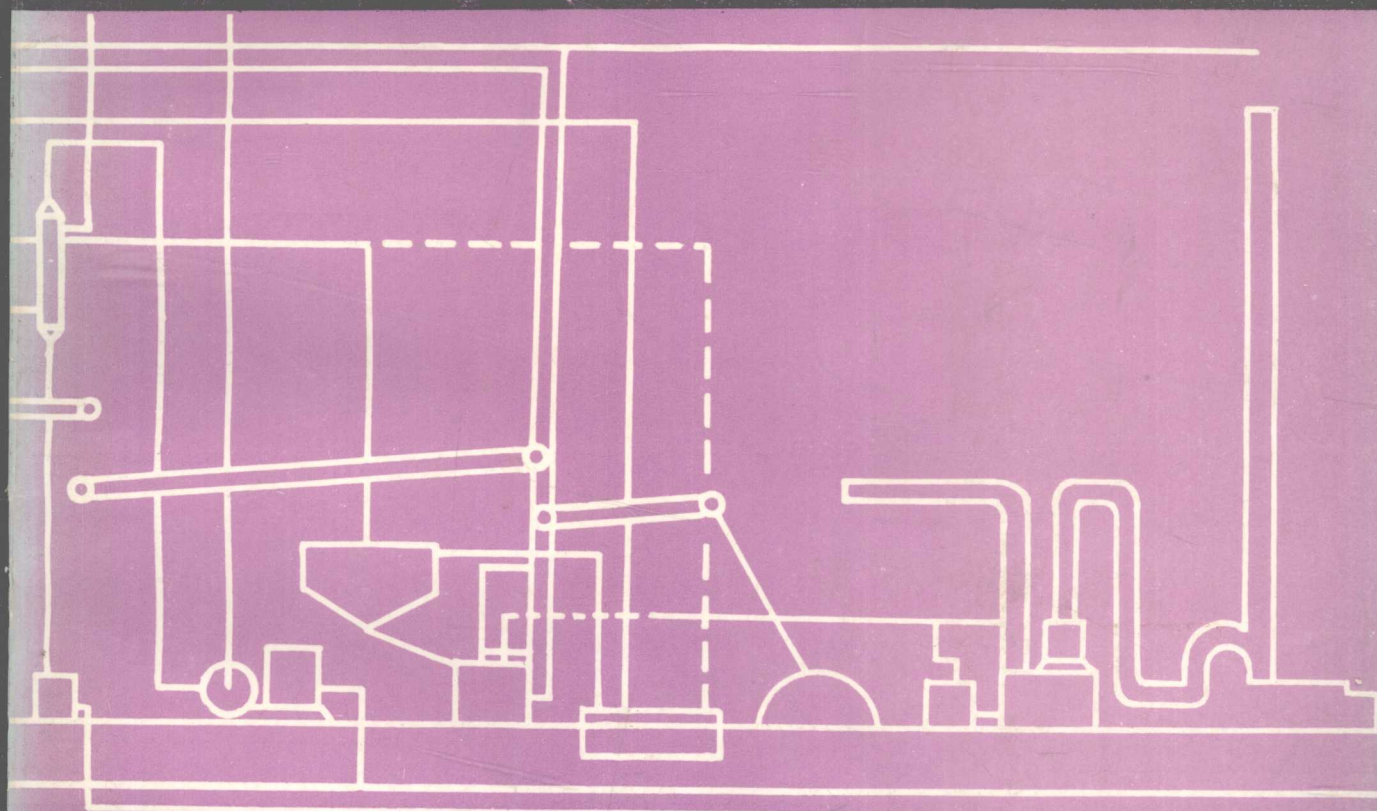


小磷铵生产技术丛书

电 气

化学工业部化肥司 中国磷肥工业协会 编写组



442
491
X4.1

成都科技大学出版社

小磷铵生产技术丛书

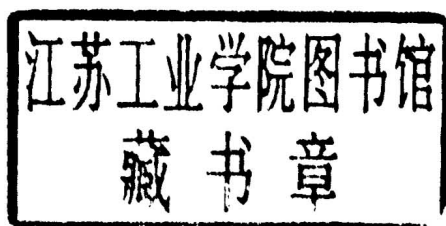
电 气

(上册)

化学工业部化肥司

编写组

中国磷肥工业协会



成都科技大学出版社

内 容 提 要

本书上册围绕年产三万吨料浆法磷铵生产装置的通用设计,介绍有关交流电路、异步电机、电气线路、电气设备的安装维修及安全用电等电气知识,讲述深入浅出,内容精当适用。下册主要包括高压电力系统、余热发电、电除尘除雾,以及电热元件等内容。

本书可作新建“料浆法”磷铵厂操作人员和生产管理人员的培训教材,也可供相关专业作中级工人培训教学用书。

本书前言、第一章至第四章由黄春泉编写,第五章至第九章、附录由李庆章编写。南京化学工业公司设计院高级工程师巫祥主审,辽宁省石油化工设计院工程师方惠和四川绵竹磷肥厂工程师熊天清参加审稿。

※

※

※

主 编: 林 乐 魏文彦 陈玉如
编 者: 黄春泉 李庆章

小磷铵生产技术丛书

电 气 (上册)

化学工业部化肥司 编写组
中国磷肥工业协会

成都科技大学出版社出版发行

四川省新华书店经销

成都科技大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 插页: 4 印张: 7.875
1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数: 1—9,000 字数: 190千字

ISBN 7-5616-0817-9/TQ·53

定价: 3.55元

前 言

复合肥料是现代化肥工业的发展方向。早在1983年1月,邓小平同志就作出了“肥料,要走复合肥料的道路,质量要好,要把大力发展复合肥料作为方针定下来”的指示。磷铵是一种适合于所有土壤和作物且深受欢迎的高浓度复合肥料,属于优先发展的品种。为了迅速发展我国的磷铵工业,“七·五”到“八·五”期间,在建设大型磷复肥装置的同时,国务院还决定拨出专款,在全国范围内改、扩建近百套规模为3~6万吨/年的小磷铵生产装置。

由于我国磷铵工业起步较晚,与之配套的技术书籍非常缺乏,为了满足全国小磷铵生产装置建设单位对其专业技术人员、管理人员和各操作工种的培训需要,化工部化肥司组织了南化公司设计院,成都科技大学,四川银山磷肥厂和上海化工研究院等单位的专家、教授和工程技术人员,围绕3万吨/年料浆法磷铵通用设计,编写了包括工艺、设备、仪表、电气、分析、生产管理等专业丛书一套,供培训使用。

本丛书集中了我国建国以来有关磷酸磷铵生产的主要科研成果和生产经验,介绍了国内外磷酸磷铵生产技术的新进展,还用相当的篇幅讲述了指导这些技术的新理论和基础知识。故本书除作生产建设单位培训教材之外,还可供有关科研、教学和经济管理部门的人员参考。

本丛书共分六册。第一册《磷酸磷铵的生产工艺》;第二册《机器与设备》;第三册《仪表及自动化》;第四册《电气》;第五册《磷铵生产分析》;第六册《操作与管理》。其中第一册和第五册由成都科技大学负责编写。第二册、第三册、第四册由南化公司设计院编写,第六册由四川银山磷肥厂编写。丛书由林乐、魏文彦、陈玉如主持编写,姚永发参加全套丛书的审定工作。

由于我们水平所限,时间仓促,书中可能存在错误和不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

编者

1990年11月

目 录

前 言

第一章 交流电路	(1)
1.1 交流电路的基本概念	(1)
1.2 正弦交流电	(2)
1.3 单相交流电与三相交流电	(6)
1.4 正弦交流电路	(10)
第二章 变压器	(20)
2.1 变压器的用途	(20)
2.2 变压器的结构和工作原理	(20)
2.3 变压器的空载情况和负载情况	(21)
2.4 变压器的变压比	(23)
2.5 变压器的变流比	(24)
2.6 变压器的变换比	(25)
2.7 变压器变换阻抗的作用	(25)
2.8 变压器的功率、损失和效率	(26)
2.9 自耦变压器	(27)
2.10 互感器	(28)
2.11 三相变压器	(30)
第三章 异步电动机	(32)
3.1 异步电动机的结构	(32)
3.2 旋转磁场	(32)
3.3 异步电动机的工作原理	(35)
3.4 鼠笼式异步电动机	(36)
3.5 绕线式三相异步电动机	(37)
3.6 电动机的额定转矩	(38)
3.7 电磁滑差调速原理	(39)
第四章 1000伏以下短路电流计算及常用电器	(41)
4.1 1000伏以下短路电流计算	(41)
4.2 熔断器及自动空气开关的选择	(51)
4.3 刀开关、接触器及热继电器的选择	(55)
4.4 电流互感器的选择	(56)

4.5	频敏变阻器的选择	(56)
4.6	节电器的选择	(59)
4.7	控制电器的选择	(60)
4.8	电气仪表	(61)
4.9	电气照明	(62)
第五章	电气线路	(66)
5.1	配电线路及其与保护元件的配合	(66)
5.2	鼠笼式异步电动机正转控制线路	(68)
5.3	鼠笼式异步电动机正反转控制线路	(73)
5.4	绕线式异步电动机控制线路	(76)
第六章	环境特征和电气设备材料的选择	(78)
6.1	环境特征的描述	(78)
6.2	电力装置抗环境影响的对策	(79)
6.3	防腐电气设备材料的选择	(80)
6.4	防爆电气设备的选择	(85)
第七章	电气设备安装、使用及维修常识	(87)
7.1	电气设备的安装	(87)
7.2	电气设备、器具使用及维修	(90)
第八章	接地与接零	(97)
8.1	接地与接零的概念	(97)
8.2	接地与接零的作用	(98)
8.3	接地与接零系统结线的几种方式	(100)
8.4	接地与接零的范围及要求	(105)
8.5	接地与接零装置的选择	(107)
8.6	接地装置的安装、检测及维护	(107)
第九章	安全用电	(112)
9.1	电流对人体的伤害	(112)
9.2	人体触电方式	(112)
9.3	高压触电和低压触电危险性的区别	(114)
9.4	防止触电措施	(114)
9.5	防止电气设备事故的安全措施	(115)
9.6	救护方法	(115)
附录 1	年产 3 万吨料浆法磷铵装置环境划分表	(117)
附录 2	Y 系列电动机起动、保护设备及导线选择表	(118)

第一章 交流电路

1.1 交流电路的基本概念

1.1.1 直流电与交流电

在直流电路中，电源电压的极性和大小是不随时间变化的，因此电路接通后，产生的电流大小和流动方向也是不随时间变化的，这种电流称为直流电流。

在交流电路中，电源电压的极性和大小都是随时间作周期性变化的，所以电路接通后产生的电流大小和流动方向，也将随时间作周期性变化，这种电流（或电压）称为交流电流（或交流电压），统称为交流电。在交流电作用下的电路称为交流电路。

1.1.2 交流电的类型

交流电可大致分为两种类型：纯交流电，复合电。

1.1.2.1 纯交流电

图1-1中，曲线的每一个周期，时间轴上、下所包围的面积相等（代数和为零），这种波形的交流电属纯交流电。

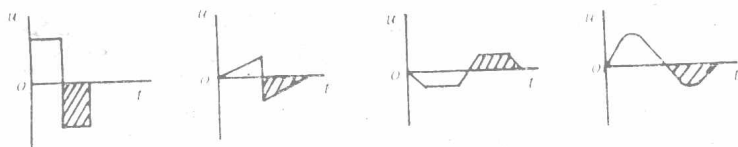


图 1-1 纯交流电

1.1.2.2 复合电

图1-2中，曲线的每一周期，时间轴上面所包围的面积不等于轴下面所包围的面积，甚至总是保持在时间轴之上或时间轴之下（代数和不等于零），这种波形的交流电除了含有交流的成份之外，还含有直流的成份，所以叫做复合电。

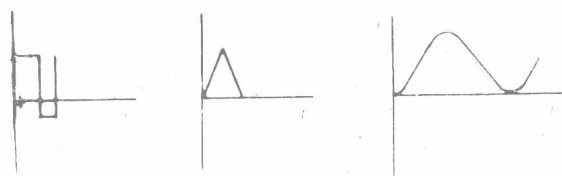


图 1-2 复合电

1.1.3 交流电的优越性

现代生产和生活中，所用的电能大多是交流电。交流电的应用为什么会这样广泛呢？这是因为采用交流电时，不论在电能的产生（发电）、输送（输电）和使用（用电）方面都有重大的技术经济意义。在电力系统中，各方面对电压的高低提出了不同的要求。例如，在输电方面，由于发电厂和用电点之间的距离有时很远，为了减少线路上的损失，希望流过线路中的电流越小越好，而要确保一定的输送功率，电流小了必须

使电压升高，而且输电距离越远，要求的电压越高；在用电方面，为了安全起见，都是采用较低的电压，而且一些用电设备也不可能制造成高电压的。在发电方面，发电机的发电电压高低又不是可以任意改变的。采用交流电，就很容易满足上述各方面的要求。因为交流电电压的高低可以很方便地通过变压器来改变。例如发电厂通过升压变压器把电压升高，送到线路土，实现高压输电；到了用户这边再通过降压变压器把电压降下来，供给用户使用。

直流电电压的高低不能通过变压器改变，使用起来就不可能象交流电那样方便。在一些非用直流电不可的场合，例如电解和电镀等，人们通过整流设备将交流电转变成直流电，因此还是用的交流电。

1.2 正弦交流电

1.2.1 正弦交流电的产生

交流电的大小和方向都是随时间变化的，交流电的波形一般为正弦曲线，故称正弦交流电。

我们知道，导体在磁场中作垂直于磁力线的方向运动，切割磁力线时，在导体中便会感应产生电势(或电压)，叫做“感生电势”(或“感生电压”)。

图1-3表示一个金属环(线圈)在均匀磁场中旋转。用电压V测量其旋转360°产生的电压。线圈在每一瞬间(即在每一转角度上)产生的电压称为瞬时电压，以小写英文字母u表示。以u为纵坐标，以转角为横坐标，将相应的瞬时电压绘入直角坐标系，连结每个箭头的顶点，便得到一条正弦电压曲线(图1-4)。

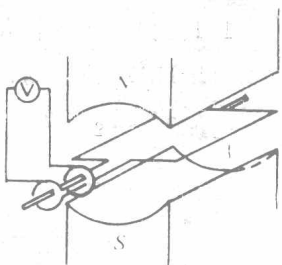


图 1-3 金属环在均匀磁场中旋转

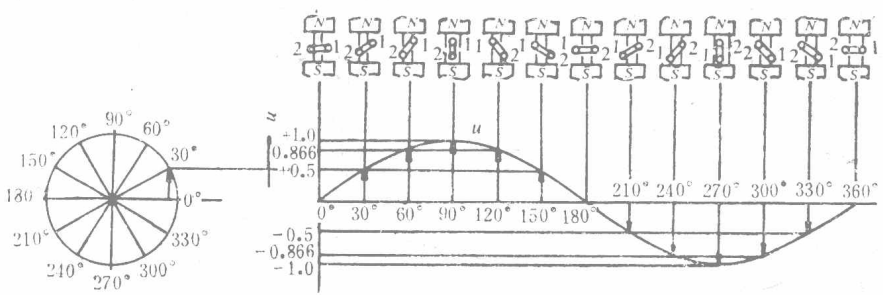


图 1-4 正弦交流电压曲线

感生电压的数值(大小和正负)与线圈在磁场中所处的位置有关，其原因可解释如下：

转角为0°：导线(线段1和2)正好平行于磁力线方向运动，未切割磁力线，不能感生电压($u=0$)。

转角为90°：导线正好在磁力线的垂直方向运动，它感生的电压最高，这时的电压值称为电压最大值、峰值或幅值，以 U_m 表示。此时感生的电压 $u=U_m=1$ (设最大值为1)。

转角为 30° ：导线向磁力线方向倾斜地运动，它感生的电压 $u=0.5$ 。

转角为 60° ：导线的运动几乎与磁力线方向垂直，感生的电压 $u=0.866$ 。

转角超过 180° 以后，感生电压的方向为负值，因为对应于导线，两个磁极位置已互换。

查三角函数可得：

$$\sin 0^\circ = 0;$$

$$\sin 60^\circ = 0.866;$$

$$\sin 30^\circ = 0.5;$$

$$\sin 90^\circ = 1.$$

感生电压的大小与这些函数完全一致，因此可以说，在均匀磁场中作匀速旋转运动的线圈，感生电压大小的变化与该线圈转角的正弦函数的变化相同。

知道了感生电压的峰值 U_m ，则在任何转角 α 上感生电压的瞬时值可按下式计算

$$u = U_m \sin \alpha \quad (1-1)$$

式(1-1)表示线圈感生电压 u 与转角 α 的变化关系，绘成曲线就是图1-4中的正弦曲线。

1.2.2 正弦交流电的参数

1.2.2.1 周、周期

正半波加负半波称为一波或一周(图1-5)。

一周所经历的时间称为周期，用 T 表示，以秒为单位。

1.2.2.2 频率

一秒钟内的周(波)数称为频率，用 f 表示，单位为赫兹(Hz)，简称“赫”。在1秒钟内波动1次为1赫，即 $1\text{赫}=1/\text{秒}$ 。

我国电力网供给的交流电的频率为50赫，习惯上称为“工频”；

声音频率范围为16赫~16千赫；

高频为10千赫~300千兆赫；

直流电为0赫。

频率越高，周期越小。即在1秒钟内波动的次数越多，每一波所经历的时间越短。频率是周期的倒数，为

$$f = 1/T \quad (1-2)$$

1.2.2.3 相角(相位)

正弦电压(或电流)随时间而不断变化，在不同时刻有不同的数值，且其正负方向也在变化，即在一定时刻有一定的状态(大小和方向)。正弦电压(或电流)在某一时刻的瞬时状态称为正弦电压(或电流)在该时刻的“相”。

能够反映某一时刻正弦电压(或电流)状态的角度，称为“相角”。例如，在图1-4中，瞬时电压为 $+0.866U_m$ (状态)时的相角为 60° ；瞬时电压为 $-0.5U_m$ (状态)时的相角为 210° 。相角是表示正弦交流电变化进程的一个量，不同的相角对应着不同的交流电瞬时值。显然，相角是从正弦波过零点开始(图1-4中的 0°)，至观察波形的时间点止(例如 60° 处)，所经历的角度，

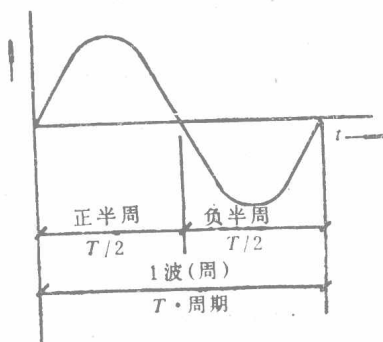


图 1-5 正弦交流电的周期

相角又叫做相位。

1.2.2.4 相位差

若两个同频率的正弦量（电压或电流）在不同时间到达零值和峰值，则这两个正弦量有相位差（或称相位移），如图1-6所示。

相位差的大小用角度表示。从图1-6中可以看出，电压 u_2 在 u_1 后到达零值（或峰值），电压 u_2 较电压 u_1 落后一个角度 φ ，或者说 u_1 超前 u_2 一个角度 φ 。

如果两个同频率的正弦量在同一时刻到达零值或峰值，则此两正弦量同相位（或称同相）。如果两个同频率的正弦量的相位差为 180° ，则称此两正弦量的相位为反相。

1.2.2.5 角速度（角频率） ω

正弦交流电的交变速度可用周期和频率来表示，也可以用角速度 ω 来表示。

当线圈（图1-3）在时间 T 内旋转一周时，线圈感应的正弦交变电压为一周，线圈的任何一边（1边或2边）经历的角度是 360° 或 2π 弧度角，于是角速度便是

$$\omega = \frac{\text{经历的角度}}{\text{时间}} = \frac{2\pi}{T}$$

因 $T = 1/f$

故

$$W = 2\pi/T = 2\pi f \quad (1-3)$$

角速度 ω 又称角频率，通常以弧度/秒为单位，但“弧度”两字通常略去不写，因此角频率的单位写为1/秒。

式中 f —频率，单位为赫；

π —圆周率，是一个常数， $\pi = 3.1416$ 。

1.2.2.6 正弦交流电的有效值

如果把一个零点在刻度盘中间的电流表与一个灯泡串联，再接到交流电源上去。可以看到，灯是亮的，电流表指针在零点位置有轻微的抖动。这说明交流电电流的平均值为零。

给灯泡、电炉等供电既可使用直流电，也可使用交流电，两种类型的电流在这些用电器上都能产生热效应。

交流电的瞬时值是不断变化的。对于同一个用电器，多大的交流电流能产生同直流电流一样的作用呢？一般认为：如果交流电流 i 在一个电阻上产生的热效应，等于直流电流 I 在同样电阻上产生的热效应，即两种类型电流的热效应相等，则此时的交流电流 i 的大小与直流电流 I 的大小等效， I 的大小就是交流电流的有效值。

现在用图来表示电流在电阻 R 上产生热效应的电功。设电流在电阻上所做的功为

$$W = I^2 \cdot R \cdot t$$

为了便于图示，设 $R = 1$ 欧，时间 $t = T$ 秒（交流电1个周期）。

(1)直流电在电阻上做的功

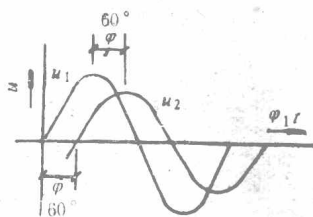


图 1-6 正弦量的相位差

图1-7中矩形面积 $I^2 \cdot T$ 表示直流电流 I 在时间 T 内在 $R=1$ 欧的电阻上产生热效应的电功。

(2) 交流电在电阻上做的功

图1-8中曲线与横坐标包围的面积 $i^2 \cdot T$ 表示交流电流 i 在时间 T 内在 $R=1$ 欧电阻上产生热效应的电功。

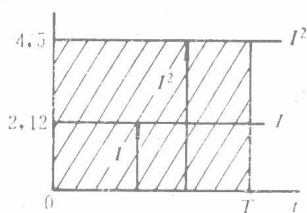


图 1-7 直流电的功

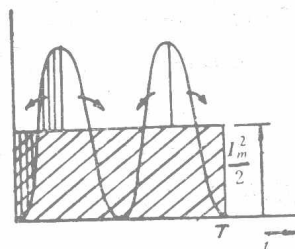
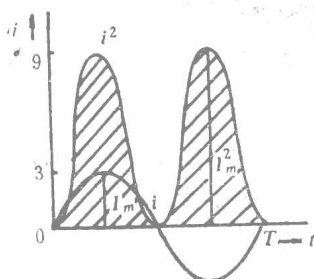


图 1-8 交流电的功

从曲线上可见，这个电功并不是均匀地完成的，而是在0和最大值 $I_m^2 \cdot R \cdot t$ 之间波动。为了找出其平均值，可把波动面积用填平补齐的办法变成一个简单的矩形。矩形面积为 $(I_m^2/2) \cdot T$ ，相当于交流电在一个周期 T 内完成的电功，而对应于直流电在时间 T 内完成电功的面积 $I^2 \cdot T$ 。

当交、直流电的热效应相同时，这两个面积相等，即

$$\frac{I_m^2}{2} \cdot T = I^2 \cdot T; \quad \frac{I_m^2}{2} = I^2$$

两边开平方，得正弦交流电流的有效值

$$I_{\text{有效}} = I = I_m / \sqrt{2} = 0.707 I_m \quad (1-4)$$

相应得正弦交流电压的有效值为

$$U_{\text{有效}} = U = U_m / \sqrt{2} = 0.707 U_m \quad (1-5)$$

式中 U 、 I 、 $U_{\text{有效}}$ 、 $I_{\text{有效}}$ 为正弦交流电压、电流的有效值； U_m 、 I_m 为正弦交流电压、电流的峰值。

或者

$$I_m = \sqrt{2} I = 1.414 I \quad (1-6)$$

$$U_m = \sqrt{2} U = 1.414 U \quad (1-7)$$

正弦交流电的有效值与峰值的关系如图1-9所示。

一般电气设备（如灯泡、电动机、变压器、电视机和洗衣机等）和仪器设备上所标的使用电压、电流数值都是有效值。用交流电表测得的电压、电流，除了特别说明之外一般也是有效值。

1.2.2.7 正弦交流电的功率

直流电路的电功率 $P=IU$ ，即直流电流与其电压的乘积。

在交流电路中，如果负载是纯电阻（例如白炽灯，电阻电炉等）时，交流电流所做的功率也按上式计算，只是 I 、 U 代表有效值。

当负载不是纯电阻（例如电动机等）时，电功率就不能按上式计算，而是

$$P=IU\cos\varphi \quad (1-8)$$

式中 I 、 U —交流电流、交流电压的有效值

$\cos\varphi$ —功率因数，其中 φ 是 I 与 U 的相位差， $\cos\varphi \leq 1$ ，其具体数值由负载的性质而定。

式(1-8)表明，交流电流流过不是纯电阻负载时，所做功率要减少。因为，这时电流 i 和电压 u 不同相（图1-10），由每个短时间阶段内的电功率叠加起来的总电功率就少了。

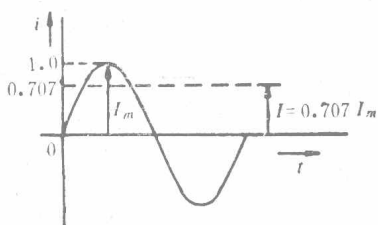


图 1-9 正弦交流电的有效值与峰值的关系

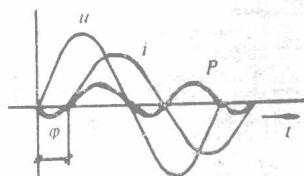


图 1-10 电流和电压不同相时的功

1.3 单相交流电与三相交流电

1.1.3 单相交流电与三相交流电的产生

单相交流电的产生已于1.2.1节中叙述。

三相交流电是三个单相交流电的组合。这三个单相交流电的频率相同，峰值相等，彼此间的相位差为 120° 。

三相交流电由三相发电机产生，其产生过程与单相交流电在原理上相同，都是根据运动感应原理，使导体和磁场作相对运动，在导体中感生电势（或电压），把机械能转变为电能。在结构上也与单相交流发电机基本相似，除小型发电机外，一般都是线圈绕组不动，磁极作旋转运动。图1-11是三相交流发电机的示意图，发电机的定子上有三个同样的绕组 AX 、 BY 、 CZ ，每一绕组是一相，三个绕组分别称为 A 相绕组、 B 相绕组和 C 相绕组。各相绕组在空间位置上相差 120° ，对称地嵌放在定子铁芯内侧的线槽内。三个绕组的几何形状、尺寸和匝数完全相同（实际上每一相绕组均匀分布在几个线槽内），三个绕组的始端（ A 、 B 、 C ）和末端（ X 、 Y 、 Z ）在空间位置上都分别相差 120° 。

转子上装设一对 N 、 S 磁极，磁性由直流电通过激磁绕组产生。当转子以角速度 ω 逆时针方向旋转，磁极转到正对 $A-X$ 绕组时， A 相电压（或电动势）达到峰值；等转子磁极转 $1/3$ 周（即 120° ）后， B 相电压才达到峰值。同样地， C 相电压也落后于 B 相电压 120° 的电角度。如此延续下去。

显然，三个相的电压（称相电压）的频率相同，峰值相等。若以A相电压的初相角为 0° ，则B相为 -120° ，C相为 -240° 。其瞬时值的函数式为：

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t \\ u_B &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= U_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

三相交流电的电压矢量图如图1-12(a)所示，其波形如图(b)所示。所以，磁场在三个空间位置互差 120° 的绕组中旋转时，绕组中就产生了相差 120° 电角度的三个正弦交流电压。这便是三相交流电压。

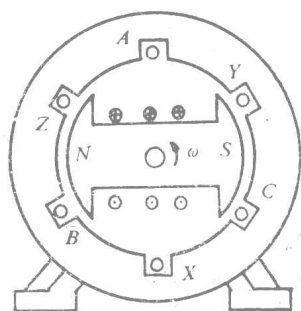


图 1-11 三相交流发电机示意图

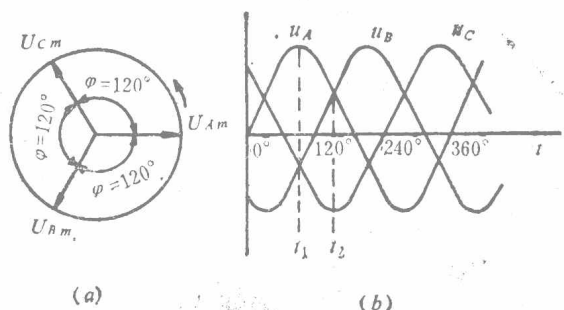


图 1-12 三相交流电
(a) 电压矢量图，(b) 波形图

1.3.2 三相电路的联接

一个三相交流电源（三相发电机）的三相电路的最原始接法是：每相引出两根导线接负载，共6根导线（图1-13），这是一种各相互不联接的三相线路。

由图1-12(b)中 t_1 和 t_2 时三相电压的瞬时值，可以看到，任一瞬间，三个相的电压大小不同，有正有负，其代数和等于零。因此，当各相的负载相等时，三相电流在任一瞬间的代数和也等于零。图1-13的电路便属于这种情况。因此，只要不发生短路，发电机的三个绕组就可作适当的联接。例如，图1-13中三个绕组的X、Y、Z端至负载三根导线的电流的代数和等于零，因此，这三根线可以合成一根，称中性线，甚至这根中性线可以拆去不要，这样既简单又经济。

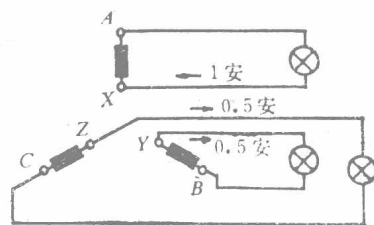


图 1-13 各相互不联接的三相线路

三相电路的联接有两种形式：星形联接（Y形接法）和三角形联接（ Δ 形接法）。

1.3.2.1 星形联接

如图1-14所示，发电机三绕组的末端X、Y和Z互相连结，连结点O称中点（中性点、星点）。从三个绕组的始端A、B、C及中性点O引出四根外线接至负载。因为这种供电系统中连接电源和负载的导线共有四根，故称三相四线制。其中性线就是零线。

图中 U_A 、 U_B 、 U_C 分别为A、B、C各相头对中性点的电压，称为相电压。 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 分别为外线A、B、C之间的电压，称为线电压。

这种接法的电压矢量图如图1-15所示，它似星形，故称星形联接（或Y接法）。

线电压与相电压的关系可从图1-14中看出，线电压是两个相电压之差，例如，

$U_{AB}=U_A-U_B$ 。不过，它们的瞬时值在不断变化，相位不同，不能用有效值或峰值作代数相减。但可以用波形相减，即把波 u_B 转 180° ，然后与相应的 u_A 波逐点相加。显然，这种方法比较麻烦。

如果只求线电压的有效值或峰值，可由矢量图求出，如图1-16所示。这时

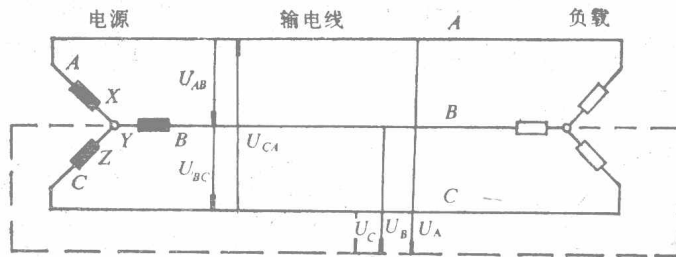


图 1-14 三相四线制线路

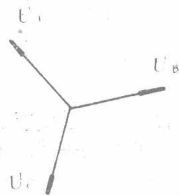


图 1-15 星形联接电压矢量图

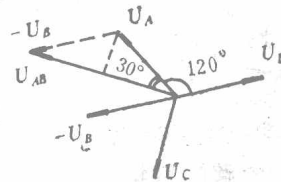


图 1-16 星形联接相电压与线电压的关系

$$\frac{1}{2} U_{AB} = \cos 30^\circ \cdot U_A$$

$$U_{AB} = 2 \cdot \cos 30^\circ \cdot U_A = \sqrt{3} U_A$$

同理

$$U_{BC} = \sqrt{3} U_B ; U_{CA} = \sqrt{3} U_C$$

写成一般公式 $U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}$

(1-10)

由以上分析可得出结论：发电机三相绕组作星形联接时，线电压的有效值等于相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，在相位上线电压较它对应的相电压超前 30° 。这时有两种电压可供负载使用。例如，对于380/220伏的三相四线制，有380伏的线电压（任何两线之间）和220伏的相电压（任何一线与中性线之间）。因为 $U_{\text{相}} = u_{\text{线}} / \sqrt{3} = 380 \text{ 伏} / \sqrt{3} = 220 \text{ 伏}$ 。

单相负载（小负载，如电灯、家用电器等）一般使用220伏电压；三相负载（大负载，如1千瓦以上电动机、电炉等）一般使用380伏电压。如图1-17。

三相电源每相绕组的电流或每相负载的电流叫相电流；而由电源向负载供电的每一条线路上的电流叫线电流。在星形联接的三相电路中，线电流就是相电流。当三相负载不平衡（即三个相的负载不相等，三个相的电流也不相等）时，在中性线上有“不平衡电流”。

1.3.2.2 三角形联接

把每一相绕组的末端与另外一相的始端联结, 即 X 与 B 联结, Y 与 C 联结, Z 与 A 联结, 则所有绕组串联成三角形线路(图1-18)。因矢量图的形状为三角形, 故称为三角形联接。

从每相的连接处引出一根线, 得到三根外线 A 、 B 、 C , 接至负载, 成为三线制供电线路(图1-19)。从图可以看出, 三角形联接线路中只有一种电压, 即线电压(相电压等于线电压)。但相电流不等于线电流。从图1-19的 A 点看相电流与线电流的关系, 可知线电流 I_A 等于相电流 I_{AB} 减去 I_{CA} , 即

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} = I_{AB} + (-I_{CA})$$

此式用矢量图表示如图1-20。图中, 把矢量 I_{CA} 倒转 180° , 然后与矢量 I_{AB} 相加, 得矢量 I_A , 即线电流 I_A 。

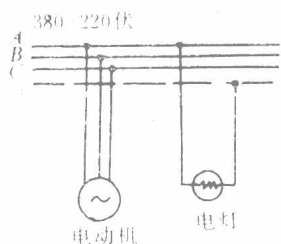


图 1-17 三相四线制线路同时供三相和单相负载

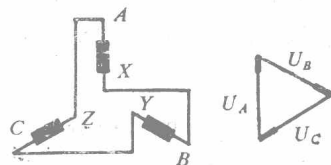


图 1-18 三角形联接电压矢量图

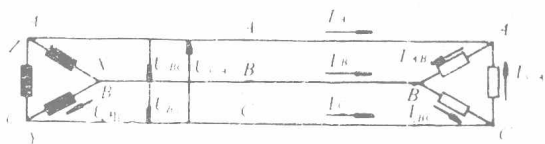


图 1-19 三相三线制线路

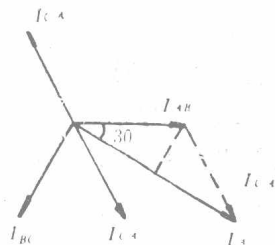


图 1-20 三角形联接相电流与线电流的关系

由图得 $\frac{1}{2} I_A = \cos 30^\circ I_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{AB}$

故

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB}$$

同理得

$$I_B = \sqrt{3} I_{BC};$$

$$I_C = \sqrt{3} I_{CA}$$

一般公式是:

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}}$$

综上所述, 三相对称负载作三角形联接时, 线电流的有效值等于相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍。在相位上线电流较它对应的相电流滞后 30° 。而线电压等于相电压。

原则上, 负载的联接方式不受电源接法的影响, 只要负载的额定电压与电源额定电压一致就可以连接。

1.3.3 三相交流电的功率

三相交流电总的有功功率 P 是三个相的有功功率 $P_{\text{相}}$ 之和。在负载对称时

$$P=3P_{\text{相}}$$

由式 (1-8) $P_{\text{相}}=U_{\text{相}} \cdot I_{\text{相}} \cdot \cos\varphi$

式中, $U_{\text{相}}$ 、 $I_{\text{相}}$ 为单相交流电相电压和相电流的有效值, $\cos\varphi$ 为功率因素。

因此 $P=3U_{\text{相}} \cdot I_{\text{相}} \cdot \cos\varphi$ (1-11)

测量相电流和相电压有时很不方便 (例如, 三相电动机绕组为三角形联接时, 要测量它的相电流就必须把绕组端部拆开), 故用线电压和线电流来表示较好, 即

星形联接

三角形联接

$$U_{\text{相}}=u_{\text{线}} / \sqrt{3}$$

$$U_{\text{相}}=U_{\text{线}}$$

$$I_{\text{相}}=I_{\text{线}}$$

$$I_{\text{相}}=I_{\text{线}} / \sqrt{3}$$

把两组数值分别代入 (1-11) 式可得到相同的结果, 即

$$P=\sqrt{3} u_{\text{线}} \cdot I_{\text{线}} \cdot \cos\varphi$$

可见, 星形联接与三角形联接的三相交流电的有功功率可用同样的公式计算。为了方便起见, 通常用 U 表示 $u_{\text{线}}$, I 表示 $I_{\text{线}}$, 于是有

$$P=\sqrt{3} UI \cos\varphi$$
 (1-12)

式中, P 、 U 、 u 、 I 的单位分别是瓦(W)、伏(V)、安(A),

三相交流电的视在功率和无功功率也可表示如下 (详1.4.6);

$$\text{视在功率} \quad S=\sqrt{3} UI \text{ (伏安)} \quad (1-13)$$

$$\text{无功功率} \quad Q=\sqrt{3} UI \sin\varphi \text{ (乏)} \quad (1-14)$$

1.3.4 三相交流电的优点

三相交流电与单相交流电相比, 具有以下主要优点:

(1) 节约输电线。通过星形联接或三角形联接, 三相交流电的输电无需使用6根线, 只用3根或4根就行了。同样, 制造三相发电机、变压器, 节省材料, 制造方便, 而且性能优越。

(2) 同时有两种电压可供使用。三相四线制输电时有相电压和线电压可供使用。

(3) 可产生旋转磁场。单相交流电如果不加电容器移相, 不能产生旋转磁场。而旋转磁场是使电动机旋转必不可少的。

1.4 正弦交流电路

1.4.1 线路电阻

1.4.1.1 电阻

导体中运动的载流子, 由于与导体材料的原子不断碰撞而受到阻碍, 导体对电流通过的这种“阻碍”称为电阻, 用符号 R 表示。

电阻的单位是欧姆 (简称欧), 用符号 Ω 表示。1欧的定义是: 如果在导体两端加上1伏的电压, 通过此导体的电流是1安, 那么, 这个导体的电阻值便是1欧, 即

$$1\text{欧}(\Omega) = \frac{1\text{伏(V)}}{1\text{安(A)}}$$

1.4.1.2 比电阻

导体的电阻与导体的材料和几何尺寸（长度和截面积）有关，截面积为1平方毫米且长1米的导体的电阻，称为比电阻，用符号 ρ 表示，其单位为欧·毫米²/米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

1.4.1.3 导线的电阻

实验证明，导线长度 l 越长、截面积 A 越小、材料的比电阻 ρ 越大，则导线的电阻 R 越大，即

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} (\Omega) \quad (1-15)$$

1.4.1.4 电导和电导率

电阻小的负载电流容易通过，即电导大，相反，电阻大则电导小。电导是电阻的倒数。

以 G 表示电导，其单位是西门子（简称“西”，用 S 表示），则

$$G = \frac{1}{R} (S)$$

电导率用 η 表示，是电阻率 ρ 的倒数，其单位是 $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ 则

$$\eta = \frac{1}{\rho}$$

1.4.1.5 电阻与温度

大多数材料的电阻值都多少受温度的影响，铜铝等金属的电阻值随温度升高而增大；碳的电阻值随温度升高而减少；康铜线的电阻值几乎不受温度变化的影响。

材料的这种特性通常以温度系数来表述。温度系数 α 表示温度升高 1°K （绝对温度）时1欧电阻的电阻值变化量。

如果某一导线在 20°C 时的冷态电阻值为 R_K ，温度系数为 α ，温度升高了 $\Delta\theta$ （单位为 $^\circ\text{K}$ ），则热态电阻 R_W 为：

$$R_W = R_K + \alpha \cdot \Delta\theta R_K = R_K(1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad (\Omega) \quad (1-16)$$

1.4.2 电路规律

1.4.2.1 欧姆定律

把一个电阻与电源（电压）联接成一个简单的闭合回路，电阻中便有一定的电流流过。改变电阻和电压的数值，观察电流大小的变化，可知：电流的大小与电阻成反比，而与电压成正比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{A}) \quad (1-17)$$

式中： I —电流强度；
 U —电压(V)；