

S

实用建筑工程系列手册

erial Handbooks of Building Construction

实用建筑 电工手册

陆荣华 编著

(第二版)

中国建筑工业出版社

实用建筑工程系列手册

实用建筑电工手册

(第二版)

陆荣华 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

实用建筑电工手册/陆荣华编著. —2版. —北京:
中国建筑工业出版社, 2005
(实用建筑工程系列手册)
ISBN 7-112-07087-2

I. 实… II. 陆… III. 建筑工程—电工—技
术手册 IV. TU85-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 138376 号

本手册从国家现行的规程规范着手, 对建筑电气工程安装施工技术和
施工要求作了通俗的、全面的叙述和介绍。主要内容有: 室内配线工程、
电气照明工程、架空配电线路、电缆线路、变配电工程、防雷接地工程、
高层建筑及公共民用建筑电气工程、智能化建筑电气工程及火灾自动报
警、消防联动控制系统、闭路电视、通信系统、计算机经营管理系统等的
安装和施工要求。还介绍了电工基础知识、电气安全技术和常用的电工材
料和仪表使用。

本手册是广大从事电气施工安装人员和电气工长日常工作实用的一本
工具书, 同时可供广大电气工程技术人员工作参考。

* * *

责任编辑: 刘 江
责任设计: 孙 梅
责任校对: 刘 梅 王金珠

实用建筑工程系列手册

实用建筑电工手册

(第二版)

陆荣华 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25 1/4 字数: 642 千字

2005 年 2 月第二版 2005 年 2 月第四次印刷

印数: 7501—11000 册 定价: 46.00 元

ISBN 7-112-07087-2

TU·6320(13041)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

第二版前言

本手册自1999年3月出版以来,受到了广大读者热忱的欢迎,尤其是工作在电气工程施工、安装第一线的电工师傅及技术管理人员把它作为随手翻阅的实用手册,笔者由衷的高兴和万分感谢。手册第二版除保持文字叙述通俗,内容紧密结合实际工作的特点外,将叙述内容更集中、紧凑。删除了与电气施工安装工作关系不多的内容,增加了第一版中未讲到的部分电气施工安装内容,对施工安装质量要求按现行的GB 50303—2002《建筑电气工程施工质量验收规范》作了较系统的编写。希望本手册第二版能继续得到广大读者支持。但由于新的电气设备不断涌现,笔者只能在技术要求上作重点叙述,设备的具体施工、安装方法就难以全部讲到,对这些设备只能请读者仔细阅读施工说明和产品说明书。本手册中如有不当之处,敬请广大读者帮助指正。对手册中参阅的文献作者致以崇高敬意和感谢。

2004.12

目 录

第一章 电工基础	1	§ 6-2 照明灯具安装	132
§ 1-1 单相交流电路	1	§ 6-3 照明配电箱安装	134
§ 1-2 三相交流电路	11	§ 6-4 照明开关安装要求	135
§ 1-3 常用电工仪表	15	§ 6-5 插座安装要求	136
§ 1-4 常用电工材料	25	§ 6-6 装饰灯具安装	137
第二章 高压电器及其安装	39	第七章 内外线施工	146
§ 2-1 高压开关及其安装调整	39	§ 7-1 架空配电线路工程施工	
§ 2-2 高压熔断器及其安装	50	及竣工验收	146
§ 2-3 互感器及其安装	52	§ 7-2 电缆线路工程施工及竣工验收	170
§ 2-4 电力电容器及其安装	58	§ 7-3 室内配线工程施工及竣工验收	180
第三章 低压电器及其安装	62	第八章 工厂变配电设备	
§ 3-1 低压开关及其安装使用	62	安装与调试	219
§ 3-2 低压熔断器及其安装	65	§ 8-1 电力系统概述	219
§ 3-3 接触器及其安装	67	§ 8-2 工厂变配电所接线	226
§ 3-4 主令电器及其安装	69	§ 8-3 工厂变配电所布置及设备	
§ 3-5 低压电器安装验收要求	72	安装验收	231
第四章 电力变压器及安装	73	§ 8-4 继电保护、自动装置及电气二次	
§ 4-1 油浸式电力变压器的结构	73	接线安装校验	241
§ 4-2 变压器工作原理	76	第九章 高层建筑及公共民用	
§ 4-3 电力变压器的技术参数	85	建筑电气安装	249
§ 4-4 电力变压器的安装	87	§ 9-1 高层建筑的电气安装	249
§ 4-5 电力变压器安装工程竣工		§ 9-2 公共及民用建筑的电气安装	251
验收及试运行	100	§ 9-3 电梯、自动扶梯和自动	
第五章 电动机及安装	102	人行道安装	271
§ 5-1 三相鼠笼式异步电动机工作原理 ..	102	§ 9-4 空调器安装	274
§ 5-2 三相鼠笼式异步电动机的控制	106	第十章 民用建筑火灾报警及	
§ 5-3 电动机和传动装置的安装与校正 ..	116	消防联动控制	278
§ 5-4 电动机的异常现象及处理	123	§ 10-1 民用建筑物防火等级分类	278
§ 5-5 电动机的保护装置	124	§ 10-2 火灾探测器及其安装	280
§ 5-6 电动机火灾预防	125	§ 10-3 消防联动控制	285
第六章 电气照明装置及安装	127	第十一章 爆炸和火灾危险场所电气	
§ 6-1 照明电光源	127	装置设计及安装	291
		§ 11-1 爆炸性气体场所电气装置	

设计 & 安装	291	附录 6 架空用裸导线安全载流量	384
§ 11-2 爆炸性粉尘环境电气装置		附录 7 导线穿钢管的标称直径选择表	385
设计 & 安装	295	附录 8 导线穿电线管的标称直径	
§ 11-3 火灾危险环境电气装置		选择表	385
设计 & 安装	297	附录 9 铅熔丝的额定电流	386
§ 11-4 爆炸和火灾危险场所电气		附录 10 架空裸铝线规格表	386
工程竣工验收	299	附录 11 三相 380V 低压架空线以送	
第十二章 防雷与接地装置安装	301	电距离选用裸铝线截面参考	
§ 12-1 防雷装置及其安装	301	表(一)	387
§ 12-2 接地装置及其安装	312	附录 12 三相 380V 低压架空线以送	
§ 12-3 接地电阻测量及降低接		电距离选用裸铝线截面参考	
地电阻的措施	317	表(二)	387
第十三章 施工现场临时用电	319	附录 13 三相 380V 铜芯导线和电缆	
§ 13-1 施工现场的安全要求	319	1A/km 的电压损失	387
§ 13-2 施工现场电气设备及供		附录 14 10~180kVA 配电变压器配	
电线路安装	320	用熔丝容量	388
第十四章 安全用电	334	附录 15 基本系列异步电动机的主要	
§ 14-1 人身触电预防	334	技术数据	388
§ 14-2 电气火灾预防	345	附录 16 Y 系列电动机起动、保护设备	
§ 14-3 触电急救	349	及导线选择	389
第十五章 建筑电气工程质量验收	353	附录 17 按环境选择导线、电缆及	
§ 15-1 基本规定	353	敷设方式	390
§ 15-2 电气工程安装质量要求	356	附录 18 常用电气设备及线路的绝缘电	
第十六章 智能建筑概述	370	阻标准	390
§ 16-1 智能建筑概念	370	附录 19 导线或线芯的允许长期工作	
§ 16-2 楼宇自动化	371	温度	391
§ 16-3 通信自动化	374	附录 20 按机械强度要求的导	
§ 16-4 办公自动化	376	体最小截面	391
§ 16-5 综合布线系统	377	附录 21 户内线路与管道、设备的安全	
§ 16-6 建筑物自动化系统电源及布线		间距	392
要求	378	附录 22 常用电缆的允许弯曲	
附录	380	半径倍数	392
附录 1 塑料绝缘线安全载流量	380	附录 23 油浸纸绝缘电缆最大	
附录 2 橡皮绝缘线安全载流量	381	允许高差	393
附录 3 低压油浸纸绝缘电缆直接埋地		附录 24 接闪器及其引下线的	
安全载流量	382	最小规格	393
附录 4 低压聚氯乙烯(PVC)绝缘四芯		附录 25 高压电气设备绝缘的交流耐压	
电缆安全载流量	383	试验电压标准	394
附录 5 低压橡皮绝缘四芯电缆安全		附录 26 绝缘油全分析试验项目	
载流量	384	和标准	394
		附录 27 安全标示牌式样	395
		附录 28 登高安全工具试验标准表	395

第一章

电工基础

§ 1-1 单相交流电路

一、概述

在直流电路中,电动势、电压、电流的大小和方向都不随时间的改变而变化。而在交流电路中,电动势、电压、电流的大小和方向都随时间作周期性的变化。这种大小和方向随时间变化而变化的电,我们称之为交流电。日常用的交流电,其大小和方向随时间按正弦规律变化,叫做正弦交流电,如图 1-1 所示。

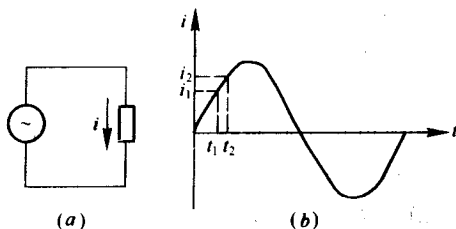


图 1-1 正弦交流电的正方向及其波形

交流电应用极其广泛,这是因为交流电比直流电具有许多优点,例如:对交流电可以利用变压器方便地将电压升高或降低,在进行远距离输电时变换为高电压,可以节省电能损耗,有效地将电能输送到远方;用户用电时变换为较低电压,这样能节省电气设备的投资费用,并保证安全用电。此外,交流鼠笼式异步电动机结构简单、价格便宜、运行可靠、维护方便,因此广泛应用于工农业生产中作为动力,完成电力拖动任务。照明、动力、电热等用电设备几乎都采用交流电,即使是某些非用直流电源不可的工业,如电解、电镀、城市交通电车、地铁等也利用整流设备将交流电转变为直流电。

交流电的大小和方向随时间在不断地变化,所以研究交流电时考虑的因素和计算分析要比直流电复杂得多。

二、描述交流电大小的物理量

由于交流电大小和方向随时间改变而不断变化,每时每刻其大小都不一样,方向也在不断变化,所以不能简单的用一个物理量描述它。描述交流电大小的物理量有:瞬时值、最大值、有效值、平均值。

1. 瞬时值

交流电在某一瞬时的数值,称为瞬时值。常用英文的小写字母表示,如电流用 i 、电压用 u 、电动势用 e 等。在波形图中某一点的纵坐标值,表示与横坐标对应时刻的瞬时值。例如在图 1-1 中, t_1 时刻的交流电的瞬时值为 i_1 ; 在 t_2 时刻的交流电瞬时值为 i_2 等。

2. 最大值

交流电的最大瞬时值,称为交流电的最大值。最大值又叫振幅值,常用英文大写字母

下角加“m”表示。例如交流电流最大值用 I_m 、交流电压最大值用 U_m 、交流电动势最大值用 E_m 表示。如图 1-2 中 E_m 即为交流电动势的最大值。

3. 有效值

交流电的瞬时值、最大值，都是指交流电在某一瞬间的数值，它们并不能反映出交流电在电路中的真实效果（如发光、发热等）。交流电的有效值就是从热效应的角度来描述交流电大小的物理量。

将直流电与交流电分别通过同一等值电阻，如果在相等时间内，二者在电阻上产生的热量相等，则此直流电的数值被称为交流电的有效值。也就是说，交流电的有效值，就是与它的热效应相等的直流值。

交流电的有效值常用英文大写字母表示。例如交流电流有效值用 I 、交流电压有效值用 U 、交流电动势有效值用 E 表示。

4. 平均值

交流电正半周期内，其瞬时值的平均数称为交流电的平均值。常用英文字母下角加“p”表示。如 i_p 、 u_p 、 e_p 分别表示交流电流、电压、电动势的平均值。

描述交流电大小的四个物理量：瞬时值、最大值、有效值、平均值之间有下列两个主要关系。以交流电流为例：

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad (1-1)$$

$$I_p = 0.637 I_m \quad (1-2)$$

式中 I ——交流电流有效值；

I_m ——交流电流最大值；

I_p ——交流电流平均值。

从式(1-1)可知：正弦交流电有效值等于最大值的 0.707 倍，有效值比最大值小。仪表读出的数值和我们平时讲的交流电大小通常都是指有效值。在选购设备、器件和工程中需考虑这个因素。

三、描述交流电变化快慢的物理量

前面已讲到交流电是大小、方向随时间变化而变化的。这就有一个变化快慢的问题，描述交流电变化快慢的物理量有：周期、频率、角频率。

1. 周期

交流电变化一次所需要的时间称为交流电的周期。单位是秒(s)。如图 1-1 所示的正弦交流电，它从零开始随时间增加逐渐增至最大值，然后逐渐减小到零，以后又反向增大到最大值，再逐渐减小回到零，这样整整变化了一周，以后按同样规律循环下去。交流电每循环一次所需要的时间即为交流电的周期。周期常用符合 T 表示。显然周期值越小，交流电变化越快，周期值越大，交流电变化越慢。

2. 频率

交流电的频率是指 1s 时间内交流电重复变化的次数。用字母 f 表示，单位是赫兹(Hz)，简称赫。如果某交流电在 1s 内变化了 50 次，则该交流电的频率就是 50Hz。比赫

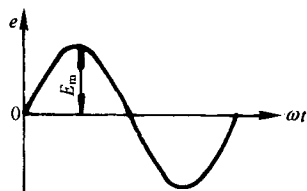


图 1-2 正弦交变电动势波形

兹大的常用单位是千赫(kHz)和兆赫(MHz) $1\text{kHz}=10^3\text{Hz}$ $1\text{MHz}=10^6\text{Hz}$ 。

我国发电厂发出的交流电的频率为 50Hz。这个频率为我国的工业标准频率,简称工频。一般的电力变压器、交流电动机、照明等电气设备都按取用 50Hz 的交流电来进行设计。

3. 角频率

交流电由交流发电机发出,从交流发电机原理可知,对于一对磁极的发电机,线圈转一圈(切割磁力线一圈),感应的交流电动势正好是一个周期。假如每秒钟线圈转的圈数越多,则交流电循环变化的次数越多,也就是交流电变化得越快。所以用每秒钟发电机线圈转过的角度也可来反映交流电变化的快慢。

角频率就是交流电每秒钟内变化的角度。常用 ω 来表示。这里的角度常用对应的弧度表示。因此角频率 ω 的单位是 rad/s(弧度/秒)。

一个圆周的弧度为 2π ,相当于角度 360° ,所以弧度与角度之间的换算关系为 $2\pi=360^\circ$ 或 $\pi=180^\circ$ 。例如: $\frac{\pi}{2}$ 弧度即为 90° ; $\frac{\pi}{6}$ 弧度即为 30° 等。

反映交流电变化快慢的几个物理量之间,有下列主要关系:

(1) 交流电的频率和周期之间是互为倒数关系:

$$T = \frac{1}{f} \text{ 或 } f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

(2) 交流电的频率与角频率之间存在下列关系:

$$\omega = 2\pi f \text{ 或 } f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1-4)$$

式中 ω ——交流电的角频率(rad/s);

f ——交流电的频率(Hz);

π ——圆周率(取 $\pi=3.14$)。

四、正弦交流电的表示方法

为了便于分析和研究交流电,人们经常用四种形式来表示一个正弦交流电。第一种形式是曲线图,即前面讲到的波形图,如图 1-1 表示;第二种形式是解析式,即用一个数学式子来表示交流电,例如 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$;第三种形式是矢量图(又称向量图),即用旋转矢量来表示交流电;第四种形式是用复数来表示交流电。下面对正弦交流电的解析式表示法先进行叙述。

所谓解析式表示法,就是用数学式子来表示正弦交流电。例如正弦交流电流的数学式子表示为:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-5)$$

式中 i ——正弦交流电流的瞬时值;

I_m ——正弦交流电流的最大值;

ω ——正弦交流电流的角频率;

φ ——正弦交流电流的初相角,即正弦交流电开始瞬间($t=0$)时的相位角;

$(\omega t + \varphi)$ ——正弦交流电的相位。

在式(1-5)中,如果知道了交流电的最大值 I_m 、角频率 ω 、初相角 φ ,就可以计算出

不同时间 t 时的交流电瞬时值 i ，从而可画出该交流电的波形图。所以把正弦交流电的最大值、角频率、初相角称为交流电的三要素。

两个交流电相位之差称为这两个交流电的相位差。例如有两个正弦交流电流： $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1)$ ； $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$ 。这两相交流电流角频率相同，初相角不同，则这两个交流电流 i_1 与 i_2 的相位差为 $\varphi_1 - \varphi_2$ ； i_2 与 i_1 的相位差为 $\varphi_2 - \varphi_1$ 。

在比较两个正弦交流电相位差时，必须注意两点：一是两个正弦交流电必须角频率（频率）相同，否则无法比较相位差；二是交流电 A 与交流电 B 的相位差，是将交流电 A 的初相角减交流电 B 的初相角；交流电 B 与交流电 A 的相位差是将交流电 B 的初相角减交流电 A 的初相角。假如减后得到的是负值，则表示该交流电相位上落后于另一交流电。例如： i_1 与 i_2 的相位差为 $\varphi_1 - \varphi_2 = 30^\circ - 60^\circ = -30^\circ$ ，这表示正弦交流电流 i_1 相位上落后正弦交流电流 i_2 30° 。

下面再叙述正弦交流电的矢量图表示法：

所谓矢量图（向量图）表示法，就是用一个在直角坐标中绕原点不断旋转的矢量来表示正弦交流电的方法。下面以正弦交流电动势为例来叙述用旋转矢量表示的方法。

假如正弦交流电动势 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，用旋转矢量表示的方法如下：

过直角坐标的原点“0”作一个矢量 E_m ，如图 1-3(a) 所示。用矢量的长度表示电动势的最大值 E_m ，矢量与横轴之间的夹角表示电动势的初相角 φ ，这个矢量以角频率 ω 绕原点“0”作逆时针方向旋转。

旋转矢量于任何时刻在纵轴上的投影，就等于正弦交流电在该时刻的瞬时值，如图 1-3(b) 所示。

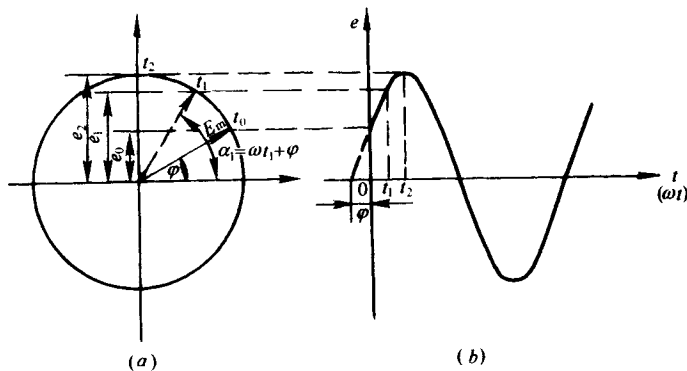


图 1-3 正弦交流电的旋转矢量表示法

从图 1-3 可看到：在 $t=0$ 时，旋转矢量在纵轴上的投影 $e_0 = E_m \sin \varphi$ 为起始时刻的瞬时值。经过时间 t_1 后旋转矢量与纵轴的夹角为 $(\omega t + \varphi)$ ，它在纵轴上的投影 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，即为 t_1 时刻交流电动势 e 的瞬时值。

在实际应用旋转矢量对交流电路进行分析计算时，常将几个同频率的正弦交流电画在同一矢量图中，由于所有矢量都以同一角速度旋转，所以它们的相对位置保持不变，也即各矢量之间的夹角始终等于它们的相位差。在矢量图上不标出角频率，而且实际应用的矢量图通常按初相角和有效值画出。矢量的长度表示有效值，有时在解决实际问题时较方便。

五、单相交流电路

交流电路由交流电源、负载、连接导线以及电路的控制、保护设备等组成。

电源是产生交流电的装置,交流发电机将机械能转换为电能,向负载供电。在电源的正弦交变电动势作用下,闭合电路就产生正弦交流电流。

负载是将电能转换为其他形式能量的用电设备,如电灯、电动机、电热器等。

在交流电路中,由于电流和电压能随时间变化,因此交流电路中的现象要比直流电路复杂。在交流电路中,元件除电阻起作用外,电感、电容都将起作用。

仅仅具有电阻的负载(如电灯、电阻炉等),在交流电路和直流电路中的作用一样,都是起着限制电流的作用,并把从电源取用的电能转换为热能。

如果负载是有线圈的(如电动机的线圈、日光灯的镇流器等),在直流电路和交流电路中的作用就有很大不同。在直流电路中,线圈虽然有电感,但是由于电流不随时间变化,不会产生自感电动势,影响电路电流的只是线圈中的电阻。而在交流电路中,因为电流时刻在变化,在线圈中始终有自感电动势产生,它反抗电流的变化,因此,影响电路电流不仅有线圈的电阻,还有线圈的电感。

电容在直流和交流电路中的作用也不同。在直流电路中,电路只在电容接入电路的瞬间有充电电流,充电完毕后,电路则处于断路状态。但在交流电路中,由于电压是时刻在变化,电容反复不断地进行充电和放电,在电路中一直有交变电流,电路总是处在通路状态。

由以上讨论可知,在交流电路中,不仅电阻会影响电路电流的大小,而且电感、电容对电路的电流也有影响。即交流电路中影响电流大小的参数有电阻、电感和电容三个参数。

如果电路中的某一参数对电路的影响较显著,其他两个参数的影响较小,可以忽略不计,这样的电路叫单一参数电路,如纯电阻、纯电感、纯电容电路等。实际电路中往往是几个参数同时作用。为了分析问题方便,下面首先分析单一参数电路的基本特点,然后在此基础上再分析三个参数同时作用的电路。

1. 纯电阻电路

分析正弦交流电路,主要是分析电路中电压和电流之间的关系(大小和相位),以及功率问题。

纯电阻电路就是电路中只有电阻,这种电路和直流电路基本相似。如图 1-4 所示。

(1) 纯电阻电路中电压与电流的关系

当在电阻 R 的两端施加交流电压 $u = U_m \sin \omega t$ 时,电阻 R 中将通过电流 i 。电压 u 与电流 i 的关系满足欧姆定律,即:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$$

公式中 $I_m = \frac{U_m}{R}$ 为电流的最大值。如用电流和电压的有效值表示,则有:

$$I = \frac{U}{R}$$

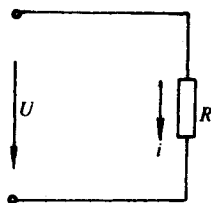


图 1-4 纯电阻电路

纯电阻电路中表示电压和电流的波形图如图 1-5(a)所示。

由上分析可知,对于纯电阻电路,当外加电压是一个正弦量时,其电流也是同频率的正弦量,而且电流和电压同相位。由此可见,电阻在交流电路中的作用是可以改变电流的大小,但不改变交流电流的频率和相位。

纯电阻电路中电压和电流的矢量图见图 1-5(b)所示。

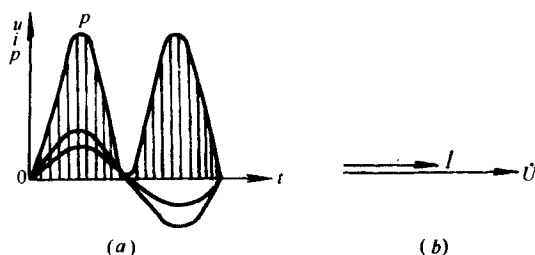


图 1-5 纯电阻电路电压、
电流和功率的波形及向量图

(2) 纯电阻电路的功率

在纯电阻电路中,电压的瞬时值与电流的瞬时值的乘积叫瞬时功率,用 p 表示。

$$p = u \cdot i$$

在图 1-5(a)中,将电压、电流在同一瞬时的数值逐点相乘,可画出如图 1-5(a)中的瞬时功率曲线。从曲线可看到 p 在任何瞬间都是正值或为零,这说明除 u 和 i 都等于零的瞬间以外,电阻始终在消耗电能。

由于瞬时功率 p 随时间不断变化,因此没有实际意义,且不易测量和计算,故通常用瞬时功率在一个周期内的平均值 P 来衡量交流电功率的大小,这个平均值 P 称做有功功率。

纯电阻电路中有功功率 P 可按下式计算:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

上式中: U 和 I 分别是交流电压和电流的有效值。

有功功率的单位是:瓦(W)或千瓦(kW)。

2. 纯电感电路

纯电感电路是电路中只有电感(电阻很小,忽略不计)。图 1-6(a)所示为由一个线圈构成的纯电感交流电路。

(1) 纯电感电路中电流与电压的关系

在纯电感电路中电流与电压的相位关系是:电流滞后于电压 90° ,或者说电压超前电流 90° 。波形图如图 1-6(b)所示。电流与电压的矢量图如图 1-7 所示。

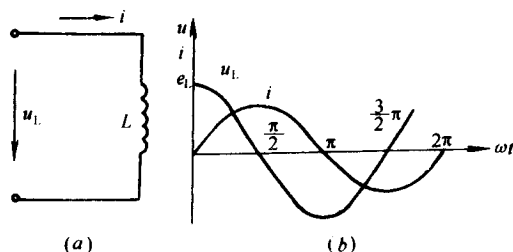


图 1-6 纯电感电路及其电压、电流波形

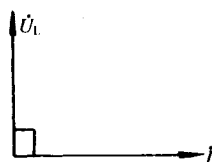


图 1-7 纯电感电路 U 、 I 相位关系

在电感电路中,电感 L 呈现出来的影响电流大小的物理量称为感抗,用 X_L 表示,单位为欧姆(Ω)。 X_L 按下式计算:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1-6)$$

式中 ω ——加在线圈两端交流电压的角频率(rad/s);

f ——加在线圈两端交流电压的频率(Hz);

L ——线圈的电感量, 当 L 单位是亨(H)时, X_L 的单位是欧姆(Ω)。电感量 L 的单位除亨(H)外, 还有毫亨(mH)等。

$$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$$

在按式(1-6)计算时, L 的单位一定要化为亨(H)代入, 这样计算出的 X_L 的单位才是欧姆(Ω)。

在纯电感交流电路中, 电流的有效值 I_L 等于电源电压的有效值 U 除以感抗。即:

$$I_L = \frac{U}{X_L} \quad (1-7)$$

上式中, 当 U 的单位是伏, X_L 的单位是欧姆(Ω)时, I_L 的单位是安培(A)。 I_L 称电感电流。

从上分析还可以看到, 感抗 X_L 的大小除与线圈电感量 L 大小有关外, 还与加在线圈两端的交流电源电压 U 的频率 f 有关。频率 f 愈高, 线圈感抗 X_L 愈大, 在相同电压作用下, 电路中的电流就愈小。

(2) 纯电感电路的功率

纯电感电路的瞬时功率为:

$$\begin{aligned} p_L &= u \cdot i = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_m \sin\omega t \\ &= U_m I_m \sin\omega t \cdot \cos\omega t = \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \end{aligned}$$

p_L 的变化曲线如图 1-8 所示。

从图 1-8 可以看到: 在第一和第三个 $1/4$ 周期内, p_L 是正值, 这表示线圈从电源吸取电能并把它转换为电磁能储存在线圈周围的磁场中, 此时线圈起着负载的作用。但在第二和第四个 $1/4$ 周期内, p_L 是负值, 这表示线圈把储存的磁能再转换为电能而送回电源, 此时线圈起着电源的作用。所以综上所述可知, 纯电感线圈时而“吞进”功率, 时而“吐出”功率, 在一个周期内的平均功率为零。所以平均功率不能反映线圈能量交换的规模, 因而用瞬时功率的最大值来反映这种能量交换的规模, 并把它叫做电路的无功功率, 用 Q_L 表示。

Q_L 的大小按下式计算:

$$Q_L = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L}$$

无功功率的单位为 var。当上式中: U 的单位为 V、电流 I 的单位为 A、感抗 X_L 的

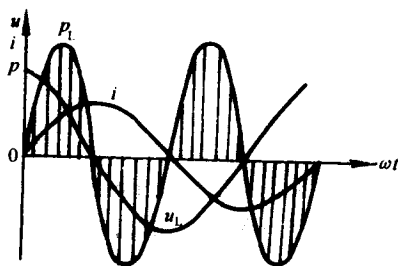


图 1-8 纯电感电路的功率曲线

单位为 Ω 时, 无功功率 Q_L 的单位为 var。

“无功”的含义是“交换”的意思, 而不是“消耗”或“无用”, 是相对“有功”而言的。

3. 纯电容电路

纯电容电路中只有电容(电阻、电感不考虑)。由于介质损耗很小, 绝缘电阻很大的电容器组成的交流电路, 可以近似看成纯电容电路。如图 1-9(a)所示。

(1) 纯电容电路中电流与电压的关系

在纯电容电路中电流与电压的相位关系是: 电流超前电压 90° 或电压滞后电流 90° , 其波形图如图 1-9(b)。电流与电压的矢量图如图 1-10 所示。

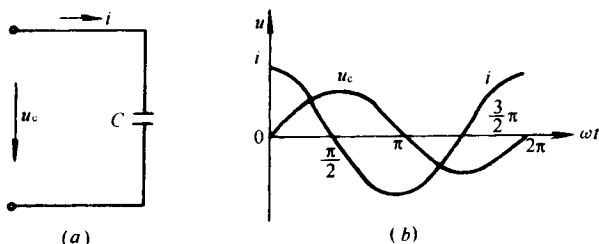


图 1-9 纯电容电路及其电压、电流波形

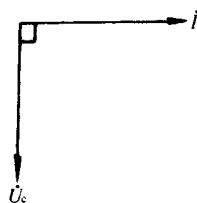


图 1-10 纯电容电路电压和电流相位关系

在纯电容交流电路中, 电容 C 呈现出的影响电流大小的物理量称为容抗, 用 X_C 表示, 单位是欧姆(Ω)。

容抗 X_C 的计算可按下式:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-8)$$

式(1-8)中, 假如电容 C 的单位是法(F), 则容抗的单位是欧姆(Ω)。电容的单位除法(F)外, 还有微法(μF)、微微法($\mu\mu\text{F}$)。

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\mu\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}$$

微微法又称皮法, 用 pF 表示。

在纯电容电路中, 电流的有效值 I_C 等于它两端电压的有效值 U 除以它的容抗 X_C , 即:

$$I_C = \frac{U}{X_C} \quad (1-9)$$

上式中, 当 U 的单位是伏、 X_C 的单位是欧姆(Ω)时, I_C 的单位为安培(A)。

(2) 纯电容电路的功率

纯电容电路的瞬时功率为:

$$\begin{aligned} p_C &= u \cdot i_C = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= U_m I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \end{aligned}$$

瞬时功率的变化曲线如图 1-11 所示。

从图 1-11 可看到：在第一和第三个 $1/4$ 周期内， p_c 是正值，表示此时电容器被充电，从电源吸取电能，并把它储存在电容器的电场中，此时电容器起着—个负载作用。而在第二和第四个 $1/4$ 周期内， p_c 是负值，表示此时电容器在放电，它把储存的电场能量又送回电源，此时电容器表现出电源的作用。所以在纯电容电路中，电容器也是时而“吞进”功率，时而“吐出”功率，电容器本身不消耗有功功率，在一个周期内的平均功率为零。为了衡量电容器和电源之间的能量交换规模，也是用瞬时功率的最大值来表示其交换规模大小，并称之为无功功率，用 Q_c 表示，单位也是乏(var)。

$$Q_c = UI_c = I_c^2 X_c = \frac{U^2}{X_c}$$

上式中，当 U 的单位是伏(V)、 I_c 的单位是安培(A)、 X_c 的单位是欧姆(Ω)时， Q_c 的单位为乏(var)。

4. 电阻、电感、电容串联电路

在实际的交流电路中，电阻、电感、电容都是同时存在，只是在不同的电路中，三个参数大小不同而已。电路中有连接导线和各个电器元件，它们就都有电阻；发电机、电动机、变压器、甚至照明设备中的镇流器等，都有线圈，有线圈就有电感；另外，导线与导线之间，导体与设备金属外壳之间都存在电容。所以实际交流电路中，电阻、电感、电容三个参数都将影响到电路中的电流大小和相位关系。下面以一个电阻、电感、电容同时存在，而且电感量大于电容量的串联交流电路来分析电路的特性。其电路示意图如图 1-12(a) 所示。

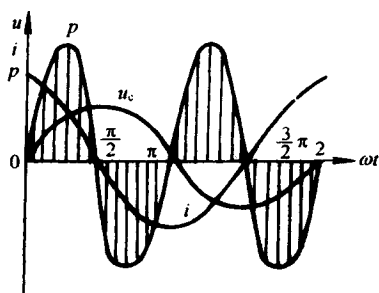


图 1-11 纯电容电路的功率曲线

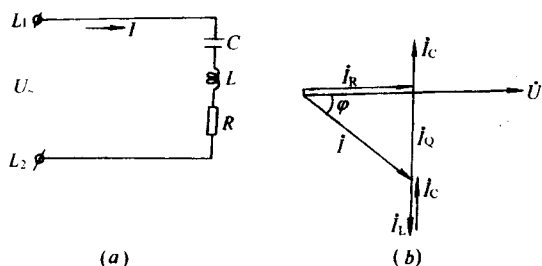


图 1-12 电阻、电感、电容串联电路

在电阻 R 、电感 L 、电容 C 串联的交流电路中， R 、 L 、 C 三个参数同时对电路中电流性能的影响，用物理量“阻抗”来表示。阻抗的符号为“ Z ”，单位为欧姆(Ω)。

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1-10)$$

式中 R ——交流电路中的电阻值(Ω)；

X_L ——交流电路中的感抗值(Ω)；

X_C ——交流电路中的容抗值(Ω)。

如前所述，上式中 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ (L 的单位为 H)； $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ (C 的单位为 F)。

在电阻、电感、电容串联的交流电路中，总电流的有效值 I 等于总电压的有效值 U

除以电路中的阻抗 Z 。即：

$$I = \frac{U}{Z} \quad (1-11)$$

上式中，当 U 的单位为伏(V)， Z 的单位为欧姆(Ω)时，电流 I 的单位为安培(A)。

交流电路中电压 U 和电流 I 之间的相位关系如图 1-12(b) 所示。

当交流电压加到电阻 R 上时，电阻电流 $\dot{I}_R$ 与电压 $\dot{U}$ 相位相同；交流电压加到电感 L 上时，电感电流 $\dot{I}_L$ 滞后于电压 $\dot{U}$ 90° ；交流电压加到电容 C 上时，电容电流 $\dot{I}_C$ 超前电压 $\dot{U}$ 90° 。电路中总电流 $\dot{I}$ 由这三部分电流合加而成。从图 1-12(b) 可看到 $\dot{I}$ 与 $\dot{U}$ 之间相位差角为 φ ，这个 φ 角称为功率因数角。而且把这个 φ 角的余弦 $\cos\varphi$ 叫做交流电路的功率因数。提高功率因数 $\cos\varphi$ 有很大好处。从图 1-12(b) 矢量图可以看到，提高 $\cos\varphi$ 就是要减小 φ 角， φ 角愈小，则表示 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_C$ 相加后得到的 $\dot{I}_Q$ (常称之为无功电流) 就愈小，而电路中总电流 $\dot{I}$ 由 $\dot{I}_R$ (常称之为有功电流) 与 $\dot{I}_Q$ 两部分组成。 I_Q 减小，使流过线路的电流 I 减小。流过线路的电流减小，就使线路上的电能损耗减小，所以提高功率因数可降低线路电能损耗、节约电能。另外，提高功率因数后，流过线路的电流减小，使线路上电压降也减小，这样在始端电压一定的情况下，可提高线路末端电压，提高供、用电的可靠性。我们知道，用电设备的安全可靠工作与电网电压有很大关系，如果电网电压太低，供电电压不符合质量则电动机的转矩将成平方减小，使电动机拖不动生产机械而过负荷，严重时还会烧毁电动机；照明设备、电热设备，当电压太低时，它们的工作效率将大大下降，日光灯等常用照明装置还会起辉不起来。所以提高线路末端电压，使供电电压符合质量标准，对保证设备工作安全、保证可靠用电有着很重要的意义。因此，供电部门要求用户功率因数能达到一定值，进行无功功率就地补偿。

从图 1-12(b) 矢量图可看出，要提高功率因数 $\cos\varphi$ 值，减小无功电流 $\dot{I}_Q$ ，其方法之一一是增大电容电流 $\dot{I}_C$ ，这样它与相位上相差 180° 的电感电流 $\dot{I}_L$ 相加后得到的无功电流 $\dot{I}_Q$ 就减小， φ 角就减小， $\cos\varphi$ 就增大。从式(1-9)可知，在外加电压不变情况下，要提高电容电流 $\dot{I}_C$ 可减小容抗 X_C 。又从式(1-8)可知，要减小 X_C 只要增大电容量 C ，而电容器是串联只数越多总电容量越小；并联电容器越多总电容量越大，所以可采用增加或减少并联电容器来达到增大或减小电路中电容量的目的。电容量 C 改变，容抗 X_C 也随之改变，电路中电容电流 $\dot{I}_C$ 也就随之改变，无功电流 $\dot{I}_Q$ 也随之改变，这样就可改变电路功率因数 $\cos\varphi$ 。但必须注意功率因数 $\cos\varphi$ 不能提高到等于 1，以防电路发生谐振产生过电压损坏电气设备。提高功率因数 $\cos\varphi$ 的其他方法这里不再叙述。

在电阻、电感、电容串联的交流电路中，功率有三种：有功功率 P 、无功功率 Q 和视在功率 S 。

有功功率 P 是电路中反映电阻上功率消耗的功率。单位是瓦(W)或千瓦(kW)。

无功功率 Q 是电路中反映电感、电容上能量交换规模的功率。单位是乏(var)或千乏(kvar)。

视在功率 S 是反映电路中总的功率情况。在实际应用中，常将它来定为设备的额定

容量,并标在铭牌上。例如变压器的额定容量就是指视在功率。视在功率的单位是伏安(VA)或千伏安(kVA)。

单相交流电路中的有功功率 P 、无功功率 Q 、视在功率 S 可按下列公式计算:

$$P=UI\cos\varphi \quad (1-12)$$

$$Q=UI\sin\varphi \quad (1-13)$$

$$S=UI \quad (1-14)$$

式(1-12)中 $\cos\varphi$ 是电路的功率因数,它可按下式计算:

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z} \quad (1-15)$$

式(1-15)中, R 是电路中的电阻值(Ω); Z 是阻抗值(Ω),可按式(1-10)计算。

式(1-13)中的 $\sin\varphi$ 是电路中功率因数角 φ 的正弦值。它可按下式计算:

$$\sin\varphi=\frac{X}{Z} \quad (1-16)$$

式(1-16)中 $X=X_L-X_C$ 称为电抗。如果电路的容抗 X_C 很小可忽略不计,则 $X=X_L$ 。电抗的单位也是欧姆(Ω)。

式(1-12)、(1-13)、(1-14)中, U 、 I 分别是电路电压和电流的有效值。

有功功率 P 、无功功率 Q 、视在功率 S 之间存在下列关系:

$$S=\sqrt{P^2+Q^2} \quad (1-17)$$

这三者之间关系可用直角三角形表示,如图 1-13 所示。称为功率三角形。

从图 1-13 功率三角形可看出,功率因数 $\cos\varphi$ 与功率之间的关系如下:

$$\cos\varphi=\frac{P}{S} \quad (1-18)$$

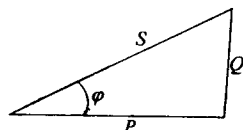


图 1-13 功率三角形

式(1-18)表示,电路中功率因数 $\cos\varphi$ 等于电路中有功功率 P 与视在功率 S 之比。这与前面对功率因数的分析是一致的,因为在图 1-12(b)矢量图中,假如对 I_R 、 I_Q 、 I 都乘以 U ,即变为图 1-13 功率三角形。

§ 1-2 三相交流电路

一、概述

1. 三相交流电的特点

上节讲的单相交流电路中的电源只有一个交变电动势,对外引出两根线。本节讨论的多相制电路,是在交流电路中有几个电动势同时作用,每个电动势的大小相等,频率相同,相位上相差一定角度。目前应用最广泛的是三相交流电路。这种电路有三个交变电动势,它们频率相同、相位上相互相差 120° ,由三相发电机产生。与单相交流电相比,三相交流电具有下列优点:

- (1) 三相发电机比尺寸相同的单相发电机输出的功率要大。
- (2) 三相发电机的结构和制造并不比单相发电机复杂多少,而且使用、维护也较方