕组、延边三角形绕组等等。限于篇幅，本章主要介绍异步电动机常用的单层绕组和双层绕组。最后还介绍一下用于小型单相异步电动机中的正弦绕组，以及延边三角形绕组的接法。

对交流电机绕组的要求，首先是能感应出一定大小的电势。对三相电机来说，还要求三相电势是对称的。所谓对称，是指三相电势的有效值大小相等，在时间相位上互差 $120^\circ$ 电角度。为了满足这个要求，除了使绕组中的每个线圈有一定的串联匝数外，还应把各个线圈在定子内圆空间按一定规律分布开。其次，不管是交流发电机还是电动机，当加上负载后，电枢绕组里都要有电流通过。这就要求线圈中的导体具有一定大小的截面积。此外，还要求绕组有一定的机械强度和可靠的绝缘性能。

总之，上述对交流电机电枢绕组的要求，从原理上来看，可以归纳为对绕组感应电势的要求。

即要求能感应出波形接近正弦、有一定数值的三相对称电势(对交流电动机来说,要求当三相绕组中通入三相对称交流电流时,能产生圆形旋转磁势。安排绕组时,如果能满足电势的要求,对磁势的要求也一定能够满足)。下面根据这些要求,来安排电枢绕组。

交流电机电枢绕组和感应电势的问题,对同步电机或异步电机都适用。为了容易理解,在下面的分析中,用了一台交流发电机来进行分析,所得结论都能用到异步电动机上。

### 一、绕组的基波电势

电机的绕组是由许多个线圈组成的(在直流机里曾把线圈叫作元件),而线圈又包含了许多根导体。为了清楚起见,我们先分析导体和线圈的感应电势,当掌握了这些内容后,根据具体的要求,便可联出电机的各种绕组。

#### 1. 导体电势

图 4-1(a) 是一台简单的交流发电机模型。它的定子是一个圆筒形的铁心,在靠近铁心内表面的槽里,插了一根导体  $A$ 。圆筒形铁心中间放了可以旋转的主磁极。主磁极可以是永久磁铁,也可以是电磁铁,磁极的极用  $N$ 、 $S$  表示。图 4-1(a) 是从轴向看的示意图,但是一定要记住,这台电机的定子铁心、导体  $A$  以及磁极在轴向有一定的长度,用  $l$  表示。

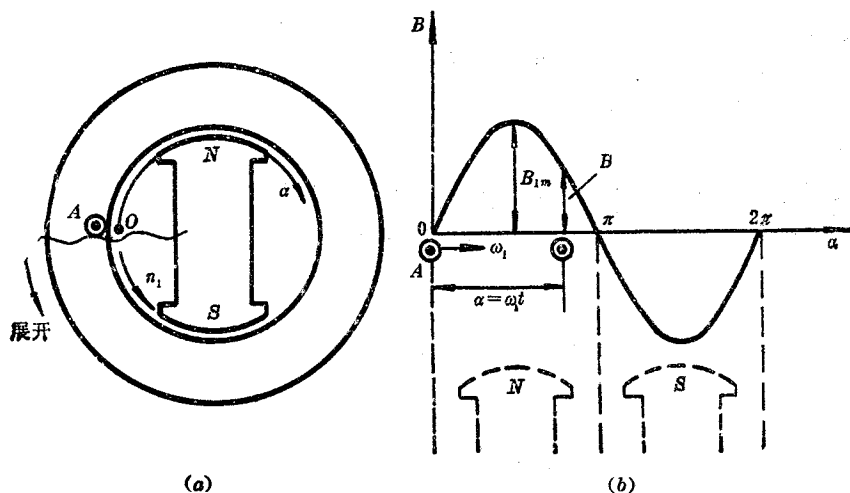


图 4-1 简单的交流发电机模型

用原动机拖着主磁极以恒定转速  $n_1$  相对于定子逆时针方向旋转。在图 4-1(a) 里,放在定子上的导体  $A$  与主磁极之间有了相对运动,根据电磁感应定律知道,导体  $A$  中就会感应电势。

为了写公式,在图 4-1(a) 中转子的表面上放上直角坐标。坐标原点任选在两个主磁极的中间,纵坐标代表气隙磁密  $B$  的大小,横坐标表示磁极表面各点距坐标原点的距离,用角度  $\alpha$  衡量。整个坐标随着转子一道旋转。图 4-1(b) 是把图 4-1(a) 在导体  $A$  处沿轴向剖开,并展成直线的图。由于角度  $\alpha$  是衡量转子表面的空间距离,所以是空间角度。在电机里,我们把一对主磁极表面占的空间距离,用空间角度表示时,定为  $360^\circ$  (或  $2\pi$  弧度)。它与电机整个转子表面占的空间几何角度  $360^\circ$  ( $2\pi$  弧度) 是有区别的。前者叫空间电角度;后者叫机械角度,用  $\beta$  表示。如果电机只有一对主磁极(两个磁极算一对),空间电角度  $\alpha$  与机械角度  $\beta$  二者相等。如果电机有  $p$  对

主磁极,对应的总空间电角度为 $p \times 360^\circ$ ,而机械角度永远为 $360^\circ$ ,它们之间的关系为

$$\alpha = p\beta$$

今后我们分析电机的原理时,都用空间电角度这个概念,而不用机械角度,这点希望读者要十分明确才行。

为了用曲线或公式表达气隙磁密以及导体中的感应电势,还应规定它们的正方向。我们假设气隙磁通从磁极到定子为正,对应的磁密也为正,反之为负。规定图4-1(b)中导体A的感应电势出纸面为正,用 $\odot$ 表示。

电机气隙磁通是由转子励磁绕组中通入励磁电流产生的。当主磁极逆时针方向旋转时,气隙磁通以及对应的气隙磁密也随之一道旋转。

假设电机的气隙中只有波长等于一对主磁极极距、沿气隙圆周方向分布为正弦形的磁密波,称为基波磁密,如图4-1(b)所示。用公式表示为

$$B_x = B_{1m} \sin \alpha$$

式中 $B_{1m}$ 是气隙磁密的最大值。

根据电磁感应定律知道,导体切割磁感应线所产生感应电势的大小用公式

$$e = B_x l v$$

确定,感应电势的瞬时实际方向,用右手定则确定。

式中 $B_x$ 是导体在 $\alpha$ 处的气隙磁密;

$l$ 是切割磁感应线的导体长度;

$v$ 是导体垂直切割磁感应线的相对线速度。

已知转子逆时针方向旋转的转速为 $n_1$ 转/分,用角速度表示为

$$\omega_1 = 2\pi p \frac{n_1}{60} \text{ 电弧度/秒}$$

或

$$\omega_1 = 360^\circ p \frac{n_1}{60} \text{ 电角度/秒}$$

在求导体中的感应电势时,显然可以看成转子不动而导体A以角速度 $\omega_1$ 朝相反方向旋转。在图4-1(b)直角坐标上,就是沿着 $-\alpha$ 的方向以 $\omega_1$ 角速度移动。此外我们规定,当导体A最初正好位于图4-1(b)坐标原点的瞬间,作为时间的起点,即 $t=0$ 。

当时间过了 $t$ 秒后,导体A移到 $\alpha$ 处,这时

$$\alpha = \omega_1 t$$

该处的气隙磁密为

$$B_x = B_{1m} \sin \alpha = B_{1m} \sin \omega_1 t$$

于是导体A中感应的基波电势瞬时值为

$$\begin{aligned} e_1 &= B_x l v = B_{1m} l v \sin \omega_1 t \\ &= E_{1m} \sin \omega_1 t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega_1 t \end{aligned}$$

式中 $E_{1m} = B_{1m} l v$ 是导体中基波感应电势的最大值;

$E_1$  是它的有效值。

可见导体中感应的基波电势随时间变化的波形，决定于气隙中磁密的分布波形。导体中随时间按正弦规律变化的电势，如图 4-2(a) 所示。如果用电角度  $\omega_1 t$  作为衡量电势变化的时间，则图 4-1(b) 中，导体从坐标原点位移到  $\alpha$  空间电角度处所需的时间就是  $\omega_1 t$  时间电角度，且二者的数值相等，即在空间上所位移的电角度  $\alpha$  等于所经历的时间电角度  $\omega_1 t$ 。

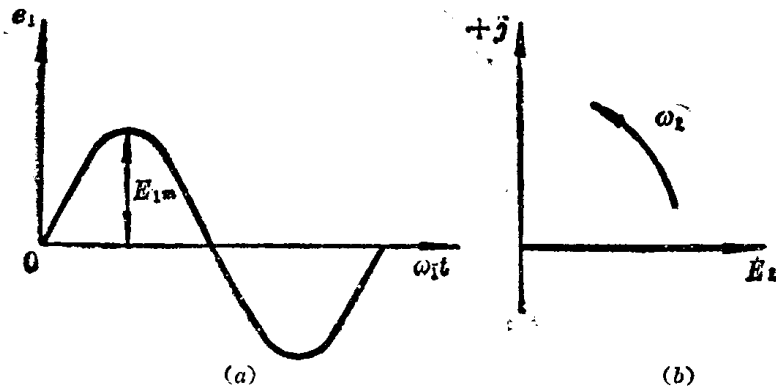


图 4-2 导体 A 感应的基波电势波形及向量表示法

从图 4-1(b) 中看出，导体 A 每经过一对主磁极，其中感应电势经历了一个周期。用  $f_1$  表示定子上导体 A 中感应基波电势的频率（即每秒基波电势变化的周数）。当电机的转子每转一圈，由于转子上有  $p$  对主磁极，导体 A 中基波电势变化了  $p$  周，已知电机每秒转了  $n_1/60$  转，所以导体 A 基波电势的频率  $f_1$  为

$$f_1 = \frac{pn_1}{60} \text{ 赫}$$

式中  $n_1$  的单位转/分。

从上式看出，当电机的极对数  $p$  与转速  $n_1$  一定时，频率  $f_1$  就是固定的数值。我国电力系统规定频率  $f_1 = 50$  赫。为此，当极对数  $p = 1$  时， $n_1 = 3000$  转/分； $p = 2$  时， $n_1 = 1500$  转/分，余类推。转速  $n_1$  叫同步转速。

用频率  $f_1$  表示转子的角速度  $\omega_1$  时为

$$\omega_1 = \frac{2\pi pn_1}{60} = 2\pi f_1 \text{ 电弧度/秒}$$

$\omega_1$  也是导体 A 感应基波电势变化的角频率。

导体中感应基波电势的最大值为

$$\begin{aligned} E_{1m} &= B_{1m} l v = \frac{\pi}{2} \left( \frac{2}{\pi} B_{1m} \right) l (2\tau f_1) \\ &= \pi f_1 B_{1av} l \tau = \pi f_1 \Phi_1 \end{aligned}$$

式中  $B_{1av} = \frac{2}{\pi} B_{1m}$  是气隙磁密的平均值；

$\Phi_1 = B_{1av} l \tau$  是气隙每极基波磁通量；

$v = 2p\tau \frac{n_1}{60} = 2\tau f_1$ ，其中  $\tau$  是定子内表面用长度表示的极距。

导体基波电势的有效值为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f_1 \Phi_1 = 2.22 f_1 \Phi_1$$

式中  $\Phi_1$  的单位是韦;

$E_1$  的单位是伏。

从电路分析中知道,一个正弦时间函数  $a \sin(\omega_1 t + \varphi_0)$ , 可以用一个在复平面上以角速度  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , 逆时针方向旋转的旋转向量  $Ae^{j\omega_1 t}$  表示, 其中  $A = ae^{j\varphi_0} = a \angle \varphi_0$  是复振幅,  $\varphi_0$  是初相角, 在写公式或画向量图时, 记为  $\underline{A}$ 。例如上述的导体基波电势  $e_1 = E_{1m} \sin \omega_1 t$  用向量表示为  $\underline{E}_{1m} = E_{1m} / 0^\circ$ , 其模就是振幅  $E_{1m}$ , 初相角为零, 并且此向量以  $\omega_1$  角速度逆时针方向在复平面上旋转。在电工中, 通常用的是正弦电流、电压、电势的有效值, 而不用它的振幅。由于振幅与有效值之间有固定的  $\sqrt{2}$  倍关系, 因此在表示正弦电流、电压、电势的向量时, 可以用它的有效值。上述正弦电势  $e_1 = E_{1m} \sin \omega_1 t$ , 可用  $\underline{E}_1 = E_1 / 0^\circ$  表示, 并以角速度  $\omega_1$  逆时针方向在复平面里旋转, 即为旋转向量, 如图 4-2(b) 所示。

**思考题 4-1** 空间电角度是怎样定义的? 空间电角度与时间电角度二者的含义各有什么不同? 在数值上二者有什么关系?

**思考题 4-2** 图 4-1 中一根导体感应的基波电势有效值与哪些量有关? 它的频率  $f_1$  又与哪些量有关?

**思考题 4-3** 要想让图 4-1 中导体 A 感应基波电势的频率  $f_1 = 60$  赫, 问主磁极的转速应为多少才行?

**例题 4-1** 在电机的定子上放了相距  $150^\circ$  空间电角度的两根导体 A 与 X, 转子绕组通入直流励磁电流产生一对极性的气隙磁密, 并规定导体电势出纸面为正, 如图 4-3 所示。已知原动机拖动电机转子逆时针方向以  $n_1$  的转速恒速旋转时, 在每根导体中感应的基波电势有效值都是 10 伏。画出图 4-3 所示瞬间两根导体 A 与 X 感应基波电势向量在复平面上的位置。

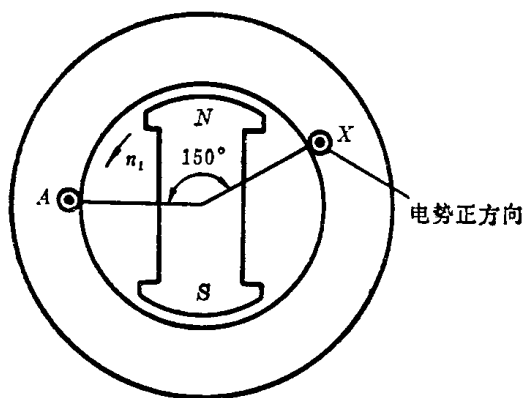


图 4-3 在定子上相距  $150^\circ$  空间电角度的导体 A 与 X

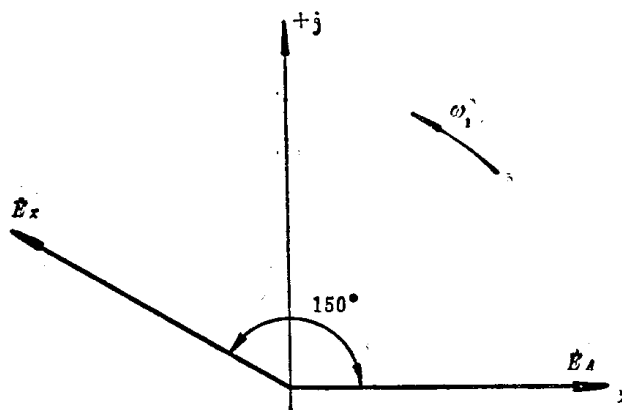


图 4-4 用向量表示的 A、X 两根导体的基波电势

**解** 从图 4-3 中看出, 顺着转子转动方向看, 导体 A 在导体 X 的前面  $150^\circ$  空间电角度的地方, 用向量表示的导体基波电势, 导体 A 的基波电势向量应落后于导体 X 的向量  $150^\circ$  时间电角度。这是因为 N 极先经过 X 导体处, 再到 A 导体处的缘故。图 4-4 画出了图 4-3 所示瞬间对应



的导体基波电势向量图。每根向量的长短代表10伏大小的有效值。

## 2. 整距线匝电势

在图 4-5(a) 中相距一个极距 ( $180^\circ$  空间电角度或  $\pi$  弧度空间电角度) 的位置上放了两根导体 A 与 X, 按照图 4-5(b) 的形式联成一个整距线匝。可见一个线匝仅包含了两根导体, 把线匝的两个引出线分别叫做头和尾, 如图 4-5(b) 所示。

在电机里, 只有放在铁心里的导体才能感应电势, 导体 A 与 X 之间的连线不感应电势, 只起连线的作用, 叫做端接线。

由于图 4-5 中两根导体 A 与 X 在空间位置上相距一个极距, 当一根导体处于 N 极中心下时, 另一根导体必定处于 S 极中心下, 所以它们的基波感应电势总是大小相等, 方向相反, 即在时间相位上彼此相差  $180^\circ$  时间电角度 ( $\pi$  弧度时间电角度)。如果画图 4-5(a) 两根导体正好在主极之间的瞬时, 每根导体的基波电势向量如图 4-5(c) 所示。其中  $\dot{E}_{A1}$  是导体 A 的基波电势向量,  $\dot{E}_{X1}$  是导体 X 的基波电势向量。

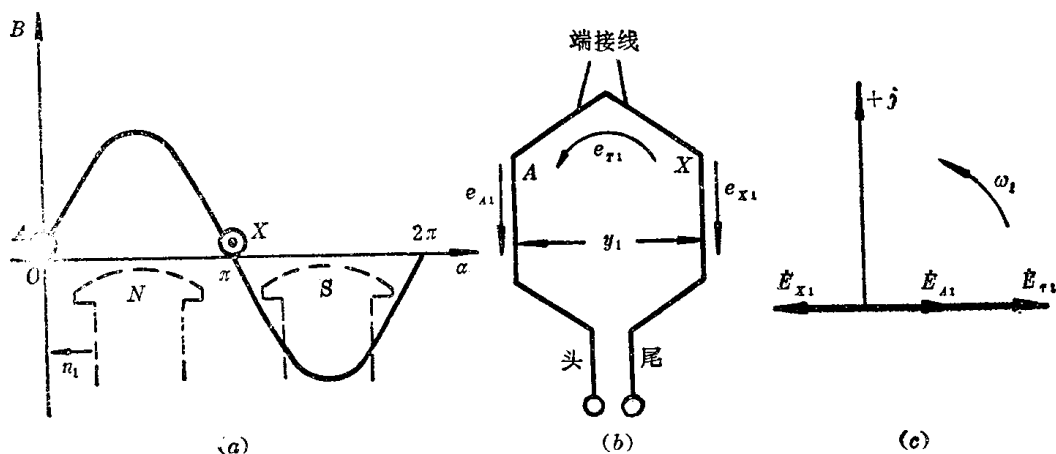


图 4-5 整距线匝感应基波电势

为了研究线匝电势, 还得规定一下线匝基波电势的正方向。线匝基波电势用  $e_{T1}$  表示, 它的正方向如图 4-5(b) 所示。

从图 4-5(b) 中看出, 线匝基波电势  $e_{A1}$ 、 $e_{X1}$  之间的关系为

$$e_{T1} = e_{A1} - e_{X1}$$

如果用向量表示, 则为

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1}$$

从这个式子中知道, 线匝基波电势向量  $\dot{E}_{T1}$  是两根导体基波电势向量  $\dot{E}_{A1}$ 、 $\dot{E}_{X1}$  之差。

把图 4-5(c) 中的向量  $\dot{E}_{A1}$  减向量  $\dot{E}_{X1}$  得  $\dot{E}_{T1}$ , 画在同一图里。可见, 整距线匝基波电势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{T1} &= 2E_{A1} = 2 \times 22.2 f_1 \Phi_1 \\ &= 4.44 f_1 \Phi_1 \end{aligned}$$

**思考题 4-4** 如何理解整距线匝基波电势有效值正好是每根导体基波电势有效值的两倍?

**思考题 4-5** 整距线匝基波电势有效值的大小与线匝本身和转子的相对位置有无关系?

思考题 4-6 你会用作图法求两个向量之和,或两个向量之差吗?

### 3. 整距线圈电势

如果图 4-5(b) 中的线匝不止一匝,而是  $W_y$  匝,就叫线圈。显然不管线圈中有多少线匝串联,引出线仍为两根:一根叫做头;一根叫做尾。一个线圈有两个边,它们之间的距离叫节距,用  $y_1$  表示,如图 4-5(b) 所示。 $y_1 = \pi$  弧度空间电角度的线圈就是整距线圈,当  $y_1 < \pi$  弧度空间电角度时叫短距线圈,当  $y_1 > \pi$  弧度空间电角度时叫长距线圈。在电机中,一般不用长距线圈。

整距线圈基波电势有效值为

$$E_{y_1} = 4.44 f_1 W_y \Phi_1$$

### 4. 短距线圈电势

图 4-6(a) 里的线圈是一个短距线圈,线圈的节距  $y_1 = y\pi$ ,其中  $y$  是一个大于 0 小于 1 的数,如图 4-6(b) 所示。图 4-6(c) 是在这个瞬间短距线圈感应基波电势的向量图。根据规定的正方向,短距线圈的基波电势向量为

$$\dot{E}_{y_1(y_1 < \pi)} = \dot{E}_{A_1} - \dot{E}_{X'_1} = E_{A_1} / 0^\circ - E_{X'_1} / y\pi$$

短距线圈基波电势的有效值为

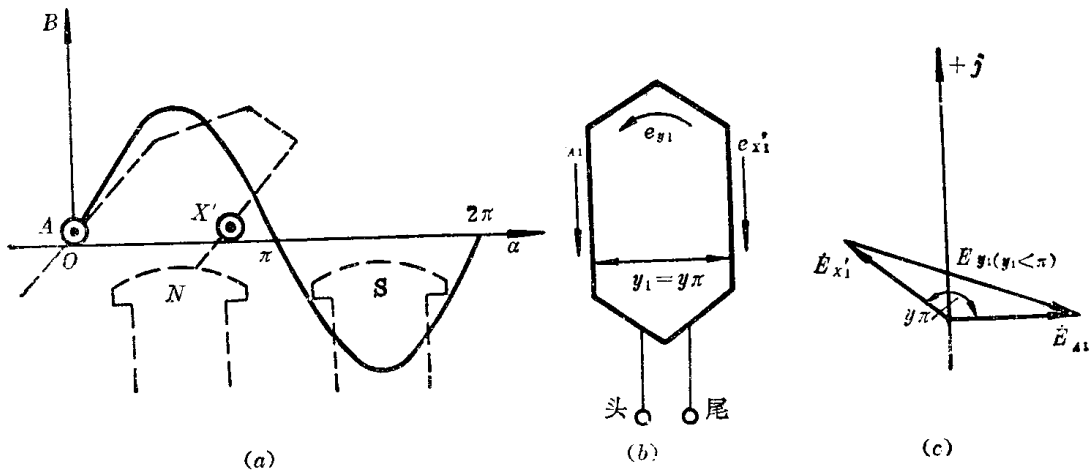


图 4-6 短距线圈基波电势

$$\begin{aligned} E_{y_1(y_1 < \pi)} &= 2E_{A_1} \sin y \frac{\pi}{2} = 4.44 f_1 W_y \Phi_1 \sin y \frac{\pi}{2} \\ &= 4.44 f_1 W_y k_{y_1} \Phi_1 \end{aligned}$$

式中  $k_{y_1} = \sin y \frac{\pi}{2}$  叫做基波短距系数。

线圈短距时,  $k_{y_1} < 1$ 。只有  $y = 1$ , 即整距线圈时,  $k_{y_1} = 1$ 。

当线圈短距后,两个圈边中感应基波电势的相角不是相差  $\pi$  弧度时间电角度,所以短距线圈的基波电势有效值不是每个圈边电势有效值的两倍,而是相当于把线圈看成是整距线圈所得电势再乘上一个小于 1 的基波短距系数。

我们也可以这样来理解,把图 4-6 中的短距线圈硬看成是整距线圈,不过它的匝数不是  $W_y$ ,而是  $W_y k_{y_1}$ ,从线圈感应基波电势的大小来看,完全是等效的。

**思考题 4-7** 长距线圈基波电势有效值与它的圈边基波电势有效值之间有什么关系?

**例题 4-2** 如果把图 4-3 中 A、X 两根导体组成线圈, 求该线圈的基波电势有效值是多少 (已知线圈基波感应电势  $\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1}$ )?

**解** (1) 用画向量的办法可以求出线圈基波电势的有效值, 量得  $E_{T1} = 19.3$  伏 (见图 4-7)。

(2) 用计算基波短距系数的办法求  $E_{T1}$ 。

图 4-3 中 A、X 两根导体在空间相距  $150^\circ$  空间电角度, 依此可计算出短距线圈的节距  $y_1$  (用空间电弧度表示) 为

$$y_1 = y\pi = 150^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ}$$

所以

$$y = \frac{150^\circ}{180^\circ} = 0.833$$

基波短距系数

$$k_{y1} = \sin y \frac{\pi}{2} = \sin 0.833 \times 90^\circ = 0.965$$

图 4-3 中短距线圈基波感应电势有效值为

$$E_{T1} = 2 \times 10 \times 0.965 = 19.3 \text{ 伏}$$

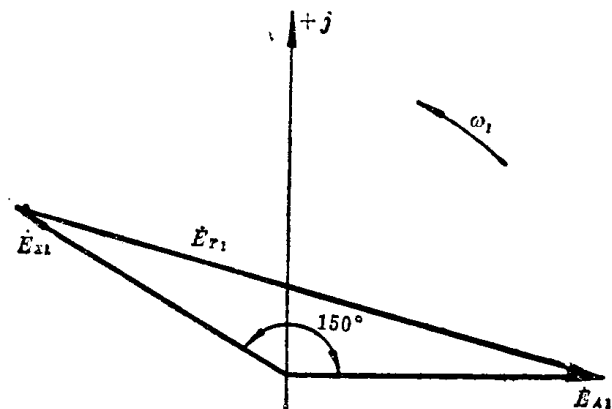


图 4-7 图 4-3 中线圈的基波电势

### 5. 整距分布线圈组的电势

为了充分利用电机定子内圆空间, 定子上不止放一个整距线圈, 而是放上几个线圈, 并均匀地分布在定子内表面的槽里。

图 4-8(a) 画的是在电机的定子槽里放上三个均匀分布的整距线圈, 即 1-1'、2-2'、3-3', 它们的匝数彼此相等, 按头和尾连接, 即互相串联起来, 叫线圈组, 如图 4-8(b) 所示。相邻线圈的槽距角为  $\alpha$ 。

关于每一个整距线圈的基波电势, 前面已经分析过了。现在是空间分布的三个整距线圈, 就每一个整距线圈来说, 显然它们的基波电势有效值彼此一样大, 但是三个线圈已经分布开, 当然它们在切割同一磁感应线时, 就有先有后。也就是说, 三个分布线圈的基波感应电势在时间相位上彼此不同相了。图 4-8(c) 所示是在这种情况下三个整距线圈基波电势的向量图。三个整距线圈基波电势之间彼此相差  $\alpha$  时间电角度。由三个分布的整距线圈组成的线圈组基波电势向量用  $\dot{E}_{q1}$  表示, 为

$$\dot{E}_{q1} = \dot{E}_{y1} + \dot{E}_{y2} + \dot{E}_{y3}$$

图 4-8(d) 画出了  $\dot{E}_{y1}$ 、 $\dot{E}_{y2}$ 、 $\dot{E}_{y3}$  及总电势  $\dot{E}_{q1}$  的向量。为了更一般起见, 下面我们认为不止是三个整距线圈的分布问题, 而是有  $q$  个整距线圈在定子上依次分布。根据几何学, 作出它们的外接圆, 如图 4-8(d) 所示。设外接圆的半径为  $R$ , 则

$$E_{y1} = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

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

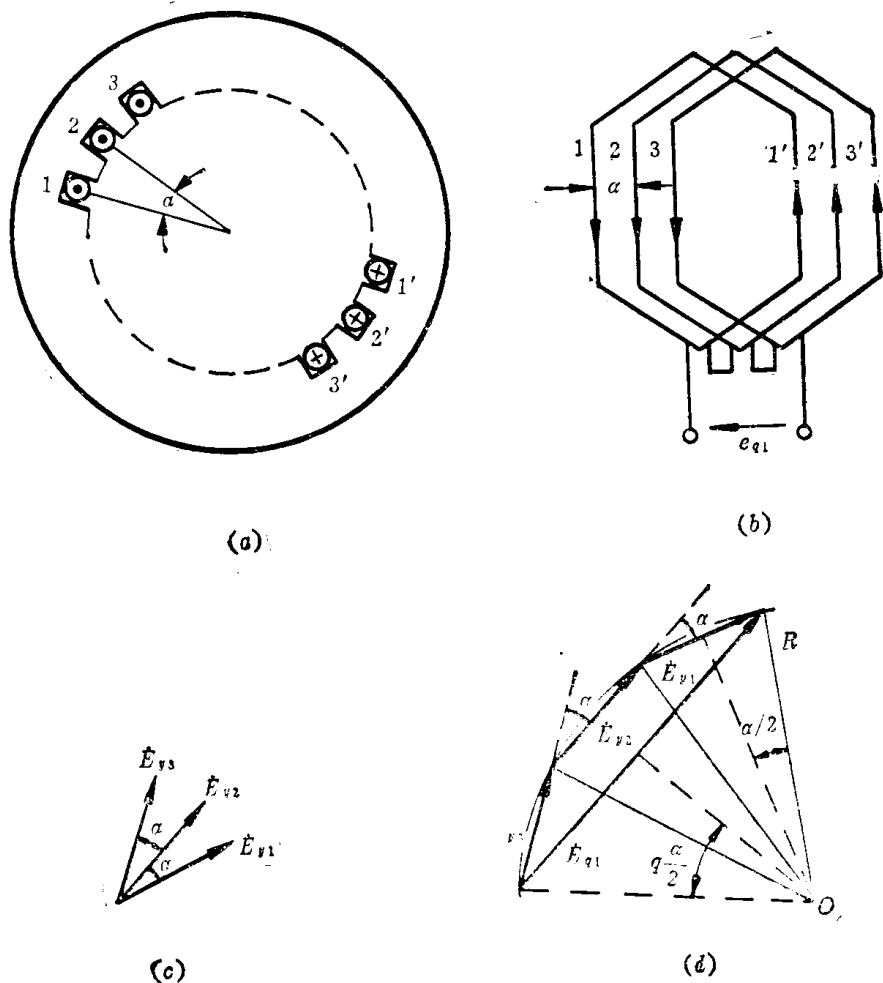


图 4-8 分布线圈组基波电势

如果把这些分布的  $q$  个整距线圈都集中起来放在一起, 每个线圈的基波电势大小相等, 相位相同, 则线圈组总基波电势为  $qE_{y1}$ 。但是分布开来后, 线圈组基波电势有效值却为  $E_{q1}$ 。用  $qE_{y1}$  去除  $E_{q1}$  得

$$\frac{E_{q1}}{qE_{y1}} = \frac{2R \sin q \frac{\alpha}{2}}{2qR \sin \frac{\alpha}{2}}$$

于是

$$E_{q1} = qE_{y1} \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = qE_{y1} k_{q1}$$

式中  $k_{q1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$  叫基波分布系数,

分布系数  $k_{q1}$  是一个小于 1 的数。它的意义是, 由于各线圈是分布的, 线圈组的总基波电势

就比把各线圈都集中在一起的基波电势要小。从数学上看,就是把集中在一起的线圈组基波电势乘上一个小于1的分布系数,那么就与分布的线圈组实际基波电势相等。

也可以这样认为,从感应基波电势有效值的大小上看,可以把实际上有 $q$ 个整距线圈分布的情况,看成是都集中在一起,但是这个集中在一起的线圈组总匝数不是 $qW_y$ ,而是等效匝数 $qW_y k_{q1}$ 。不管怎样看,分布后线圈组的总基波电势仍为

$$E_{q1} = 4.44 f_1 q W_y k_{q1} \Phi_1$$

如果各个分布的线圈本身又都是短距线圈,这时线圈组感应基波电势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{q1} &= 4.44 f_1 q W_y k_{y1} k_{q1} \Phi_1 \\ &= 4.44 f_1 q W_y k_{w1} \Phi_1 \end{aligned}$$

式中 $k_{w1} = k_{y1} k_{q1}$ 叫基波绕组系数。当然基波绕组系数也是一个小于1的数。

**思考题 4-8** 基波分布系数的物理意义是什么?

**例题 4-3** 一台电机,在它的定子槽里放了四个分布着的整距线圈,相邻线圈的槽距角 $\alpha = 15^\circ$ 空间电角度,每个线圈基波感应电势的有效值为30伏。现将这些空间分布着的整距线圈按头尾相连构成线圈组,求该线圈组的基波感应电势有效值是多少?

**解** 用画向量图的办法求解。图4-9是空间分布的4个整距线圈基波感应电势向量图(不必画出 $j$ 轴)。把这4根向量按向量相加的方法加起来,就是线圈组的基波感应电势。可以从向量的长短量出线圈组基波感应电势的有效值为115伏。

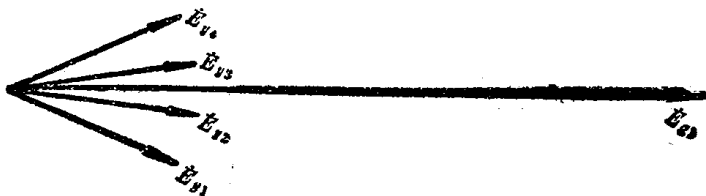


图 4-9 4个整距线圈在空间分布的基波电势向量

用计算的方法求解。已知是4个整距线圈在空间上分布,所以 $q=4$ 。另外 $\alpha=15^\circ$ ,于是可以算出基波分布系数 $k_{q1}$ 。

$$k_{q1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 4 \times \frac{15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0.96$$

如果4个整距线圈都集中在一起,线圈组基波感应电势有效值为 $4 \times 30 = 120$ 伏。现在是分布,则线圈组基波感应电势有效值为

$$4 \times 30 k_{q1} = 120 \times 0.96 = 115.2 \text{ 伏}$$

## 二、三相单层绕组的安排

### 1. 三相单层集中整距绕组的安排

前面已经介绍了交流绕组的基波电势,在下一节还要介绍绕组流过交流电流产生的磁势。但是在交流电机里,不管是发电机还是电动机,在同一个交流绕组里(也叫电枢绕组),既有感应电势的问题,又有电流产生磁势的问题。为了简单,下面我们在安排电枢绕组时,从发电机的角度

看,即要求三相绕组能够发出三相对称的基波感应电势。或者说,从能够发出三相对称基波电势出发,如何安排三相绕组。如果安排好了电枢绕组,当把它接到三相对称交流电源后,就可以使电机作为电动机运行。换句话说,三相交流发电机和三相交流电动机,就他们的电枢绕组来说,完全一样,没有什么特殊之处。但是对初学者,按照交流发电机状态来安排电枢绕组,显得要容易些。

在安排电枢绕组之前,有一个很重要的概念还要再强调一下,那就是,在电机电枢表面上相距 $\alpha$ 空间电角度的两根导体也好,或者两个线圈也好,它们感应的基波电势在时间相位上,也必然相差 $\alpha$ 时间电角度。

下面就来安排一个最简单的三相单层集中整距绕组。

已知三相绕组能感应三相对称的基波电势,这个对称的基波电势用向量表示如图4-10(a)所示。图中A相电势 $\dot{E}_{A1}$ 领先B相电势 $\dot{E}_{B1}$ 120°时间电角度。 $\dot{E}_{B1}$ 又领先 $\dot{E}_{C1}$ 120°时间电角度,他们的有效值彼此相等。

我们把图4-5中的那个整距线圈当作这里的A相绕组,由于是三相,B相和C相还得再安排两个同样匝数的整距绕组,好让它们的基波电势有效值相等。既然三相电势之间的相位彼此相差120°时间电角度,那么就把三个整距线圈在定子内表面空间按120°空间电角度分布开就行了。根据图中转子的转向,把B相的线圈放在A相线圈前面120°空间电角度的地方,C相放在A相线圈后面120°的地方,如图4-10(b)所示。这样就能得到三相对称绕组。所谓三相对称绕组,指的是各相绕组在串联匝数以及联法上都相同,只是在空间的位置,彼此互相错开120°空间电角度。注意,图4-10各线圈中的 $\oplus$ 、 $\odot$ 表示感应电势的正方向。

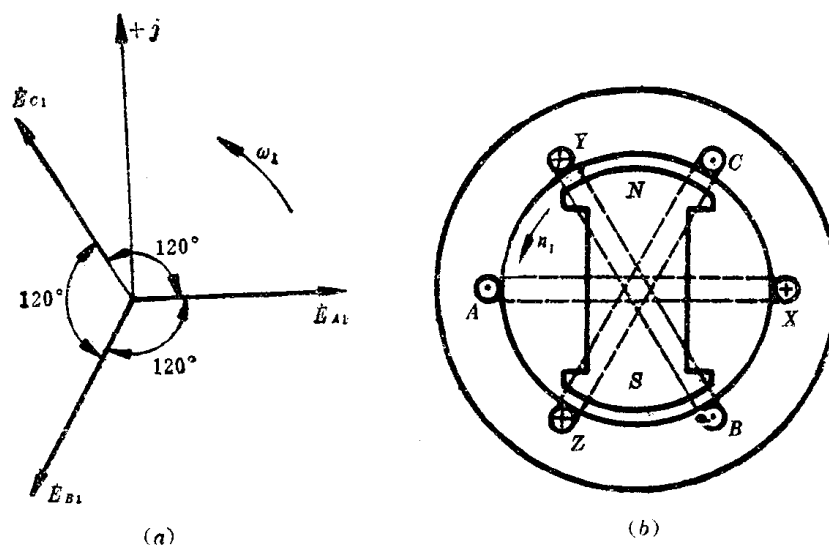


图4-10 三相对称绕组产生的三相对称基波电势

图4-10是最简单的三相对称绕组,每相只有一个整距线圈,两根引出线,三相总共六根引出线,如A、X; B、Y; C、Z。根据需要可以把三相绕组接成Y形[如图4-11(a)]或 $\Delta$ 形[如图4-11(b)]。

在电路分析课里已经学过,两种接法的绕组,其基波线、相电势(电压)以及线、相电流之间的关系为

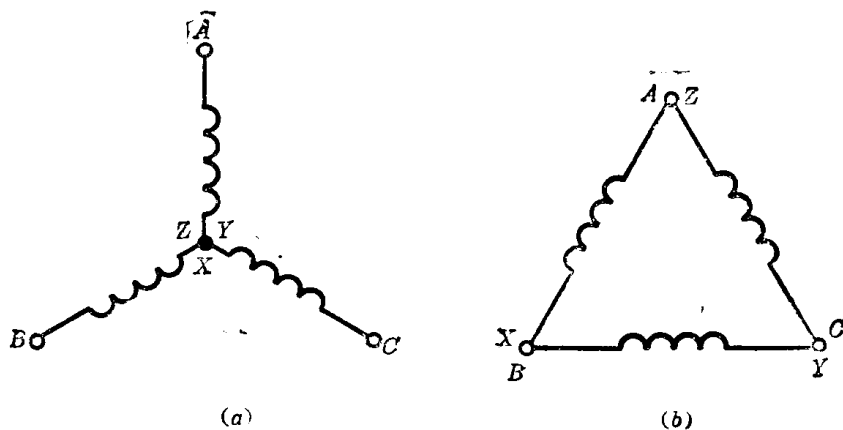


图 4-11 三相电枢绕组的连接方法

(1) Y 接绕组

$$\text{线电流} = \text{相电流}$$

$$\text{线电势(线电压)} = \sqrt{3} \text{相电势(相电压)}$$

(2) Δ接绕组

$$\text{线电流} = \sqrt{3} \text{相电流}$$

$$\text{线电势(线电压)} = \text{相电势(相电压)}$$

这些简单的关系应牢记才行。

上面介绍的这种三相绕组，由于每相只有一个集中整距线圈。定子上每个槽里只放了一个圈边，又叫三相集中单层整距绕组。

这种绕组除了感应电势波形不好外，电枢表面的空间也没有充分利用，不如采用分布绕组好。

**思考题4-9** 已知三相对称绕组为Y接法，试说明它的相电流与线电流有效值、相电势与线电势有效值之间的关系？

**思考题4-10** 已知三相对称绕组为Δ接法，试说明它的相电流与线电流有效值、相电势与线电势有效值之间的关系。

2. 三相单层分布绕组的安排

为了清楚起见，我们通过一个具体例子来说明如何安排三相单层分布绕组。

已知一台电机，如图 4-12所示，定子上总槽数  $Z_1=24$ ，极对数  $p=2$ ，转子逆时针方向旋转，转速为  $n_1$  转/分，试连接成三相单层分布绕组。

分析的步骤如下：

第一步，先计算定子相邻两槽之间的槽距角  $\alpha$ 。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ \quad \text{空间电角度}$$

第二步，画基波电势星形向量图。

先假设电机定子每个槽里只放了一根导体，并规定导体感应基波电势的正方向出纸面为正。

当转子磁极转到图 4-12 所示瞬间，第 24 槽里的导体正处在N极的正中心，基波感应电势为

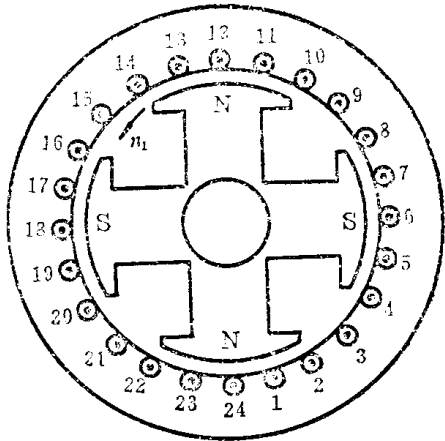


图 4-12  $p=2, Z_1=24$  的电机

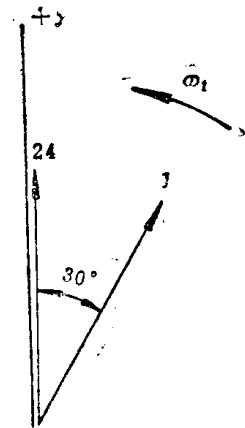


图 4-13 导体 24 与导体 1 的基波电势

正最大值,用向量表示时,如图 4-13 所示。当转子磁极随时间转过了  $30^\circ$  空间电角度时,那时候第 1 槽里的导体正处在 N 极的正中心,基波感应电势达正最大值。由于第 24 槽里的导体基波电势和第 1 槽里导体基波电势的相位角与槽距角相等,所以画图的瞬间,第一槽里的导体基波电势滞后于第 24 槽里的导体基波电势  $30^\circ$  时间电角度。同样可以把这 24 个槽里的导体基波感应电势的向量都画出来,如图 4-14 所示。图 4-14 叫做基波电势星形向量图。当我们只需要研究各向量之间的相对关系时,时间参考轴  $+j$  也没有必要再标出了。

第三步,按  $60^\circ$  相带法分相。

根据基波电势星形向量图,把有关槽里的导体分配到三个相里去,从而连接成三相对称绕组。

把图 4-14 的基波电势星形向量图分成六等份,每一等份为  $60^\circ$  时间电角度。根据时间电角度等于空间电角度的概念,这  $60^\circ$  时间电角度内的向量对应着定子  $60^\circ$  空间电角度范围内的槽,这些槽在定子内表面上所占的地带叫相带。这种分法叫  $60^\circ$  相带法(每个磁极的范围是  $180^\circ$  空间电角度,  $60^\circ$  相带的意思是每相在每个磁极下占  $1/3$  空间地带,即  $60^\circ$  空间电角度)。图 4-14 中每  $60^\circ$  相带中有两个槽导体,用每相在每极下的槽数  $q$  表示。 $q$  的计算方法为

$$q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{24}{2 \times 3 \times 2} = 2$$

式中  $m$  是相数(等于 3)。在基波电势星形向量图上逆向量旋转的方向标上 A、Z、B、X、C、Y。显然 A、X 相带里的槽都属于 A 相, B、Y 相带里的槽属于 B 相, C、Z 相带里的槽属于 C 相。

第四步,画绕组的连接图。

把图 4-12 沿轴向剖开,并展成一个平面,磁极在定子槽的上面,没有画出来,如图 4-15 所示。图中等长等距的直线代表定子槽,一共有 24 根,代表 24 个槽。从基波电势星形向量图中看

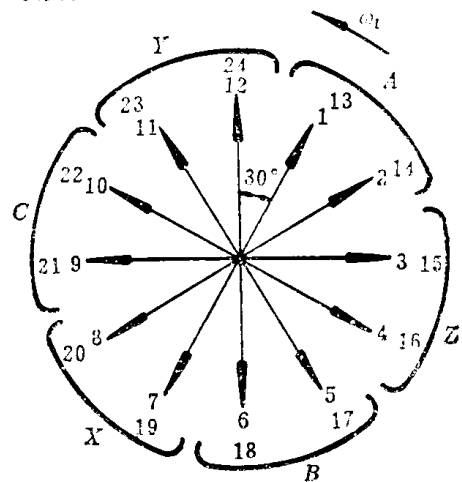


图 4-14  $p=2, Z_1=24$  电机的基波电势星形向量图



出,1、2槽和13、14槽属于A相带;7、8槽和19、20槽属于X相带,A与X相带之间相距 $180^\circ$ 空间电角度。我们可以把属于A相带的1槽和属于X相带的7槽连接成整距线圈。同样把2槽和8槽连接成另外一个整距线圈。由于这两个线圈都是属于A相的(X相带也属于A相,只是基波感应电势的相位与A相带相差 $180^\circ$ 时间电角度),可以把它们互相串联起来。这就是前面介绍过的分布的线圈组,它们的引出线为 $A_1X_1$ 。同样由13槽和19槽,14槽和20槽两个线圈组成的线圈组,它们的引出线为 $A_2X_2$ 。

#### 第五步,确定绕组并联的路数

根据要求,如果要求为一串绕组,则把 $X_1$ 与 $A_2$ 相连即可(如图4-15中的实线);如果要求两路并联绕组,把 $A_1$ 和 $A_2$ 连接, $X_1$ 和 $X_2$ 连接即可,如图4-15中虚线所示。

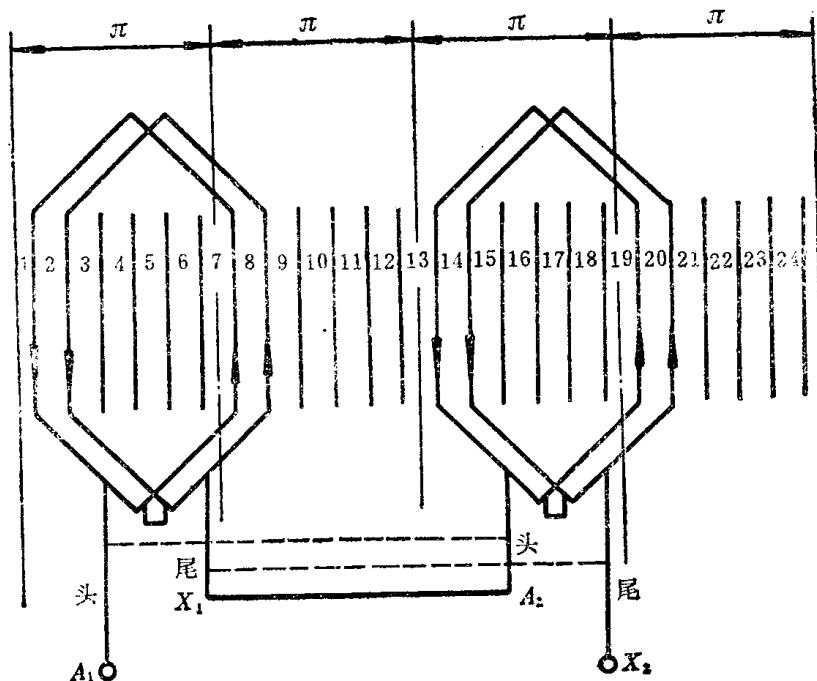


图4-15 单层绕组的连接图

单层绕组最多可并联的支路有 $p$ ( $p$ 为极对数)个。

当电机每相的总线圈数一定时,如用一路串联,则每相的基波感应电势要比并联时的大,而电流却比并联时的总电流要小。

关于B相、C相绕组的连接法和A相连接法完全一样,在图中没有画出。但是从图4-14的基波电势星形向量图可以看出,B相、C相绕组基波感应电势,就大小来说与A相的一样(因为每相包含的槽数相等),在相位上,三个相绕组产生的电势却互差 $120^\circ$ 时间电角度。B相滞后A相,C相滞后B相。

从图4-15还可看出,三相单层绕组的线圈数等于总槽数的一半。

#### 第六步,计算相电势有效值。

图4-15中每对极下属于一相的线圈组,它们的基波感应电势大小都一样,以A相为例为

$$E_{A_1X_1} = E_{A_2X_2} = qE_y k_{q_1} = 4.44 f_1 q W_y k_{q_1} \Phi_1$$