

0225668

上海市工人业余学校课本

电 工

第 二 册

(试 用 本)

说 明

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，本市工人业余教育蓬勃开展。为了适应普及科学技术知识的需要，我们组织有关单位编写了这套电工教材。

电工教材共分四册。第一册讲述电、磁的基本知识，单相交流电路和工厂照明用电等知识；第二册讲述三相交流电路、工厂配电线路、常用电工仪表及电工测量等知识；第三册讲述变压器及交、直流电机等知识；第四册讲述工厂配电装置、低压电器、机床电气控制，计划用电、节约用电及安全用电等知识。为了帮助学员掌握和运用电的技术知识，我们在编写各章节时选编了一些结合工业生产实际的例题和习题。

这套教材是试用本。各单位教学时可根据实际情况选用，也可穿插自编教材。

编写新教材，是教育革命的一个重要组成部分。由于我们缺乏经验，这套教材一定存在很多缺点和问题，希望广大学员和教师在试用中提出批评和修改意见。

上海市工人业余学校教材编写组



目 录

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
第三节 三相电源的联接	8
第四节 三相负载的联接	14
第五节 三相电路的功率	25
第六节 三相电路中的故障	43

习 题

章 厂区电力线路	49
第一节 工厂企业电力线路概述	49
第二节 架空线路的选择	53
第三节 架空线路的安装	66
第四节 电力电缆的结构	80
第五节 电力电缆的选择	82
第六节 电缆线路的敷设	93
第七节 厂区电力线路的运行和维护	108

习 题

第七章 常用电工仪表和电工测量	115
第一节 电工仪表的基础知识	115
第二节 常用电工仪表的结构和原理	121
第三节 电工测量	138
第四节 电工仪表误差的表示方法	198
第五节 电工仪表的发展趋向	202

习 题

第五章 三相交流电路

第一节 概 述

现代化工农业的发展，是以电力作为其基本的动力的。电力工业是直接关系着国民经济发展的一个重要工业之一。

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与各种三相和单相负载（如电动机、电热器、电焊机、整流器、照明等）组成了整个三相电力系统，它担负起三相交流电能的产生、传输、分配和应用的全部职能。整个电力系统实际上就是一个复杂的三相交流电力网。在我们每个工厂里的电力线路同样是一个三相交流电路。

图 5-1 是一个三相电力系统的示意图。

三相交流电与单相交流电比较具有以下优点：

1. 三相电气设备（发电机，变压器，电动机等）的制造及其所需材料，在相同容量下要比单相的经济。

2. 远距离输电时，三相制所需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，要比单相制节省有色金属约 25%。

3. 在低压配电线路中采用“三相四线制”，既能作为三相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，可控硅等）将交流变成直流后应用）。

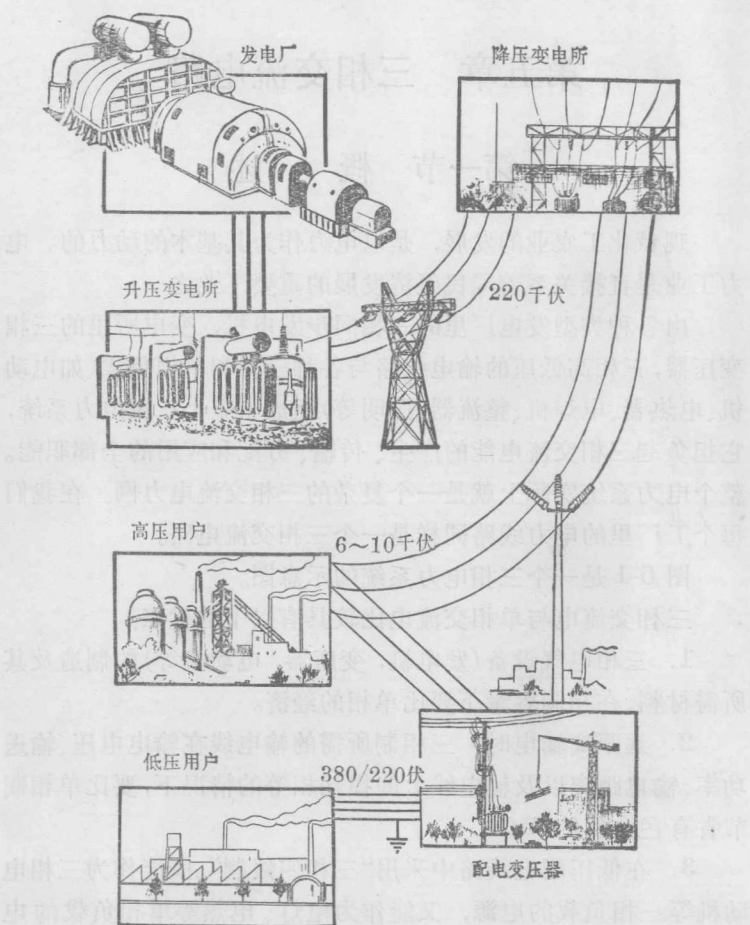


图 5-1 三相电力系统示意图

4. 三相电流能够产生旋转磁场,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,现在广泛地在工农业上应用。

但是,三相交流输电系统还存在着系统稳定和无功损耗问题,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等。然而由于三相制有以上很多的优点,因此目前在工农业方面能够获得广泛的应用。

三相交流电是从单相交流电发展而来的,三相交流电与单相交流电既有其共同之点,也有区别。毛主席教导我们:“当着人们已经认识了这种共同的本质以后,就以这种共同的认识为指导,继续地向着尚未研究过或者尚未深入地研究过的各种具体的事物进行研究,找出其特殊的本质,……”,下面,我们就在认识单相交流电路的基础上,进而来认识三相交流电路的特殊性质。

第二节 三相交流电的产生

一、三相交流发电机是怎样产生三相交流电的?

三相交流电是由三相交流发电机产生的。三相交流发电机与单相发电机的构造基本上是相同的,不过在定子上面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是三个形状与匝数完全相同的绕组,它们被对称地嵌放在由硅钢片所迭成的定子内的凹槽中。在两极的发电机中,三个绕组的始端, A、B、C彼此

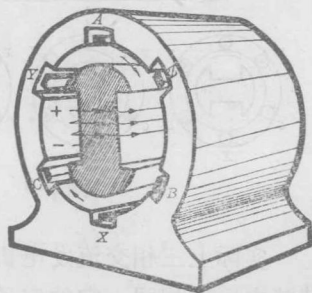


图5-2 一对磁极的三相交流发电机的简单原理图

相隔 120° ，它们的末端 X 、 Y 、 Z 也相隔 120° 。平时我们分别称这三个绕组为 A 相（用黄色表示）， B 相（用绿色表示），和 C 相（用红色表示）。

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，在定子三个绕组内都会感应出感应电势，在构造上采取一定的措施，就可以使电动势具有按正弦变化的规律。

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。但是由于三个绕组的位置相隔了 120° ，在各组绕组中的交流电动势（或电流）达到正的最大值的时间就有先有后，各差 $\frac{T}{3}$ ，如图 5-3 所示。

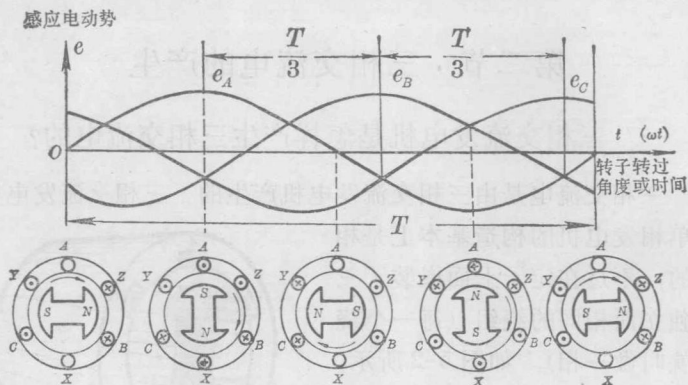


图 5-3 三相交流电的产生

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流电动势的导体，转子则是一个产生强磁场的可以转动的电磁铁。由汽轮机、水轮

机、燃气轮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源源不断地送出三相交流电能。我国电机工人遵照伟大领袖毛主席“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 年已试制成功了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水轮发电机和双水内冷汽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地增添新的动力。

二、对称三相正弦交流电的波形图及矢量图

所谓对称三相正弦交流电是指 A 相、 B 相及 C 相三个相的

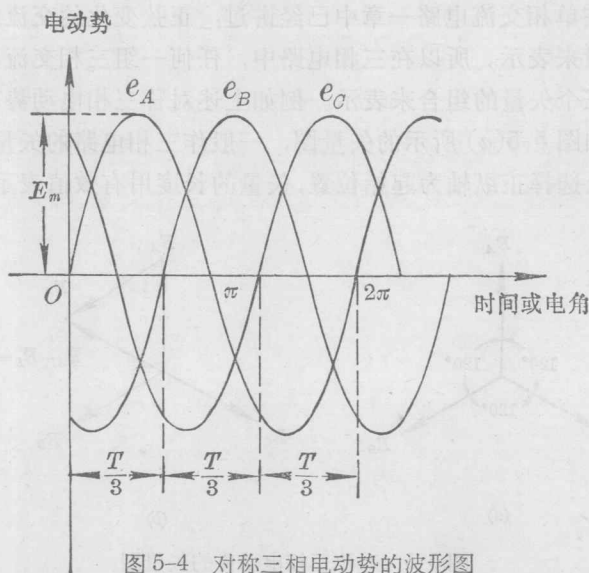


图 5-4 对称三相电动势的波形图

正弦交流电的最大值(或有效值)相等,频率相等,相位各差 $1/3$ 周期(或 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正弦交流电动势,其波形可以用图 5-4 的曲线来表示。

这个对称三相正弦电动势的瞬时值方程式为

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

由此看出: A 、 B 、 C 各相电动势的最大值(或有效值)相等

A 、 B 、 C 各相电动势的频率相等

$$f = 50 \text{ 周/秒} \quad T = 0.02 \text{ 秒} \quad \omega = 2\pi f = 314$$

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经讲过: 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表示如图 5-5(a) 所示的矢量图, 一般作三相电路的矢量图时, 习惯上选择正纵轴为起始位置, 矢量的长度用有效值表示。

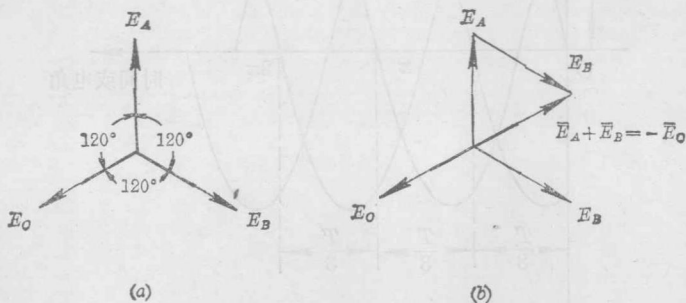


图 5-5 对称三相电动势的矢量图

从图 5-5(b) 看出, $\bar{E}_A$ 与 $\bar{E}_B$ 相加后得到的矢量与 $\bar{E}_C$ 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, 就是: 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

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

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

三、三相交流电的相序是什么意思?

怎样鉴别三相交流电的相序?

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, 最初到达正最大值的是 e_A , 其次是 e_B , 落后于 e_A $1/3$ 周期, 再次是 e_C , 又落后 e_B $1/3$ 周期, 这样的相序就是 $A-B-C$ 。

在一般情况下, 发电厂或电力站的发电机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、输电线路送至各工厂来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, 特别在遇到三相电网或三相变压器的并联运行时, 对于相序必须予以认真的注意。

在低压三相交流电路中, 我们可以利用特制的旋转指示仪 (也称相序表) 来确定相序, 它是利用电动机的原理制成的。这里我们介绍一种采用简单的电容灯泡法来确定相序的方法。

把电容器一只($0.2\sim 1\mu\text{F}$)和灯泡(220V , 15W)两只按图 5-6 所示的电路进行联接, 当我们把三个端点分别接到三相电源上时, 由于三相负载不对称, 形成各相电压的不均匀现象, 引起一个灯泡较亮, 另一个灯泡较暗。若以接电容器的一相定为 A 相, 则接较亮灯泡的一相即为 B 相, 接较暗灯泡的一相即为 C 相, 相序便是 A 、 B 、 C 。

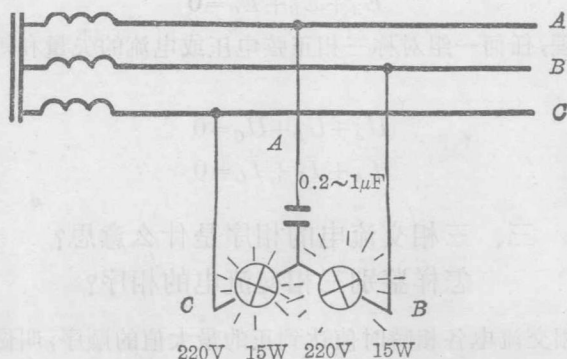


图 5-6 电容-灯泡法鉴别相序

第三节 三相电源的联接

一、三相发电机的三个绕组是怎样联接起来向外输电的呢?

三相发电机的每相绕组本来可以互相独立, 各自往外输电, 这样三个绕组就需要六根输电线, 很不经济。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:

1. 电源的星形联接(或叫做 Y 形接法)

将三相绕组的末端 X 、 Y 、 Z 联接在一个公共点叫做中点,

用 O 表示, 这叫做绕组的星形联接。从绕组的始端 A 、 B 、 C 引出的三根线叫做端线(相线)。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(零线), 俗称地线。这样的输电方式叫做三相四线制。我们工厂里的低压电力线路, 大都属于三相四线制。见图 5-7。

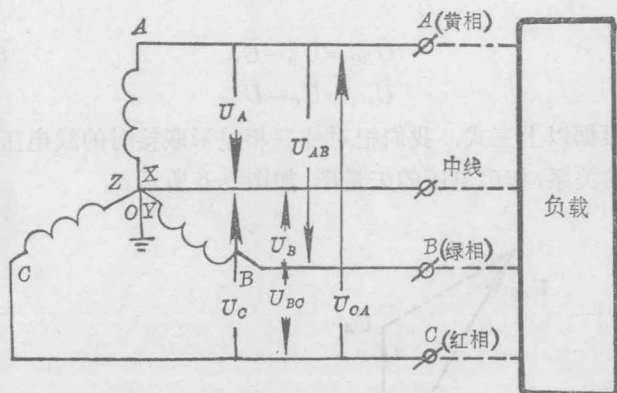


图 5-7 电源的星形联接(三相四线制)

每相绕组始端和末端间的电压, 即端线与中线间的电压, 称为相电压, 分别用 U_A 、 U_B 、 U_C 表示, 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, 相电压即等于该相的电动势, 一般电动势是对称的, 所以相电压也是对称的。

各相绕组始端间的电压, 即端线与端线之间的电压, 称为线电压, 分别用 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 表示, 在对称情况下, 可用 $U_{\text{线}}$ 表示。

现规定, 相电压的正方向如 U_A 是自始端 A 指向中点 O , 而线电压的正方向如 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这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

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B \quad (5-5)$$

同理

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C \quad (5-6)$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A \quad (5-7)$$

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。

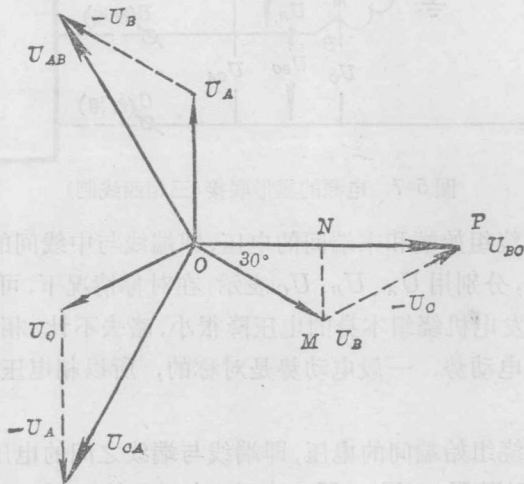


图 5-8 电源作星形联接时线电压与相电压的矢量图

由矢量图可看出, 在 $\triangle OMP$ 及 $\triangle OMN$ 中,

$$U_{BC} = OP = 2ON = 2OM \cos 30^\circ = 2U_B \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_B$$

即

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

由此可知,当三相电压对称时,星形联接的线电压的有效值等于相电压的有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,同时,线电压的相位较它相应的相电压超前 30° 。即 $\bar{U}_{AB}$ 比 $\bar{U}_A$ 超前 30° , $\bar{U}_{BC}$ 比 $\bar{U}_B$ 超前 30° , $\bar{U}_{CA}$ 比 $\bar{U}_C$ 超前 30° 。

这样三相四线制的供电系统就可以供给负载有两种可能的电压,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,十分方便。

如果在三相对称电压的情况下,所有接入线路的三相负载都对称的(即各相负载性质相同,阻抗相等),则三相相线上的电流也必定是对称的,这种三相交流电路称为三相对称电路。此时中线上电流等于零,中线可以省去不要,这样就成为三相三线制。高压输电线路一般都属于三相三线制。

例 5-1 我国生产的世界上第一台 QFS-125-2 十二万五千瓩双水内冷汽轮发电机,其三相绕组为星形联接,线电压是15750伏,问该发电机每相绕组的相电压等于多少?

解

$$\therefore U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}$$

$$\therefore U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{15750}{1.732} = 9100 \text{ 伏}$$

例 5-2 在一般低压供电系统中采用三相四线制,同时供给三相异步电动机和单相照明电灯的用电,当相电压由220伏上升至230伏时,问线电压增加多少?

解 $U_{\text{相}} = 220$ 伏时, $U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}} = 1.732 \times 220 = 380$ 伏。

当相电压升高至230伏时, $U'_{\text{线}} = \sqrt{3} U'_{\text{相}} = 1.732 \times 230 = 400$ 伏。

∴ 比正常增加 20 伏。

2. 电源的三角形联接(或叫做△形接法)

将三相绕组各相的末端和相邻一相绕组的始端依次相联, (X 联 B, Y 联 C, Z 联 A) 接成一个三角形, 这叫做绕组的三角形联接。再从三个始端 A、B、C, 引出三根端线。这样的输电方式也叫做三相三线制。如图 5-9。

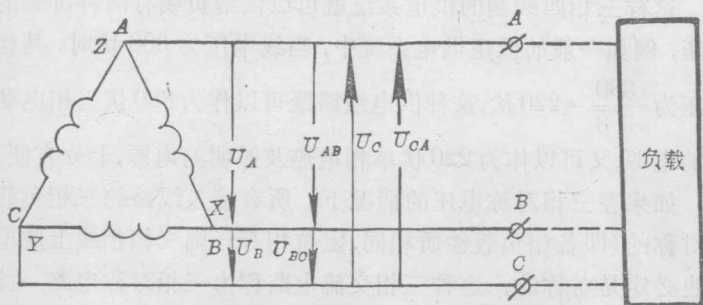


图 5-9 电源的三角形联接

由图 5-9 中可以明显看出, 在这种联接下, 线电压等于相电压, 即

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A, \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B, \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C \quad (5-9)$$

由图 5-10 的矢量图可知

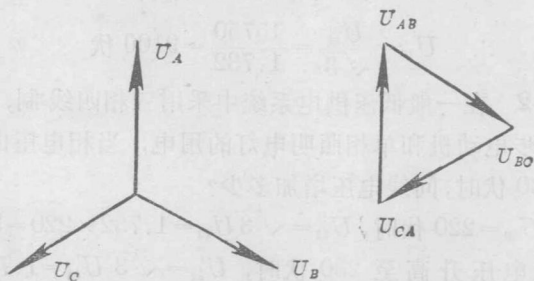


图 5-10 电源作三角形联接时线电压与相电压的矢量图

$$\bar{U}_{AB} + \bar{U}_{BC} + \bar{U}_{CA} = 0 \quad (5-10)$$

即三个线电压的矢量和等于零。

在对称的情况下, $U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$, 那就是说, 在电源作三角形联接时, 线电压的有效值就等于相电压的有效值。

但是必须指出: 三相发电机或变压器的绕组作三角形联接时, 联接的顺序必须正确。毛主席教导我们: “要过细地做工作。要过细, 粗枝大叶不行, 粗枝大叶往往搞错。”如果有一相绕组的始端与末端联接颠倒, 就会在三角形回路中引起过大电流, 将绕组烧毁。

二、什么叫做“两线一地制”? 它有什么优缺点?

我们到上海郊区去野营训练, 在征途中可以看到上海郊区的一万伏输电线路只有两根输电线, 这是怎么回事呢? 原来这是我们工人阶级响应毛主席“要节约闹革命”的伟大号召, 利用大地作为一相导线, 来传输三相交流电的“两线一地制”。

“两线一地制”供电线路及其原理结线图如图 5-11 所示。

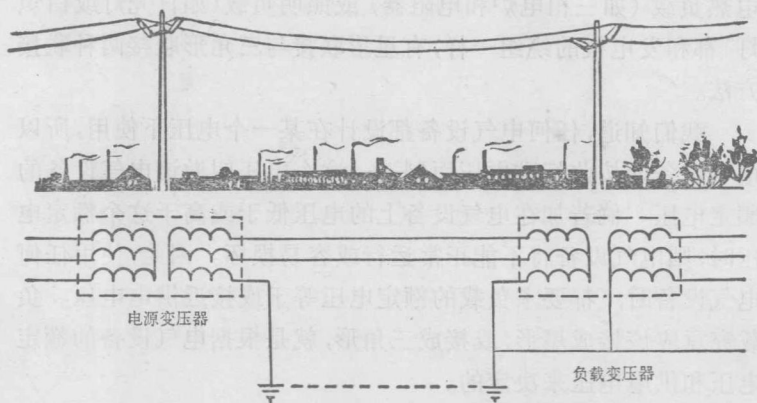


图 5-11 “两线一地制”供电线路及其原理结线图

“两线一地制”的特点如下:

1. 导线材料和线路器材的消耗减少了三分之一,变电所的隔离开关、断路器或熔断器、避雷器等可以减少一极,如把原来三线送电的线路改为两线送电,就可拆下多余的高压线和器材,用于架设更多的新线路,加速农村电气化的发展。

2. 因为大地是良导体,线路上功率损耗可减少25~30%。但是“两线一地制”电网只有经过三相变压器才可与三线电网联接;受电端如不采取措施,电压将不对称;接地装置的规格要求很高;对通讯线路的干扰影响较大,所以一般只在农村作为输电使用,而不适用于低压配电线路,在城市里也不采用“两线一地制”供电。

第四节 三相负载的联接

一、三相负载的两种联接(星形联接与三角形联接)

凡是接在三相交流电路里的动力负载(如三相异步电动机),电热负载(如三相电炉和电阻器)或照明负载(如日光灯或白炽灯)都和发电机的绕组一样,有星形联接与三角形联接两种联接方法。

我们知道,任何电气设备都设计在某一个电压下使用,所以电气设备即按此标准电压而制造。这个电压叫做该电气设备的额定电压。倘若加在电气设备上的电压低于或高于这个额定电压时,则电气设备将不能正常运行或容易损坏。因此,使用任何电气设备时,都要求负载的额定电压等于或接近供电电压。负载究竟应该接成星形,或接成三角形,就是根据电气设备的额定电压和供电电压来决定的。

下面我们来研究负载在不同联接时,怎样计算负载中的相