

电 工 基 础

中 册

俞 大 光 編

高 等 教 育 出 版 社



电 工 基 础
中 册

俞 大 光 編

高 等 教 育 出 版 社

本书系由原高等教育部組織俞大光同志編写的，作为高等工业学校的試用教材。

本书分上、中、下三册出版，上、中两册論述电路与磁路原理，下册論述电磁場原理。計划每学期講授一册。中册包括第五章至第十章，即：第五章，三相电路；第六章，非綫性电阻电路；第七章，磁路；第八章，含有非綫性电感及电容的周期电流电路；第九章，电路中的过渡过程以及第十章，分布参数电路。

本书适用于高等学校电工类专业。

电 工 基 础

中 册

俞 大 光 編

高等教育出版社出版 北京宣武門內大街27号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第054号)

中国人民大学印刷厂印裝 新华書店发行

統一書号 15019-798 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 10 $\frac{13}{16}$

字數 257,000 印數 0001—8,500 定价 (7) 半 1.50

1959年8月第1版 1959年8月北京第1次印刷

序 言

自本书上册出版以来，迄今已将近一年。在这一年的过程中我国高等教育普遍进行了重大的改革。为了贯彻党的教育方针，生产劳动已列为教育计划的一部分。学生参加生产劳动，尤其是参加了专业性的劳动以后，丰富了感性知识，使理论与实际紧密地结合起来，从而大大地提高了学习的质量。然而，与此同时，新的形势也就给理论教学提出了新的任务，即要求根据学生参加专业劳动的特点来重新安排理论教学，要求修订教学大纲，要求基础课与技术基础课结合专业需要等。

这本书还不能满足这些要求，还只是按照一年前已写好的书稿修改而成。一方面由于考虑到有些学校教学上的迫切需要；另一方面也因为教学内容、教学大纲到底应如何修改尚无定论，因此只有基本按照原样先行出版，俟各方面讨论比较成熟以后再行着手修订。

本册已将第一编“电路与磁路原理”作了结束，所采用的体系是先阐述集总参数电路，后研究分布参数电路，其中每部分又都是先讲稳定过程，后论过渡过程，其中每部分又都是先叙线性电路，后述非线性电路。作者认为这样的体系是贯彻了先易后难、由浅入深的原则的。

磁路与非线性电路很相似，同时又作为有铁心的电路的基础，因此作者把这几部分内容连贯在一起（第六、七、八各章），意图是使读者能够抓住这几部分内容间的联系。

本书和上册一样，希望在讲解方面尽量照顾到目前我国学生水平，能作为学生课外的主要读物。但由于作者能力有限，恐未必

能取得預期效果，尚希讀者不吝指正。

本書初稿仍承北京鐵道學院黃宏嘉同志仔細評閱，及哈爾濱工業大學電工教研室講授電工基礎課程的全體教師認真討論，兩者均提供了許多寶貴意見，作者謹致以衷心的謝意。

俞大光 1959 年 6 月

中 册 目 录

第五章 三相电路	231
§ 73 三相电势的产生	231
§ 74 三相制的联接法, 星形接法	235
§ 75 三角形接法	237
§ 76 三相正弦电流电路中的功率	241
§ 77 三相电路的一般性质	243
§ 78 对称三相正弦电流电路的计算	247
§ 79 三相输电线路	254
§ 80 有互感的对称三相电路	253
§ 81 不对称的三相电路的计算	260
§ 82 中性点的位移, 相序的测定	264
§ 83 旋转磁势	267
§ 84 对称分量法	274
§ 85 不对称三相量分解为对称分量	273
§ 86 求对称分量的图解方法	277
§ 87 三相电路中电压电流各序分量的性质	277
§ 88 在不对称电压作用下的对称三相电路	282
§ 89 具有对称旋转电机的不对称三相电路	287
§ 90 三相制中的高次谐波	292
第六章 非线性电阻电路	298
§ 91 非线性电阻元件	298
§ 92 非线性简单直流电路的图解算法	301
§ 93 有源支路串并联的非线性直流电路的图解算法	306
§ 94 计算非线性直流电路的猜试法	308
§ 95 非线性直流电路的解析法	311
§ 96 线性网路理论在计算非线性直流电路方面的应用	315
§ 97 非线性直流电路工作状态稳定的概念	318
§ 98 只含有电阻元件的非线性交流电路	322
第七章 磁路	327
§ 99 磁通与磁路	327
§ 100 铁磁物质的磁化	330

§ 101	磁路诸定律及磁路的特点	334
§ 102	恒定磁通无分支磁路的计算	339
§ 103	恒定磁通分支磁路的计算	345
§ 104	永久磁铁	348
§ 105	交变磁通的磁路中铁磁饱和对磁通与电流波形间的畸变作用	351
§ 106	交变磁化的功率	353
§ 107	磁滞对电流或磁通波形的影响及磁滞损失	256
§ 108	涡流的影响及涡流损失	360
§ 109	等值正弦波及其在交变磁通磁路中的应用	366
§ 110	交变磁通磁路的定律及其应用	370
第八章	含有非线性电感及电容的周期电流电路	373
§ 111	铁心线圈电路	373
§ 112	铁心变压器	379
§ 113	铁磁谐振电路	387
§ 114	具有直流基磁化的铁心线圈	392
§ 115	铁磁功率控制器	396
§ 116	铁磁二倍频率器	397
§ 117	含有铁心线圈的对称三相电路、铁磁三倍频率器	398
§ 118	非线性电容器及其电路	400
第九章	电路中的过渡过程	403
§ 119	过渡过程的产生及换路定律	403
§ 120	电路的微分方程式及其解法, 自由分量与强制分量	406
§ 121	电阻、电感串联电路中的过渡过程	411
§ 122	电阻、电容串联电路中的过渡过程	420
§ 123	电阻、电感、电容串联电路中的过渡过程——非振荡情形	427
§ 124	电阻、电感、电容串联电路中的过渡过程——临界非振荡情形	436
§ 125	电阻、电感、电容串联电路中的过渡过程——振荡情形	437
§ 126	多回路电路中的过渡过程	444
§ 127	算子法的数学基础	450
§ 128	欧姆定律及克希荷夫定律的算子形式	454
§ 129	用算子法计算过渡过程	456
§ 130	过渡过程化归为零原始条件的算法	463
§ 131	傅立叶积分及其在计算过渡过程中的应用	467
§ 132	电路与任意波形电压的接通	470
§ 133	非线性电路过渡过程的计算方法	474
§ 134	铁心线圈电路中的过渡过程	476
§ 135	线性电容与非线性电阻串联电路中的过渡过程	479

§ 136 重复性的过渡过程	482
第十章 分布参数电路	488
§ 137 电路参数的分布性及分布参数电路	488
§ 138 均匀线方程式	491
§ 139 均匀线在正弦电压作用下的稳定过程	493
§ 140 均匀线方程式解答的性质	497
§ 141 表示均匀线特性的各物理量	501
§ 142 波的反射和无反射线路	504
§ 143 均匀线的开路及短路工作状态	507
§ 144 均匀线与四端网路	511
§ 145 对称四端网路的传输系数与特性阻抗	516
§ 146 键形电路	519
§ 147 无畸变线	522
§ 148 无损失线	525
§ 149 无损失均匀线方程式的一般解	531
§ 150 线路接通时波的发出	535
§ 151 线路扳断时波的发出	539
§ 152 计算线路换路时的发出波的一般方法	540
§ 153 杂散波	543
§ 154 计算无损失线反射波和透射波的一般方法	545
§ 155 多次反射	551
索引	558

第五章 三相电路

§ 73 三相电势的产生

交流电在动力方面的应用，几乎全部是属于所谓三相制。这是由于三相制无论在发电或输电方面以及在转换为机械动力方面都具有优点，所以自从 1888 年俄罗斯学者多里沃多布罗夫斯基创始三相制以来，三线制就一直占据着几乎是动力系统的全部领域。

所谓三相制就是由三个频率相同但相位不同的电势的电源供电的体系，这些电源称为三相电源，通常都是三相发电机。而象这样的频率相同但相位不同的三个电势联合在一起就称为三相电势。让我们先来了解一下三相发电机中是如何产生三相电势的。

在三相发电机中布在电枢表面的导线划分成三组。每组中的各导线彼此联接起来，称为一相绕组。例如图 73-1 的发电机电枢上共有 12 根导线，分为三相绕组。第一相绕组中有导线 A, A_1, A_2, X 。导线 A 通过电枢后面的联接线（图中虚线所示）与 A_1 相联成为一个线圈，而 A_2 则与 X 相联成一个线圈。由于线圈 AA_1 与线圈 A_2X 所处的位置是相似的，只不过 AA_1 是处在第一对磁极 N_1S_1 之下，而 A_2X 则是处在第二对磁极 N_2S_2 之下，而感应电势则是时刻都能彼此相等的，即同相位。所以用导线 A_1A_2 （图中实线所示）将这两个线圈联

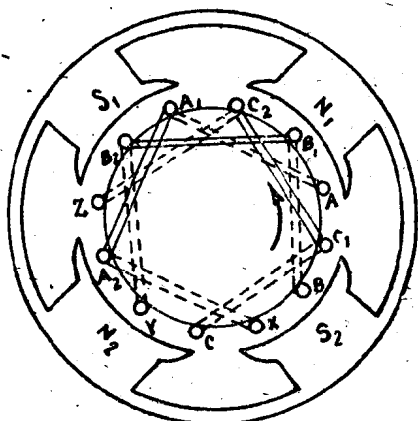


图 73-1

是处在第二对磁极 N_2S_2 之下，而感应电势则是时刻都能彼此相等的，即同相位。所以用导线 A_1A_2 （图中实线所示）将这两个线圈联

在一起,得到的电势 e_{AX} 恰为电势 e_{AA_1} 的二倍。

第二相繞組中导綫 B, B_1, B_2, Y 同样地联接起来,得到的电势 e_{BY} 显然与电势 e_{AX} 具有同样的频率及波形,但在相位上滞后一个时间。根据图 73-1 电机的构造,由于每轉过一对磁极电势的变化就完成一个周期,所以 e_{BY} 滞后于 $e_{AX} \frac{1}{3}$ 周期。

同样,第三相繞組中导綫 C, C_1, C_2, Z 联接后所得到的电势 e_{CZ} 也具有同样的频率和波形,但在相位上又滞后于 e_{BY} 。对图 72-1 电机的构造来说这滞后的时间也是 $\frac{1}{3}$ 周期。

用式子来表示三相繞組中所产生的电势为:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= f(t) = f\left(t + kT\right) \quad (k = \text{任意整数}) \\ e_B &= f\left(t - \frac{T}{3}\right) \\ e_C &= f\left(t - \frac{2}{3}T\right) \end{aligned} \right\} \quad (73-1)$$

这样三个频率相同的电势联合在一起就組成三相电势,而图 73-1 中的发电机也就是三相发电机。各相繞組中所产生的电势称为相电势,如(73-1)式中的 e_A, e_B 及 e_C 各为 A 相、 B 相及 C 相的相电势。从越前相到滞后相的輪換次序称为相序,此处三相电势的相序为 $A-B-C$ (或 $B-C-A, C-A-B$ 均可)。

如果三个相电势在相位上彼此相差 $\frac{1}{3}$ 周期,則称为对称相电势。一般发电机由于結構上的对称,相电势总是对称的。

如果电势为时间的正弦函数,則得到正弦三相电势。对称正弦三相电势可写为

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi) \\ e_B &= E_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2}{3}\pi\right) \\ e_C &= E_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (73-2)$$

这个三相正弦电势如果用复数表示则为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \epsilon^{j\psi} \\ \dot{E}_B &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \epsilon^{j(\psi - \frac{2}{3}\pi)} = a^2 \dot{E}_A, \\ \dot{E}_C &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \epsilon^{j(\psi - \frac{4}{3}\pi)} = a \dot{E}_A, \end{aligned} \right\} \quad (73-3)$$

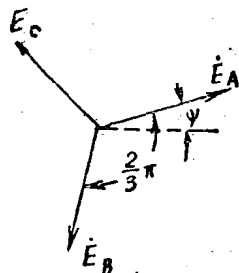


图 73-2

式中

$$a = \epsilon^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (73-4)$$

为一旋转因子, 相当于逆时针方向旋转 120° 角, 而

$$a^2 = \epsilon^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (73-5)$$

则为顺时针方向旋转 120° 的旋转因子。 a 与 a^2 与 1 是 1 的三个立方根, 因为

$$a^3 = (\epsilon^{j\frac{2}{3}\pi})^3 = \epsilon^{j2\pi} = 1, \quad (a^2)^3 = \epsilon^{j4\pi} = 1.$$

图 73-2 为对称正弦三相电势的向量图。

一般三相发电机所产生的电势, 在正常情形下都可认为是对称正弦三相电势。

有了三相发电机以后, 我们就把只产生一个电势的交流发电机称为单相发电机或单相电源。由单相电源供电的体系则称为单相制。

单相制中的负载, 都是具有两个出线头的二端网络, 这称为单相负载。在三相制中的负载, 一般则都是所谓三相负载, 这种负载也同样是由三个部分电路组成, 称为负载的相, 例如三相电动机的内部电路则几乎与三相发电机的内部电路无异, 这就是三相负载。但也常常见到由三个单相负载(例如电灯负载)各作一相组合而成的三相负载。此外在三相制中也还可能有一些个别未组合的单相

負載。

这样,由許多三相电源、三相負載及联接这些电源与負載的導綫所組成的电路就称为三相电路。三相电路實質上是复杂电路的一种特殊类型。由于在三相电路中有各个三相电源在作用,在电路的各部分中将得到各組电压与电流,它們各由三个頻率相同但相位不同的电压或电流組成,称之为三相电压或三相电流。

单相制的电路相应地也就称为单相电路,其中的电势、电压及电流也就分别称为单相电势、单相电压及单相电流。

采用三相制以后能够提高发电机的出力。如图 73-1 的发电机要改为单相,則势必將几根導綫全部串联起来。由于串联以后电势的合成是按照向量合成的,故其总和的有效值显然会比发电机作三相联接时相电势有效值的三倍为小,这也就意味着并没有充分有效地利用电樞表面的空間以及所敷設的導綫。因此单相发电机的出力恒較同尺寸的三相发电机为小。这就是三相制在发电方面的优越性質。

发电机电樞上所布的導綫也可以任意划分为若干个繞組,因此在理論上可以制造出任意相数的发电机,产生二相、三相、四相……电势,这些电势統称为多相电势,其所相应的体系称为多相制。

多相制固然有許多优点,然而相数太多則增加了結構上的复杂性而且經濟上的获益有限,因此电力工程中广泛应用的仍是三相制。其他种多相制只在特殊情况下才会遇到。

对称 m 相正弦电势中包含 m 个大小相等的正弦电势,其中相邻的两个电势具有 $\frac{2\pi}{m}$ 的相位差。例如对称六相电势中相邻两电势的相位差为 60° 。

二相制是一种例外。因若按上面規律去推,对称二相正弦电势中的两个电势具有的相位差将会是 180° ,这样,如果换取一个

电势的正方向就会得到两个同相位的电势。这种二相电势没有什么实际意义。因此规定“对称”二相正弦电势中两个电势间的相位差不是 180° 而是 90° , 即形成相位直交。因此说二相制不是一种对称制。此处所述的“对称”二相制有时称为半四相制。

二相电流将在电气测量仪表中遇到。六相、十二相电流则在一些特殊设备(例如旋转变流机, 整流用变压器等)中有所应用。

§ 74 三相制的联接法, 星形接法

一个三相电源(三相发电机)相当于三个电源。如果分别利用这三个电源, 即将图 73-1 三相发电机的三个绕组 AX, BY, CZ 各经过两个装在电机轴上的滑动环引出两根导线连接到负载, 如图 74-1 所示(图中滑环未画出), 则称为不联接的三相制。这种方式要求从发电机引出六根导线到负载, 不但结构复杂, 而且不经济。因此一般很少采用。

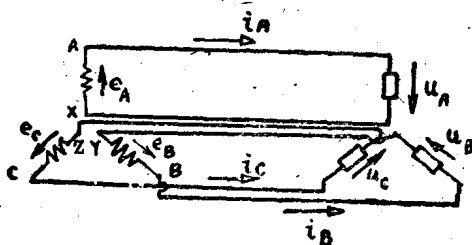


图 74-1

如果发电机产生的电势是对称正弦三相电势, 如 (73-2) 式所示, 而且各相的负载又具有相同的参数, 即在所谓负载对称的情形下, 则各相电流也必然成为一组正弦对称系统, 即各电流 i_A, i_B, i_C 振幅相等而相位互差 120° , 即

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi), \\ i_B &= I_m \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right), \\ i_C &= I_m \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right). \end{aligned} \right\} \quad (74-1)$$

如果将三个相的回路合并起来, 如图 74-2 所示, 则成为星形

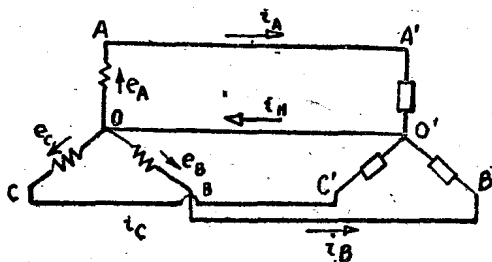


图 74-2

联接。图中的发电机与负载都是联接成星形。所谓发电机联接成星形就是将三个绕组的末端联在一起(也可将首端联在一起而末端不联在一起,但不能使某些绕组的首端和另外绕组的末端相联)。这个联接点称为中性点, 如 O 点。而起端则引线出去。这些从首端引出的导线称为端线(火线), 从中性点引出的导线则称为中线。中线是三个相的公共电流回路, 其中流过中线电流

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (74-2)$$

这种体系中联接电源与负载之间的导线共有四根, 故称为三相四线制。

如果电流 i_A, i_B, i_C 是一组正弦对称三相电流, 即它们符合 (74-1) 式的关系, 则它们的和恒等于零(可作向量图证明)。因此根据 (74-2) 式可知中线上将没有电流流过, 即

$$i_N = 0. \quad (74-3)$$

既然在这种情况下中线不负担任何电流, 就可以完全去掉它

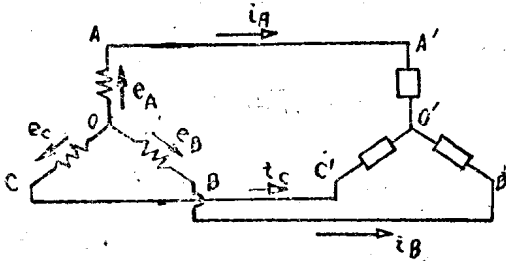


图 74-3

而成为三相三线制, 如图 74-3 所示。

实际情形下由于存在着由单相负载组成的三相负载, 这种负载常常不是对称的, 而 (74-3) 式的条件就未必能够得到满足。但在一般正常的运行状态下, 总是尽量使负载接近对称, 所以中线的电流也不会很大, 同样地可以不要中线而采用三相三线制。不过必须指出: 在这种情形下接上中线与不接中线工作状态是有所不同的。

我们把端线(火线)上的电流称为线电流, 而把引出线之间的电压称为线电压。发电机每相的电压, 例如 u_{AO} , 称为发电机的相电压, 而负载每相的电压, 例如 $u_{A'O'}$ 则称为负载的相电压。发电机内每相的电流, 例如 i_{OA} , 称为发电机的相电流, 而负载每相的电流, 例如 $i_{A'O'}$, 则称为负载的相电流。

在星形联接中, 不论有无中线存在, 相电流恒等于线电流, 但线电压则等于两个相电压的差, 即

$$\left. \begin{aligned} u_{AB} &= u_{AO} - u_{BO}, \\ u_{BC} &= u_{BO} - u_{CO}, \\ u_{CA} &= u_{CO} - u_{AO}. \end{aligned} \right\} \quad (74-4)$$

在相电压是对称的情形下, 各相电压的有效值都相等, 可用 U_ϕ 表示, 这时各个线电压的有效值也都相等, 可用 U_λ 表示。又

若电压的波形是正弦波，则可通过位形图来求出相电压与线电压的大小及相位关系。图 74-4 中画出了图 74-2 或图 74-3 内发电

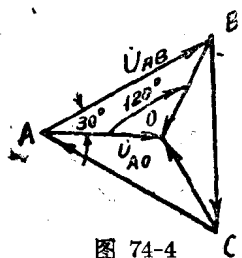


图 74-4

机部分的位形图，由于相电压 $\dot{U}_{AO}$, $\dot{U}_{BO}$, $\dot{U}_{CO}$ 是对称的，因此在位形图上形成一个正三角形 ABC ，故得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \sqrt{3} \dot{U}_{AO} \angle 30^\circ, \\ \dot{U}_{BC} &= \sqrt{3} \dot{U}_{BO} \angle 30^\circ, \\ \dot{U}_{CA} &= \sqrt{3} \dot{U}_{CO} \angle 30^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (74-5)$$

负载方面的情形也完全相同。就是说：在星形联接中，当正弦相电压为对称时，则线电压在数值上为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍：

$$U_A = \sqrt{3} U_\phi, \quad (74-6)$$

而在相位上超前于先行相（例如对 AB 间线电压而言先行相即为 A 相）相电压 30° 。

在对称的情形下各相电流的有效值也都相等，可用 I_ϕ 表示；各线电流的有效值也都相等，可用 I_A 表示。在星形联接中相电流就是线电流：

$$I_A = I_\phi \quad (74-7)$$

如果相电压不对称，则不论线电压是否对称都不能应用 (74-5) 或 (74-6) 式的关系。这时若电压波形为正弦波，则可按相电压的向量差用图形或复数来计算线电压，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{BO}, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{CO}, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{AO}. \end{aligned} \right\} \quad (74-8)$$

不论从 (74-4) 或 (74-8) 式均可看出，不论有无中线的存在，也不论各线电压是否对称，它们的和应恒等于零，这是克希荷夫第二定律的直接结果；

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BO} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (74-9)$$

§ 75 三角形接法

图 75-1 所示的不联接三相制中, 若将每相邻两相所引出的导

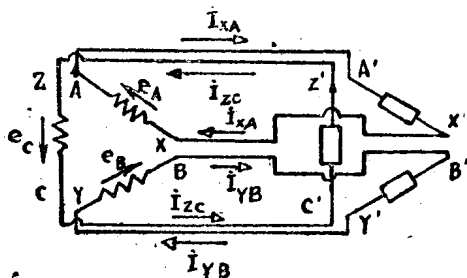


图 75-1

线两两合并, 如图 75-2 所示, 则形成三角形联接, 即发电机与负载都接成了三角形。

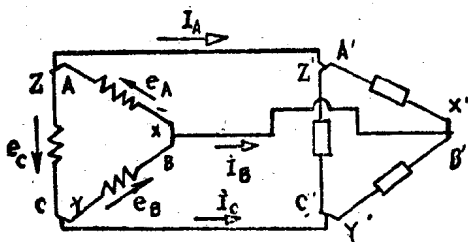


图 75-2

然而, 要将发电机接成三角形必须具备一个条件, 即在所成三角形回路中的回路电势必须等于零, 这样才能保证在没有负载(即外端开路)的情形下发电机内部不致有循环电流。由于发电机绕组对基波频率的等值阻抗极小, 即令在很小的回路电势下也会产生很大的电流, 有烧毁电机的危险。由于一般发电机所产生的电势, 大半可认为是对称正弦三相电势, 如果将每一相绕组的起端与相邻相绕组的末端相联接, 例如 A 接 Z, B 接 X, C 接 Y, 如图 75-