

上海市工人业余学校课本

电 工

第 二 册

上海人民出版社

内 容 提 要

《电工》教材共分四册,由华东电业管理局为主,上海市机电一局、机电二局、纺织局配合,抽调人员组成编写组进行编写。本书为第二册,书中首先介绍三相交流电路知识,接着叙述了磁电式仪表、电磁式仪表、电动式仪表和感应式仪表的结构和原理,并着重阐述了电流、电压、电阻、功率、电能等电工测量,最后介绍可控硅元件的结构、工作原理、特性、电路及它在调速、恒流恒压和作为无触点开关等方面的应用。

本书可供工人业余学校师生教学之用,亦可供具有初中毕业文化水平的电工阅读。

电 工

(第 二 册)

上海市工人业余学校教材编写组

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 9.25 字数 204,000

1976年7月第1版 1976年7月第1次印刷

统一书号: 15171·248 定价: 0.54 元



毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

目 录

第五章 三相交流电路	1
第一节 概述	1
第二节 三相交流电的产生	3
一、三相交流电的产生(3) 二、对称三相正弦交流电的波形图及矢量图(5) 三、三相交流电的相序(7)	
第三节 三相电源的联接	8
一、电源的星形联接(或叫做Y形联接)(9) 二、电源的三角形联接(或叫做△形联接)(13)	
第四节 三相负载的联接和简单对称三相电路的计算	16
一、三相负载的星形联接(17) 二、三相负载的三角形联接(21) 三、简单对称三相电路的计算(24)	
第五节 不对称三相电路的几个实例分析	28
一、照明电路(三相四线制)(28) 二、对称三相星形负载一相短路和一相开路时电压变化和中点位移(31) 三、简单相序器电路(35)	
第六节 三相电路的功率	36
第七节 功率因数的提高	42
一、为什么要提高功率因数(42) 二、怎样计算工厂的功率因数(44) 三、怎样提高功率因数(46)	
第八节 三相电路中的故障和低压电路中的熔丝选择	52
一、三相电路中的故障种类(52) 二、短路的危害及低压熔丝的选择(53) 三、断线故障(57)	
小结	58
习题	60
第六章 常用电工仪表和电工测量	63
第一节 常用电工仪表的结构和原理	64
一、磁电式仪表(64) 二、电磁式仪表(67) 三、电动式仪表(69)	

四、感应式仪表(71)	
第二节 电流和电压的测量	74
一、电流的测量(74) 二、电压的测量(81)	
第三节 功率和电能的测量	88
一、直流电路和单相交流功率测量(88) 二、三相功率的测量(90)	
三、三相无功功率的测量(93) 四、电度表的接线(93)	
第四节 电阻的测量	101
一、伏、安表法(101) 二、电桥法(108) 三、兆欧表法(113)	
第五节 万用电表的应用	120
一、概述(120) 二、使用方法(121)	
第六节 示波器在电工测量中的应用	124
一、电子示波器的基本构成与工作原理(125) 二、示波器的使用(129)	
三、基本电学量的示波测量法(134)	
第七节 数字式仪表、非电量电测法及远距离测量简介	138
一、数字式仪表(139) 二、非电量电测法(141) 三、远距离测量(142)	
小结	144
习题	146
第七章 可控硅技术	148
第一节 可控硅元件结构及其工作原理	148
第二节 可控硅元件的特性与参数	152
第三节 可控硅元件的选择、串并联及其保护	154
一、可控硅元件的选择(154) 二、可控硅元件的串并联(157)	
三、可控硅元件的保护(160)	
第四节 可控硅的主电路	164
一、单相半波可控整流电路(164) 二、单相桥式半控整流电路(168)	
三、三相半波可控整流(172) 四、三相桥式半控整流电路(175)	
五、感性负载时的可控整流电路(179) 六、常用可控整流电路性能比较(180)	
七、有源逆变(182) 八、无源逆变(200) 九、交流调压(203)	
十、直流调压(205)	
第五节 可控硅的触发电路	206
一、硅稳压管触发电路(207) 二、单相阻容移相桥触发电路(209)	

三、单结晶体管触发电路(212)	四、同步电压为正弦波的晶体管触发电路(219)	五、同步电压为锯齿波的晶体管触发电路(224)	
第六节 反馈在自动调节系统中的应用	230		
一、电压负反馈(231)	二、速度负反馈(232)	三、电流正反馈(233)	
四、电流负反馈(234)	五、电压微分负反馈(236)	六、电流截止负反馈(237)	
七、反馈信号的串联输入和并联输入(239)	八、关于各种反馈方式的选择(241)		
第七节 直流电机单相可控硅调速装置	242		
一、可控硅主电路的分析(242)	二、可控硅触发电路的分析(246)		
三、稳速调速工作过程的分析(247)	四、主电路各主要元件参数的设计计算(248)	五、调试过程(250)	六、该装置特点的分析(254)
附 录	254		
小结	256		
习题	259		
第八章 可控硅的应用	263		
第一节 可控硅无触点开关	263		
一、KJW-1 型交流可控硅开关(263)	二、KZW-1 型直流可控硅开关(265)		
第二节 KL-25 型可控硅自激恒压装置	266		
一、用途(266)	二、主要技术指标(266)	三、电路的组成(266)	
四、自动调整原理(268)	五、起励方式(269)		
第三节 单晶炉直流电机的调速	269		
一、电路的组成(269)	二、恒速及调整的工作原理(270)		
第四节 交流可控硅闪光灯	271		
第五节 可逆恒流恒压充电机	272		
一、用途(272)	二、主电路(273)	三、触发电路(275)	
第六节 可控硅直流弧焊机	277		
一、技术数据(277)	二、工作原理(277)	三、电焊机的工作过程(282)	
第七节 ZLK-1 型电磁调速异步电机可控硅调速装置	283		
一、可控硅主电路(283)	二、移相和触发电路(285)	三、调速过程(288)	
附录 各章计算习题答案	289		

第五章 三相交流电路

第一节 概 述

在生产实践中,广泛应用的交流电能基本上是由三相交流发电机产生,并且是用三相输电线来输送的。工农业生产上应用的电动机大多数也是三相的,日常生活上应用的单相电源实际上是三相电源的一部分。整个三相电力系统是由各种类型发电厂里的三相同步发电机,变电所里的三相变压器,三相高低压的输电线路和各种三相和单相负载(如电动机、电热器、电焊机、整流器、电气控制设备以及照明等)所组成。它包括三相交流电能的产生、传输、分配和应用的全过程。图5-1是一个三相电力系统的示意图。

在发电厂里,运转着的汽轮机(或水轮机)带动发电机,将机械能转化为电能,并通过输电线、变电所、配电站等,把电能输送和分配给用户。根据用户各种不同的需要,电能再转化为其他形式的能量。为了安全可靠和经济运行,近代大型发电站往往是并入电网运行。一个电力网可以分布在几个省、市。这样,利用电能可以远距离输送的特点,就能够把发电厂发出的电能输送到数百公里以外的工业城市和广大农村。

整个电力系统实际上就是一个复杂的三相交流电力网。我们工厂里的电力线路同样是一个三相交流电路。

三相交流电与单相交流电相比较具有以下优点:

(1) 在电机制造方面,采用三相制能提高发电机的出力。单相发电机的出力一般较同尺寸的三相发电机为小。因此,

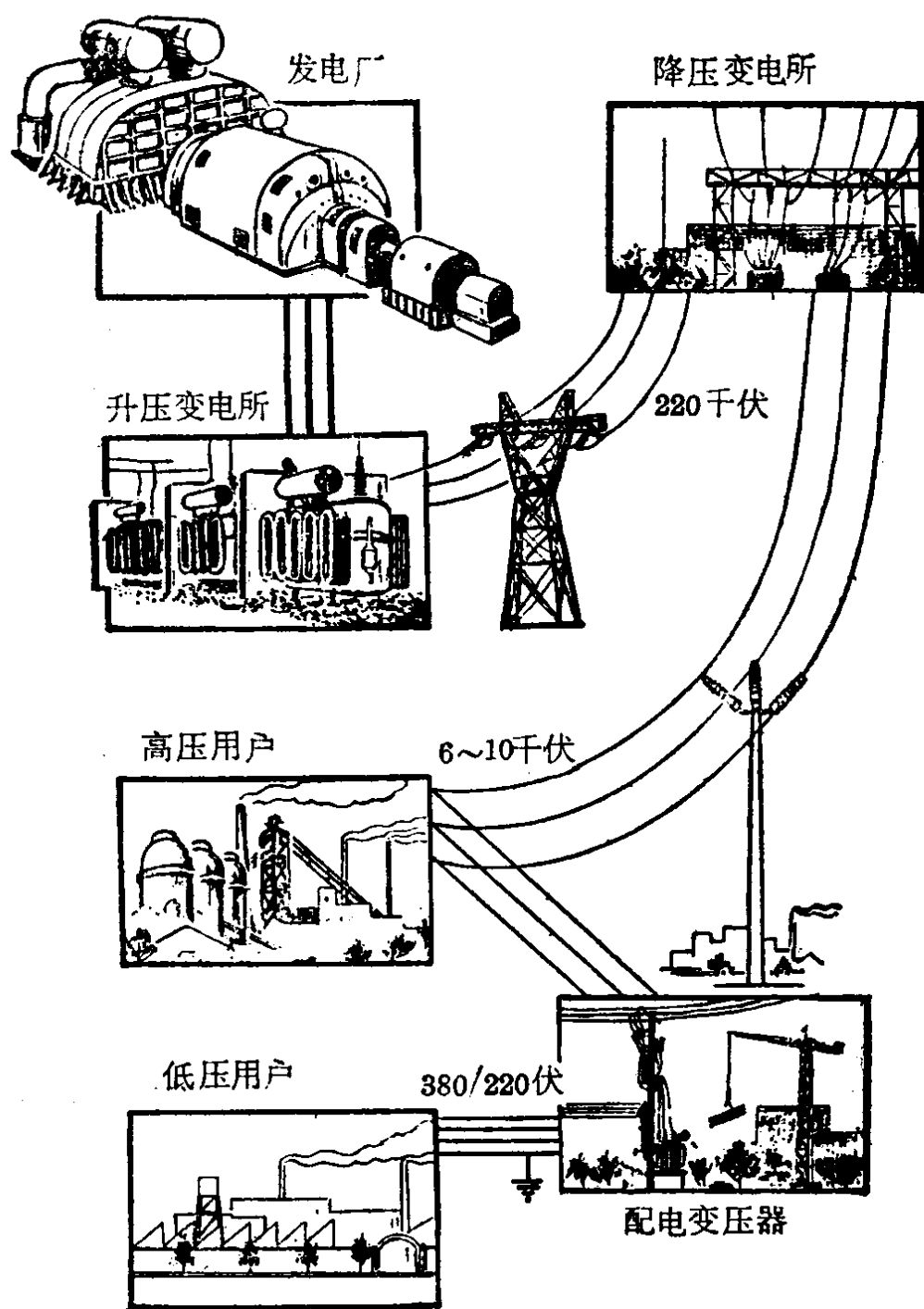


图 5-1 三相电力系统示意图

若用相同材料，三相电机的容量较单相电机的容量可大 50% 左右。

(2) 远距离输电时，三相制所用的输电线在输电电压、输

送功率、输电距离以及输电线上的损耗相等的情况下,要比单相制节省导线材料。

(3) 在低压配电线路中采用“三相四线制”,既能作为三相异步电动机等三相负载的电源,又能作为电灯、电热等单相负载的电源。在需要直流电源的工厂中,三相和单相一样都可利用各种整流设备(硅整流器、可控硅整流器等)将交流变成直流后再应用。

(4) 三相交变电流能产生旋转磁场,因此,三相制可以作为三相异步电动机的电源,而三相异步电动机结构简单,工作性能比单相电动机好,在工农业生产上得到广泛的应用。

三相交流输电系统还存在着系统稳定和无功损耗等问题,所以在输电方面交流不如直流;还有如三相异步电动机的调速性能不如直流电动机等。但是由于三相制有以上很多优点,因此得到广泛的应用。

第二节 三相交流电的产生

一、三相交流电的产生

在第三章第三节里,我们已经讲过了交流发电机的基本原理。在图 3-5 所示的交流发电机的定子铁心内只嵌装 AX 一个(或一组)线圈,所以它只能产生一种相位(单相)的电动势,这样的发电机叫做单相发电机。三相发电机是在单相发电机的基础上发展而来的。三相发电机在定子铁心内嵌装了三个独立而相同的绕组(每一个绕组就叫做一相)。如图 5-2 所示, AX 、 BY 、 CZ 是三个尺寸、匝数和绕法完全相同的绕组,把它们对称地嵌放在由硅钢片所迭成的定子铁心的凹槽中。在一对称的三相发电机内,三个绕组的所有对应导线都

在空间相隔 $\frac{2\pi}{3}$ 弧度(即 120°)，也就是说，三个绕组的始端 $A、B、C$ 彼此相隔 120° ，它们的末端 $X、Y、Z$ 也相隔 120° ，

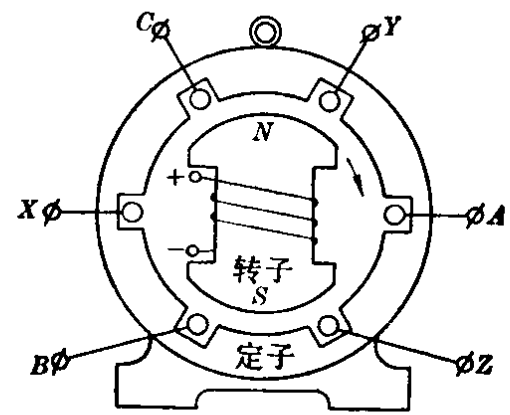


图 5-2 三相发电机的原理结构图

即在转子转动的方向上，第二个绕组的导线在第一个绕组对应的导线之后 120° ，第三个绕组的导线又在第二个绕组对应的导线之后 120° 。我们分别称这三个绕组为 A 相、 B 相和 C 相。我们一般是以黄色表示 A 相、绿色表示 B 相、红色表示 C 相。

转子上的绕组由直流电激磁产生一个很强的磁场。当转子作匀速转动时，穿过每个定子绕组中的磁力线发生变化，由于电磁感应作用，在定子三个绕组内会感应出感应电动势，如果在构造上采取一定的措施，就可以使感应电动势基本上具有按正弦规律变化的波形。

因为三个绕组的结构是相同的，所以在每个绕组中产生的交流电的变化波形也完全相同，假若它们都是正弦波，则其最大值，周期 T (或频率 f) 都相等。但由于三个绕组的相对位置相隔 120° ，在各组绕组中的交流电势(或电流)达到正的最大值的时间就有先有后，各差 $T/3$ 。在 $AX、BY、CZ$ 绕组中感应的电动势 $e_A、e_B、e_C$ 的方向可以根据右手定则来确定(与第三章第三节确定 e 的方法相同)，如图 5-3 所示。

实际上三相交流发电机的构造要比上面说的复杂得多，但其基本原理相同。它的定子绕组是产生交变电动势的导体，转子则是一个产生强磁场的可以转动的电磁铁。当由原

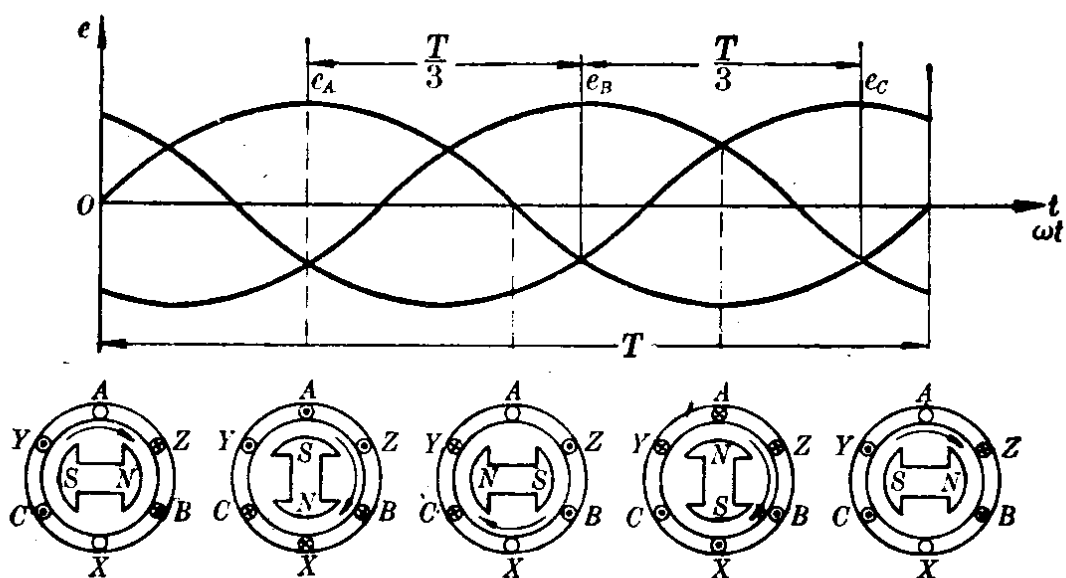


图 5-3 三相交流电的产生

动机(汽轮机、水轮机、燃汽机或内燃机)带动转子作匀速运转时,在定子三个绕组中就能感应出三相交流电动势,因而在接通负载以后就能源源不断地送出电流。

我国电机工人遵照伟大领袖毛主席关于“我们必须打破常规,尽量采用先进技术,在一个不太长的历史时期内,把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。”的教导,早在1958年就已试制成功第一台双水内冷汽轮发电机,使我国电机制造技术在五十年代就跨入了世界先进水平。无产阶级文化大革命进一步促进了生产力的发展。现在我国自行设计制造的更大容量的双水内冷汽轮发电机和水轮发电机已在全国许多发电厂里运转,为我们伟大的社会主义祖国不断增添新的动力。

二、对称三相正弦交流电的波形图及矢量图

对称三相正弦交流电是指 A 、 B 、 C 三个相的正弦交流电的最大值(或有效值)相等,频率相等,相位各差 $T/3$ (即

120°), 以后我们讨论的如无特殊规定一般都是指对称三相正弦交流电。

三相交流发电机发出的对称三相正弦交流电动势, 其波形图如图 5-4 所示。

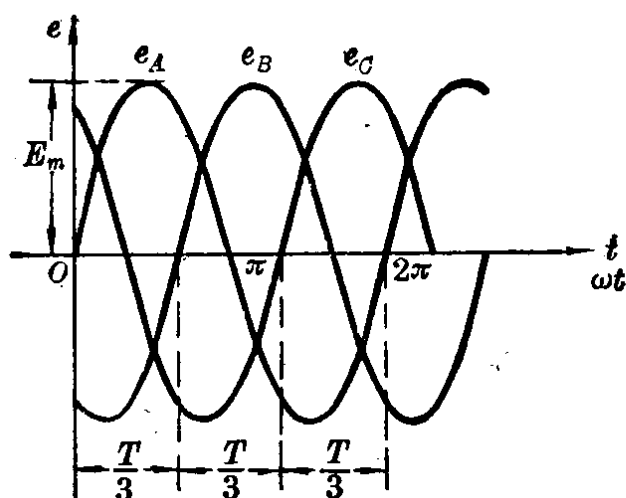


图 5-4 对称三相电动势的波形图

这个对称三相正弦电动势的瞬时值的方程式为:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

由上式可知:

(1) A、B、C 各相电动势的最大值(或有效值)相等。

(2) A、B、C 各相电动势的频率相等。

若 $f=50$ 赫, 则 $T=0.02$ 秒, 或 $\omega=2\pi f=314$ 弧度/秒。

(3) A、B、C 各相电动势的相位各差 120°。

在单相交流电路一章中已讲过, 正弦变化的交流电可以用矢量来表示。所以在三相电路中, 任何一组三相交流电都可以用三个矢量的组合来表示。例如上述对称三相电动势就可以用图 5-5a 的矢量图来表示。

从图 5-5b 看出, $\bar{E}_A$ 与 $\bar{E}_B$ 相加后得的矢量与 $\bar{E}_C$ 大小相等, 方向相反, 所以这三个对称电动势的矢量相加, 其矢量和等于零, 即

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C = (-\bar{E}_C) + \bar{E}_C = 0$$

由此可以得到一个重要的结论: 任何一组对称三相正弦电动势的矢量和等于零, 即

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C = 0 \quad (5-2)$$

同理, 任何一组对称三相正弦电压或电流的矢量和也等于零, 即

$$\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = 0 \quad (5-3)$$

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0 \quad (5-4)$$

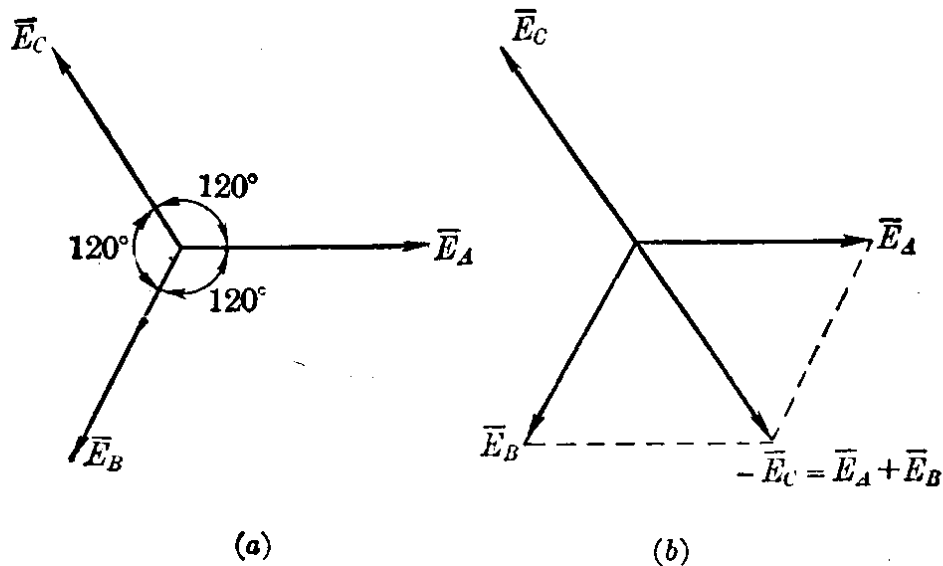


图 5-5 对称三相电动势的矢量图

三、三相交流电的相序

三相交流电各相瞬时值达到正的最大值的顺序, 叫做相序。如图 5-4 所示, 三个相的电动势达到正的最大值的时间是不相同的, 最先到达正的最大值的是 e_A , 其次是 e_B , e_B 落后于 e_A $1/3$ 周期, 再次是 e_C , e_C 落后于 e_B $1/3$ 周期, 这样的相序

就是 $A-B-C$ 。

在一般情况下，发电厂里的发电机在开始运转后将永远依同一方向旋转，因此，相序确定了以后，一般就不再改变。但是经过变压器、输电线路送到各工厂的三相交流电的相序，由于连接线路的错综复杂的关系，是应该设法加以鉴别的，特别是遇到发电机或变压器要投入电网并联运行时，必须认真进行核相工作。

在低压三相交流电路中，我们可以利用特制的旋转指示仪(也称相序仪)来确定相序，也可以用一只电容和二只灯泡构成简单的相序器来鉴别相序，这在本章第五节中介绍。

第三节 三相电源的联接

三相交流发电机中每一相线圈都可以看作是一个独立的电源，它们可以各自接到自己的负载上，向负载供给单相交流电流。如果用这种方法供电，就需要六根输电导线，如图 5-6 所示。因此，用这种供电方式很不经济。

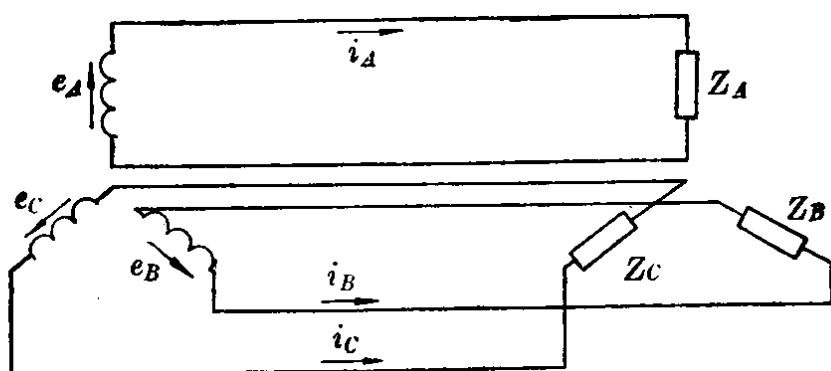


图 5-6 三相交流分成三个单相供电

实际上三相电源的绕组都是适当地联接在一起，再往外输电的。通常三相电源的绕组有两种接法：星形联接和三角形联接。

一、电源的星形联接(或叫做Y形联接)

1. 三相电源的星形联接方法

将三相绕组的末端 X 、 Y 、 Z 联接在一个公共点, 此公共点叫做中性点或中点, 用 O 表示, 这叫做电源的星形联接。从绕组的始端 A 、 B 、 C 引出的三根线叫做端线(相线), 俗称火线。在三相配电变压器中, 从绕组的末端 X 、 Y 、 Z 接成的中点 O 上, 引出一根线叫做中线(或称零线)。中线往往是接地的, 所以也称为地线。这样的供电方式叫做三相四线制。我们工厂里的低压配电线路, 大都属于三相四线制, 如图 5-7 所示。一般规定星形电源的电动势的正方向是从中点指向端线。

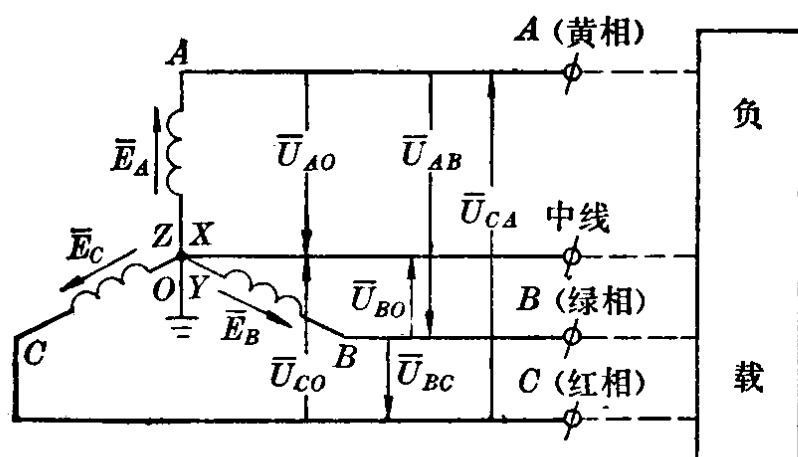


图 5-7 电源的星形联接(三相四线制)

2. 三相电源星形接法时线电压与相电压的关系

首先我们必须弄清楚什么叫相电压和线电压。

(1) 相电压: 相线和中线之间的电压叫做相电压。如图 5-7 中, $\bar{U}_{AO}$ 、 $\bar{U}_{BO}$ 、 $\bar{U}_{CO}$ 分别表示 A 、 B 、 C 三相的相电压。在对称情况下, 可用 $U_{\text{相}}$ 表示。如果发电机绕组本身的电压降很小, 略去不计, 则相电压等于该相的电动势, 一般三相电源的

电动势是对称的,所以相电压也是对称的。

(2) 线电压: 任何两根相线之间的电压叫做线电压。如图 5-7 中, $\bar{U}_{AB}$ 、 $\bar{U}_{BC}$ 、 $\bar{U}_{CA}$ 表示的就是线电压。在对称情况下,可用 $U_{\text{线}}$ 表示。

从图 5-7 中我们可以看出,电源在星形联接时,相电压和线电压是不相等的,怎样来找出相电压和线电压之间的关系呢?

现规定,相电压的正方向如 $\bar{U}_{AO}$ 是自始端 A 指向中点 O ,而线电压的正方向如 $\bar{U}_{AB}$ 是自始端 A 指向始端 B ,这样就可以确定发电机或变压器绕组接成星形时线电压与相电压之间的关系。

由于 A 相绕组的末端 X 并不是和 B 相绕组的始端 B 联接,而是和 B 相的末端 Y 联接,所以两端线 A 和 B 之间的线电压应该是两个相应的相电压之差。因为它们都是相同频率的正弦波,所以可以应用矢量来进行计算,即

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{AO} - \bar{U}_{BO} \quad (5-5)$$

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_{BO} - \bar{U}_{CO} \quad (5-6)$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_{CO} - \bar{U}_{AO} \quad (5-7)$$

根据以上三式,我们把对称三相星形联接时的线电压与相电压的关系,作出电压的矢量图,如图 5-8 所示。

根据矢量相减的方法,把 $\bar{U}_{BO}$ 矢量转过 180° 以后与 $\bar{U}_{AO}$ 相加,就得到 $\bar{U}_{AB}$ 矢量。从图 5-8 可以看出,由于 $\bar{U}_{AO}$ 与 $\bar{U}_{BO}$ 之间的相位差是 120° ,所以 $\bar{U}_{AO}$ 与 $-\bar{U}_{BO}$ 的相位差是 60° ,又由于 $\bar{U}_{AO}$ 与 $\bar{U}_{BO}$ 的有效值相等,三角形 OAD 与三角形 $OB'D$ 全等,所以线电压 $\bar{U}_{AB}$ 超前于相电压 $\bar{U}_{AO}$ 30° 。作辅助线 AF 垂直于 OD ,则线段 $OF=FD$, $OD=2OF$,由于 $OF=OA \cos 30^\circ$,所以,

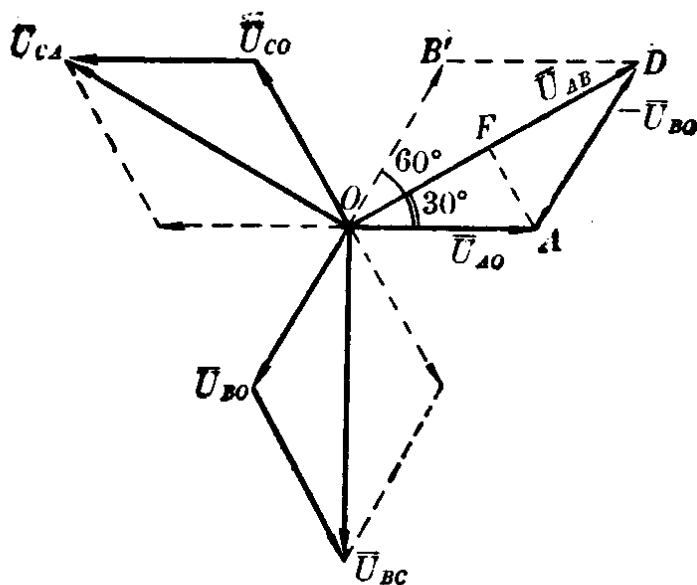


图 5-8 星形联接时的线电压和相电压矢量图

$$U_{AB} = 2U_{AO} \cos 30^\circ = 2U_{AO} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_{AO}$$

同理可证明:

$$U_{BC} = \sqrt{3}U_{BO}$$

$$U_{CA} = \sqrt{3}U_{CO}$$

即

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}} \quad (5-8)$$

因此,当相电压对称时,线电压也是对称的。线电压的有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,而线电压与相电压不同相,线电压的相位较它相应的相电压超前 30° ,即 $\vec{U}_{AB}$ 比 $\vec{U}_{AO}$ 超前 30° , $\vec{U}_{BC}$ 比 $\vec{U}_{BO}$ 超前 30° , $\vec{U}_{CA}$ 比 $\vec{U}_{CO}$ 超前 30° 。

这样三相四线制的供电系统可供给负载以两种电压,例如一般的低压供电系统中,当线电压为 380 伏时,其相电压为 $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ 伏。这种供电线路既可以作为 380 伏三相电动机的电源,又可以作为 220 伏单相电热及照明的电源,用起来十分方便。