

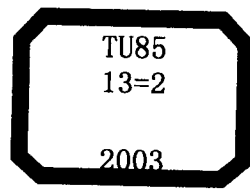
第2版

# 建筑电气技术

唐定曾 唐海 朱相尧 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 建筑电气技术

(第2版)

唐定曾 唐海 朱相尧 编著

机械工业出版社

本书根据教学大纲的内容并考虑在职建筑工程技术人员提高业务能力的需要,重点介绍了工程中常用的照明设备、控制设备、工程供电技术、施工管理技术、安全用电技术知识、工程质量管理及智能建筑电气知识等。

第一章简要介绍电工基础理论知识及国际通用的 TT、TN—C 及 TN—S 供电系统。第二章介绍常用低压控制设备和保护设备的特性及选型方法。第三章讲述建筑电气工程施工图知识,介绍了最新的电气图形符号及最新的符合国际惯例的标注方法。第四章介绍常用电光源的特点、光度学的基本概念、建筑工程照明器具的安装方式等。第五、六章介绍工程供电及临时供电技术,重点内容是负荷计算、供电导线截面的计算等。第七章主要介绍弱电系统中共用天线电视系统及电话系统图、主要元器件的性能、系统的简单设计与安装方法等。第八章及以后章节的内容主要讲述建筑施工管理技术、智能建筑电气及电梯等最基本的技术。

本书内容全部采用最新国标符号、新设备符号和新技术规程。内容适用范围比较宽,力求达到实用、适用、好用的目的。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑电气技术/唐定曾,唐海,朱相尧编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2003.3

ISBN 7-111-05350-8

I. 建… II. ①唐…②唐…③朱… III. 房屋建筑设备;电气设备 IV. TU85

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 011979 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策 划:边 萌 责任编辑:边 萌 版式设计:霍永明  
责任校对:李汝庚 封面设计:姚 毅 责任印制:施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 2 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$ ·24.75 印张·610 千字

29001—34000 册

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

## 第 2 版前言

由于建筑业将发展成为国民经济的支柱产业，因此，在培养技术骨干力量方面需要相应的教材。为了满足广大建筑专业大中专院校教学及在职建筑工程技术人员提高业务能力的需要，参照相关电气技术有关教学大纲，编写了这本综合性教材。

本书可作为大学、中专、职业高中有关专业学生的教材或在岗的工程技术人员参考书，亦可以作为“电气工长”、“电气工程概（预）算”培训班、上岗培训班“电气设备”、“工程供电”及“施工管理”等课程的综合教材。

本书的特点是文字简炼、图文并茂、深入浅出、理论联系实际。为了帮助学员考前复习，在每章后编写了重点题，并附有答案，所以也适合于自学。

本书由北京建筑工程学院唐定曾、清华大学建筑设计研究院唐海和北京市自来水集团禹通市政工程有限公司朱相尧共同编著。

# 目 录

## 第 2 版前言

## 第一章 建筑电气基础知识 ..... 1

第一节 电路的组成 ..... 1

第二节 基本定律 ..... 3

第三节 单相交流电路 ..... 4

第四节 功率因数及其改善的方法 ..... 9

第五节 三相交流电路 ..... 13

第六节 TT、TN—C 及 TN—S 供电系统 ..... 16

习题及答案 ..... 21

## 第二章 电气设备 ..... 24

第一节 动力设备 ..... 24

第二节 常用低压控制器及设备 ..... 30

第三节 熔断器 ..... 38

第四节 配电线路 ..... 41

第五节 导线截面的选择 ..... 48

习题及答案 ..... 50

## 第三章 电气施工图基础 ..... 54

第一节 电气施工图的基本知识 ..... 54

第二节 照明施工图 ..... 57

第三节 外线与动力工程施工图 ..... 62

第四节 开关插座线路 ..... 66

第五节 电视系统图 ..... 67

习题及答案 ..... 72

## 第四章 建筑照明设备 ..... 74

第一节 常用照明设备 ..... 74

第二节 光学基本知识 ..... 80

第三节 照明设计基础 ..... 82

第四节 照明设备安装 ..... 87

第五节 灯具电器安装常见缺陷 ..... 91

习题及答案 ..... 94

## 第五章 建筑工程供电系统 ..... 98

第一节 供电系统的组成 ..... 98

第二节 暂载率及其换算 ..... 104

第三节 利用系数法和二项式法确定  
计算负荷 ..... 108

第四节 低压配电系统和电力系统中性点  
运行方式 ..... 112

第五节 供电系统一次设备 ..... 116

第六节 变电所母线的主结线类型 ..... 122

第七节 继电保护装置 ..... 127

习题及答案 ..... 139

## 第六章 变配电所工程 ..... 145

第一节 变配电所的规划和形式 ..... 145

第二节 变配电所的布置 ..... 150

第三节 高低压配电设备的选择 ..... 155

第四节 变压器的选择和安装 ..... 158

第五节 组合式变电所(箱式变电站) ..... 163

第六节 变配电所防火 ..... 166

习题及答案 ..... 169

## 第七章 建筑物中的弱电系统 ..... 171

第一节 共用天线电视系统设备 ..... 171

第二节 共用天线电视系统的设计 ..... 178

第三节 共用天线电视系统的施工 ..... 189

第四节 电话系统 ..... 191

第五节 建筑防火系统及电气火灾原因  
分析 ..... 197

第六节 火灾探测器及其安装 ..... 206

第七节 火灾自动报警系统设计 ..... 209

习题及答案 ..... 213

## 第八章 线路设计与施工 ..... 215

第一节 线路的敷设 ..... 215

第二节 电缆配电线路 ..... 220

第三节 硬母线和滑触线的安装 ..... 224

第四节 室内电气设备的安装 ..... 232

习题及答案 ..... 236

## 第九章 建筑施工现场临时供电设计 ..... 240

第一节 临时供电的特点及电源容量的  
选择 ..... 240

第二节 临时供电平面设计 ..... 242

第三节 施工配电箱和开关箱 ..... 245

第四节 电动施工机械和手持电动工具 ..... 250

习题及答案 ..... 256

## 第十章 建筑电气施工组织设计与 管理技术 ..... 258

第一节	电气安装施工组织设计 .....	258	第三节	小康住宅建筑物自动化系统 .....	330
第二节	施工技术管理 .....	265	第四节	综合布线系统 .....	338
第三节	质量控制与管理 .....	269	第五节	综合布线系统实施安装 .....	342
第四节	竣工验收及技术档案管理 .....	276	习题及答案 .....	352	
习题及答案 .....	280		<b>第十三章 电梯安装工程 .....</b>	<b>357</b>	
<b>第十一章 建筑电气减灾技术 .....</b>	<b>283</b>		第一节	电梯及其控制方式 .....	357
第一节	安全用电技术 .....	283	第二节	电梯配电设计与安装概要 .....	361
第二节	建筑电气接地与接零保护 .....	286	第三节	电梯选型方法 .....	366
第三节	建筑工程的防雷技术 .....	293	第四节	电梯传动运输系统与自动扶梯 安装技术 .....	369
第四节	高层建筑的防雷技术及防雷 设计 .....	306	第五节	电梯安装技术 .....	373
第五节	漏电保护技术 .....	308	第六节	电梯的调试、安全使用和维护 保养 .....	379
习题及答案 .....	317		第七节	典型故障排除 .....	382
<b>第十二章 智能建筑电气技术 .....</b>	<b>321</b>		习题及答案 .....	386	
第一节	智能建筑的构成 .....	321	<b>参考文献 .....</b>	<b>388</b>	
第二节	楼宇自动控制系统及其安装 .....	326			

# 第一章 建筑电气基础知识

## 第一节 电路的组成

### 一、电路的作用及组成

所谓“电”，是指一种特殊的能量，称为电能，它能很方便地转换成其他种类的能量，如机械能、热能、光能、化学能等。欲进行电能的转换、传输和分配，必须把电气设备用导线连接起来，组装成电路才能实现。

电路是由电源、中间环节和负载组成的。中间环节是指导线、各种控制设备、保护设备、电缆等。电源是指发电机或变压器等。负载是指各种用电设备。所以电路是由一些元件和设备组合起来，完成某种功能的整体。

在电力及一般用电系统中，电路起着传输、分配和转换电能的作用。发电厂的发电机组把水的位能、煤的热能、原子能等转换成电能，经过升压后用高压输电线路把电能送到用电地区，再把电压降下来，供用户使用。

应该注意，在电路的分析和计算中，开始时直接对象不一定是实际的电气设备，而是理想化的模型（如电阻、电感和电容等），然后再落实到实际的电气设备，这样可以用较少的精力获取较系统的知识，也有利于提高分析同类其他问题的能力。本章的内容就是为了完成这一个过渡阶段而设置的。

### 二、电路的基本物理量

1. 电流 电路中的带电粒子（电子和离子）受到电源电场力的作用，形成有规则的定向运动称为电流。为了衡量电流的大小，引用电流强度这一物理量，在工程上简称电流。

一般情况下，电流的大小是随时间变化的，它是时间的函数，用符号  $i(t)$  表示， $i$  是瞬时电流。如果在一段时间内电流的大小不变，就称为恒定电流，简称直流。直流电流用  $I$  表示，单位为 A。电流的方向规定为正电荷运动的方向。

2. 电位 它表示电场中某一点位置所具有的电位能，用  $\varphi$  表示，单位为 V。要确定电位能的大小，必须选择一个参考点作为比较的标准，通常把电路中的接地点或线路公共点定为 0V，称为参考电位。电荷在电场内某点所具有的电位能也可以用电荷从该点到参考点时电场力所作的功来表示。

在外电路，规定当电流的方向是从高电位指向低电位时，方向为正，反之为负。在电源的内部，则是电流的方向从低电位指向高电位时，方向为正，反之为负。

3. 电压 它表示电源电场力对运动的电荷所作的功，电场力把单位正电荷从电路的  $a$  点移到  $b$  点所作的功称为  $ab$  两点间的电压，用  $U$  表示，单位为 V。辅助单位有 kV（千伏）、mV（毫伏）、 $\mu$ V（微伏）等。

$$U_{ab} = \frac{A_{\text{外}}}{Q}$$

式中  $A_{\text{外}}$ ——电场力把电荷  $Q$  从  $a$  点移到  $b$  点所作的功 (J);

$Q$ ——电荷量 (C);

$U_{ab}$ —— $a$ 、 $b$  两点之间的电压 (V)。

对于参考点零电位来说,  $a$  点的电位为  $\varphi_a$ ,  $b$  点的电位为  $\varphi_b$ , 所以,  $ab$  两点之间的电压, 也就是  $ab$  两点电位之差。因此, 电压也称电位差。

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-1)$$

电压的方向规定为从高电位指向低电位为正方向, 所以电压也称作电压降。

4. 电动势 为了表征在电源的内部对外力做功的本领, 引入电动势这一物理量。电动势定义为: 在电源内部, 外力把单位正电荷从电源负极移向正极所作的功称为电动势, 用  $E$  表示, 单位为 V。如果外力把 1C 电荷从负极移到正极, 所作的功就是 1V。电动势的方向是在电源内部从负极指向正极, 在电源外部是从正极指向负极。

$$E = \frac{A_{\text{外}}}{Q} \quad (1-2)$$

式中  $A_{\text{外}}$ ——局外力移动正电荷所作的功, 单位焦耳 (J);

$Q$ ——被移动的正电荷量, 单位库仑 (C)。

电动势的大小和方向都不随时间而变化的电源称为直流电源, 电动势的大小和方向随时间而作周期性变化的电源称为交流电源。

5. 电能 当电流通过电路时, 电路内将发生能量转换。在电源内部, 外力不断地克服电场力驱使正负电荷分别向电源两极移动而作功, 从而把其他能转换成电能。在外电路, 电荷不断地通过负载, 把电能转换成其他形式的能, 如光能、热能和机械能等。

负载消耗的电能等于其端电压与电荷的乘积, 电荷又等于电流和时间的乘积。即

$$A = UQ = IUt \quad (1-3)$$

6. 电功率 在单位时间内电路中产生的或者消耗的电能, 称为电功率, 简称功率, 用  $P$  表示, 单位为 W。

$$P = \frac{A}{t} = \frac{IUt}{t} = IU \quad (1-4)$$

式中  $P$ ——电功率 (W) ( $1\text{W} = 1\text{J/s}$ );

$t$ ——时间 (s)。

7. 电阻 电荷在导体内流动必然要受到导体内分子的阻力, 这种阻力称为电阻, 用  $R$  表示, 单位为  $\Omega$ 。

实验证明, 在一定温度下, 对某一种材料, 电阻  $R$  与其长度  $L$  成正比, 与其截面积  $S$  成反比, 即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ ——电阻系数 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )。

铜在  $20^\circ\text{C}$  时的电阻系数  $\rho_{\text{铜}} = 0.0172\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $\rho_{\text{铝}} = 0.029\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

### 三、电路的工作状态

电路在运行中只要导体内有电流通过, 导体就会发热, 若导体电阻  $R$ , 所消耗的电能全部变为热能  $Q$ , 经过时间  $t$ , 则其热量为



$$Q = I^2 R t \quad (1-6)$$

建筑工程中有些负载是利用导体热效应工作的，但是多数情况发热是有害的，影响设备的使用寿命。为此，对电路的三种工作状态分析如下。

1. 开路状态 当电路的开关断开时，称为开路。其特征是电流为零，电源端电压值就是电源两端的电动势。在检修线路时一般应在开路状态，这种状态电路不工作也不发热。

2. 短路状态 当电路中有电压的两点被电阻为零的导体连接时，称为短路。其特征是：电流往往很大，根据电流的热效应，导体所消耗的电能为

$$A = I U t = I^2 R t$$

若电阻消耗的电能全部转换成热能 ( $Q = I^2 R t$ )，会烧坏绝缘，损坏设备。也有利用短路电流产生的高温进行金属焊接的。

3. 额定工作状态 用电设备一般都规定有额定电流。额定电流是电气设备长时间工作所容许通过的最大电流，用  $I_N$  表示。当实际电流小于  $I_N$  时称为轻载、大于  $I_N$  时称为超载、等于  $I_N$  时称为满载。在满载时，也就是额定工作状态。有些设备不标出额定电流而标出额定电压，即  $U_N$ ，或标出额定功率，即  $P_N$ 。

## 第二节 基本定律

### 一、欧姆定律

导体中电流  $I$  的大小与加在导体两端电压  $U$  成正比，而与导体的电阻  $R$  成反比。这个关系称为欧姆定律。欧姆定律是计算电路的最基本定律。欧姆定律有两种表达方式。

1. 一段无源电路的欧姆定律 闭合回路中的一段电路，如果不含电动势，仅有电阻，那么这段电路就被称为一段无源电路，其电量关系式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

2. 全电路的欧姆定律 图 1-1 是一简单的闭合回路， $R_0$  是电源内阻， $R_1$  是线路电阻， $R$  是负载电阻。根据式 (1-7) 可知电源内阻上的压降为  $U_0 = I R_0$ ，供电线路上的电压降  $U_1 = I R_1$ ，负载上的电压降为  $U = I R$ ，所以

$$E = U + U_1 + U_0 = I R + I R_1 + I R_0$$

或 
$$I = \frac{U}{(R + R_1 + R_0)} \quad (1-8)$$

这个关系称为全电路的欧姆定律。通常电动势  $E$  和内阻  $R_0$  可视为常数，因此，负载的电压降与线路电阻及负载总电流有关。当负载是由多个电阻并联时，用电电流越大，则线路  $R_1$  上的电压损失也越大，因此负载  $R$  得到的电压越小。

**【例 1-1】** 已知电源电动势为 100V，内阻为 0.5Ω，负载是两个 48Ω 的电阻相并联，线路电阻为 0.5Ω，如图 1-2 所示。求①负载短路电流；②正常时工作电压和线路损耗电压；③若切断一个负载电阻，后果如何？

解：① 短路电流  $I_k = 100V \div (0.5 + 0.5)\Omega = 100A$

② 负载总电阻为  $48\Omega \div 2 = 24\Omega$ ，回路总电阻为 25Ω

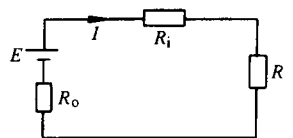


图 1-1 全电路的欧姆定律示意图

负载电压  $U = 100\text{V} - (100\text{V} \div 25\Omega) \times (0.5 + 0.5)\Omega = 100\text{V} - 4\text{V} = 96\text{V}$

线路损耗电压为  $4\text{V}$ 。

③ 并联电路中切除一个电阻后，负载总电阻变大，线路电流变小，线路损耗电压变小，负载得到的电压升高。所以在建筑工程施工中可利用这个原理，切断一部分次要负荷，以改善负载过低的电压。

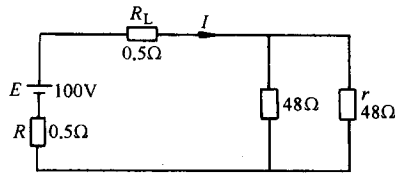


图 1-2 例 1-1 图

## 二、基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫第一定律 它也称为节点电流定律。当多个电流经过其公共节点时，流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和，即

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}} \quad (1-9)$$

如图 1-3 中所示， $I = I_1 + I_2$

2. 基尔霍夫第二定律 它也称为回路电压定律。沿任何一个闭合回路所升高的电位，必定等于沿此回路所降低的电位，即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-10)$$

由图 1-4 左回路可知， $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$

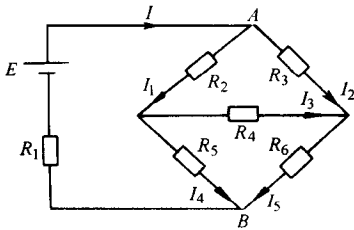


图 1-3 基尔霍夫第一定律示意图

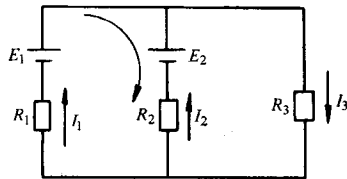


图 1-4 基尔霍夫第二定律示意图

利用上面的几个定律，可以分析供电线路中出现的一些现象和问题。综合应用基尔霍夫两定律可以计算复杂电路的电流或电压。

## 第三节 单相交流电路

现代电子技术中，电能的产生、输送、分配和使用几乎都采用交流电。如果有的地方需要使用直流电，就需通过整流设备把交流电整流成为直流电。交流电最重要的特征是电流、电压的大小和方向随时间作周期性的变化。实用电网中使用的是电流和电压按正弦规律变化的交流电。

### 一、正弦交流电的特征

根据电磁感应原理，交流发电机发出的电动势波形如图 1-5 所示。从图中可看出以下表征交流电的方法与交流电的基本特点。

1. 交流电的周期与频率 交流电的周期与频率是表征交流电变化快慢这一特征的。交流电变化一周所用的时间称为周期，用  $T$  表示，单位为  $\text{s}$ （秒）。交流电在每一秒钟内所变化的周期数称为频率，用  $f$  表示，单位为  $\text{Hz}$ （赫兹）。

周期与频率的关系：从其定义可知它们互为倒数的关系，即

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-11)$$

我国交流电的工业频率（工频）为 50Hz，变化时间  $T = 1/f = 0.02\text{s}$ 。有的国家或地区的频率用 60Hz。交流电变化的快慢，还可以用角速度  $\omega$  来表示，或称作角频率。交流电变化一周，也就是变化了  $2\pi\text{rad}$ （弧度）。所以，角频率为（rad/s）为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-12)$$

工频 50Hz 时  $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{rad/s} = 100\pi\text{rad/s} = 314\text{rad/s}$ 。

2. 交流电最大值 交流电在一个周期中所出现的最大瞬时值称为最大值，或称幅值。它表示交流电大小的特征，如  $E_m$ 、 $U_m$ 、 $I_m$  分别表示电动势、电压、电流的最大值。

3. 相位与相位差 相位是表示交流电变化状态的物理量，也称相位角，它表示交流电在某一瞬间所变化的电角度。通常可以把交流电变化一周视为  $360^\circ$  电角度。如果开始观察交流电时，它已经变化了  $\varphi_0$  角度， $\varphi_0$  称为初相角。交流电以电角速度  $\omega$  经过  $t$  秒时所变化的电角度  $\alpha$  为

$$\alpha = \omega t + \varphi_0 \quad (1-13)$$

当两个同频正弦交流电相比较时，它们的相位角之差称为相位差，用  $\varphi$  表示。如图 1-6 所示，其相位差为

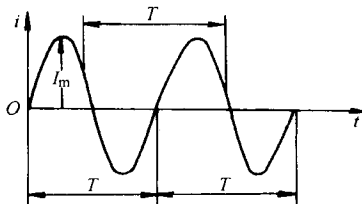


图 1-5 正弦交流电的特征

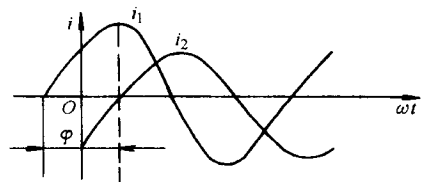


图 1-6 相位与相位差

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 60^\circ - (-30^\circ) = 90^\circ$$

上式表明这两个交流电在任何时刻的相位角之差为  $90^\circ$ 。从图 1-6 中还可看出两个交流电的相位差也就是其初相角之差。

如果两个交流电相比较，它们的相位差为零，则称它们为同相。若相位差为  $180^\circ$ ，则称为反相。若其中一个先达到零值的称为超前，后达到零值的称为滞后。图 1-7 中  $i_1$  超前于  $i_2$ ， $i_2$  滞后于  $i_1$ 。超前或滞后之相位差均应小于  $180^\circ$ 。

频率、最大值和相位角是正弦交流电的主要特征，称为正弦交流电的三要素。

## 二、正弦交流电的表示方法

正弦交流电的表示方法有三角函数表示法、正弦曲线表示法、极坐标表示法和相量表示法等。相量表示法的特点是便于分析问题，所以，本节只介绍为做定性分析用的相量表示法。而交流电的大小也需要有一个确定的数来表示才方便，因而提出有效值的概念。

1. 有效值 正弦交流电的大小是不断变化的，所以画图、计算等均不方便。为此，实用中采用有效值表示。有效值的定义为：正弦交流电通过一个电阻，在一个周期内所发出的热量，与一个直流电通过同一个电阻，在相同时间内所发出的热量相等时，这个直流电的数

值就是正弦交流电的有效值。正弦交流电的有效值用  $U$ 、 $I$  分别表示其电压和电流。

有效值和最大值的关系为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (1-14)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1-15)$$

实用中，计算和电工测量都采用有效值来表示交流电的大小。电动机和电器设备的铭牌电压或电流数值也都是用有效值来表示。

2. 相量表示法 正弦交流电的表示法主要是表示出交流电的三要素。相量表示法是用箭头方向代表初相角，用箭线长度代表有效值的大小。至于角速度可以在这个相量旁标出，但是我们所研究的交流电都是工频，因此也就不必表示角速度了。如图 1-7 所示，从图中可见  $I_2$  导前  $I_1$   $60^\circ$ 。不同电量之间的相位关系都可以用相量表示法表示。用相量图还可以进行相同电量的加、减。

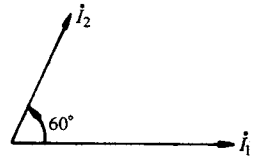


图 1-7 相量表示法

### 三、负载的性质

交流电路中负载用电抗  $X$  表示。电抗是由三个负载参数组成的，它们是电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$ 。严格地讲，这三种参数分布在整个电路中。负载的性质就是由这三种参数决定的。

1. 纯电阻性质负载 负载由电阻构成，如白炽灯、电炉等可以近似视为纯电阻性质的负载。其主要特点如下。

(1) 电压与电流同相位，即相位差为零 如图 1-8 所示是理想状态下的纯电阻电路。

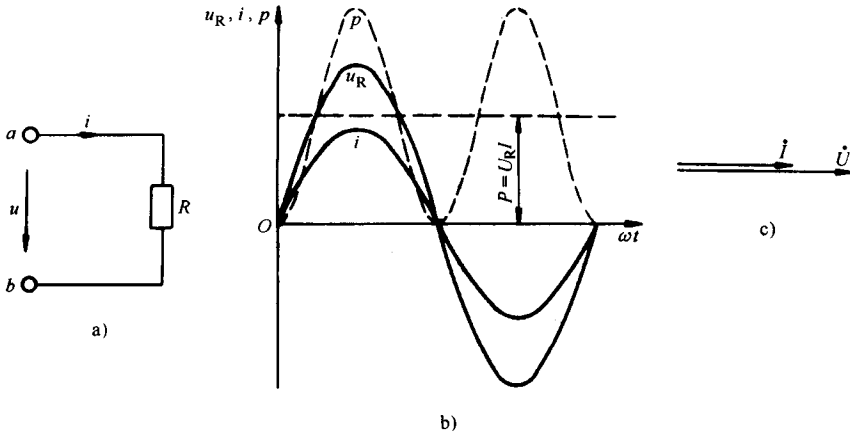


图 1-8 纯电阻电路

a) 电路图 b) 电流、电压及功率曲线 c) 相量图

(2) 电压与电流的关系  $I = U/R$ ，即与直流电路欧姆定律形式相同。

(3) 电功率 从图 1-8b 可看出其功率为正，表示把电能都转换成了其他形式的能。可证明其平均功率为

$$P = U_R I \quad (1-16)$$

2. 纯电感性负载 负载由线圈构成。在研究由感性负载构成的交流电路时,为简化起见。把以电感参数为主,其他参数小到可以忽略的程度时的电路,视为纯电感电路,其主要特点如下。

(1) 电流与电压的相位关系 由于线圈通入交流电后会产生自感电动势,其方向总是企图阻止电流的变化,结果电流相位滞后电压 $90^\circ$ 相位角。如图 1-9 中 b、c 所示。

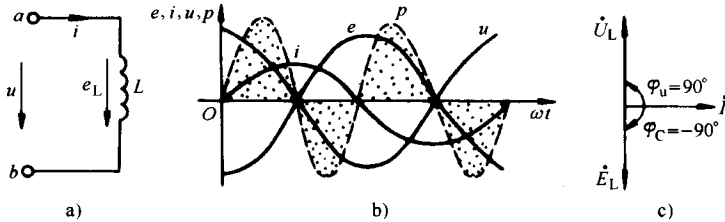


图 1-9 纯电感电路

a) 电路图 b) 电流、电压、功率曲线图 c) 相量图

(2) 电流与电压的大小关系 用数学分析可知电压 $U_L$ 、电流 $I$ 、电感 $L$ 、角速度 $\omega$ 的关系为

$$U_L = I\omega L \text{ 或 } I = \frac{U_L}{\omega L} = \frac{U_L}{X_L} \quad (1-17)$$

式(1-17)表明:当电压一定时,电流 $I$ 与 $\omega L$ 成反比, $\omega L$ 对电流起着阻碍作用,称为感抗,用 $X_L$ 表示,单位为 $\Omega$ 。

$$\text{工频时} \quad X_L = \omega L = 2\pi fL = 314L \quad (1-18)$$

式中  $X_L$ ——感抗( $\Omega$ );

$L$ ——自感(H);

$\omega$ ——角速度(rad/s)。

式(1-18)是纯电感电路的欧姆定律表示式,电流的大小与电压成正比,与感抗(或频率)成反比。当电压 $U$ 和自感 $L$ 一定时,频率越高则电流越大。如果把线圈接入直流电源,直流电频率为零,这时感抗为零,所以把线圈接入直流电源可视为短路。同样,电感 $L$ 越大,产生自感电动势的能力越强。因此电感元件的无功功率为:

$$Q = IU_L = I^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L} \quad (1-19)$$

3. 纯电容负载 当负载参数只有电容 $C$ ,其他参数都小到可以忽略的程度时,就可称为纯电容负载,如纯电容器组成的电路。纯电容电路主要特点如下。

(1) 电流与电压的相位关系 电容器通入交流电会产生充放电现象,电流总是超前电压 $90^\circ$ 电角度,如图 1-10 所示。

(2) 电流与电压的大小关系 用数学分析可知电流 $I$ 、电压 $U$ 、角速度 $\omega$ 、电容 $C$ 的关系为

$$I = U_C\omega C \text{ 或 } I = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_C}{X_C} \quad (1-20)$$

$X_C$ 称为容抗,它与电流成反比,单位为 $\Omega$ 。式(1-20)即为纯电容电路的欧姆定律。

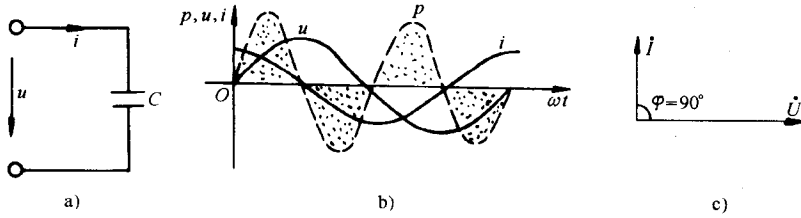


图 1-10 纯电容电路

a) 电路图 b) 曲线图 c) 相量图

在工频时，容抗为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314C} \quad (1-21)$$

上式表明，电容  $C$  与容抗成反比。

### (3) 功率关系

1) 瞬时功率 瞬时功率  $p = iu$ ，将各瞬时的电流和电压相乘而得瞬时功率，由图 1-10b 瞬时功率曲线可知，其功率有正负之分，“正”表明负载从电源吸取电能，并转换为电容器的电场能，“负”表明负载将电场能返还给电源。而且，各周期中正负相等，瞬时功率平均值为零。

2) 有功功率 即平均功率，用  $P$  表示。从瞬时功率曲线图或数学推导都可得知有功功率等于零，即

$$P = 0$$

3) 无功功率 纯电容负载虽然不消耗电源功率，但是却占用了电源功率进行“吞吐互换”。为了衡量吞吐能量的情况，引入了无功功率的概念，即电流与电压有效值之积称为无功功率，用  $Q$  表示。单位为 var，即乏，kvar 为千乏。

$$Q = IU_C = I^2 X_C = \frac{U_C^2}{X_C} \quad (1-22)$$

因此，电容和电感一样都称为无功元件。

4. 电阻、电感串联电路 平常使用的许多负载，含有电阻和电感两种主要参数，其电路可等效为电阻、电感串联电路。其主要关系如下。

(1) 电流和电压的相位关系 如图 1-11 所示，用数学分析可知总电压  $U$  等于电压  $U_L$  和电压  $U_R$  的相量和。如果以总电压为参考相量画于水平位置，则电流  $I$  与电压  $U_R$  同相，且滞后于电压  $U$  一个  $\varphi$  角，如图 1-11c 所示。

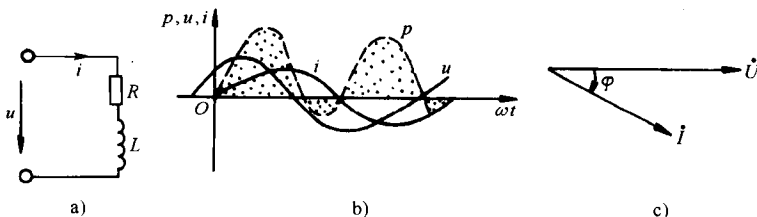


图 1-11 R-L 串联电路

a) 电路图 b) 曲线图 c) 相量图

(2) 电流与电压的关系 用数学分析可知, 电压

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ \quad (1-23)$$

或

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

式中  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  称为阻抗 ( $\Omega$ )。

式 (1-23) 是电阻、电感串联电路的欧姆定律表示式, 电流的大小与电压成正比, 与阻抗成反比。

(3) 功率关系

1) 瞬时功率 瞬时功率  $p = iu$ , 将各瞬时的电流和电压相乘而得瞬时功率, 如图 1-11b 瞬时功率曲线可知, 其功率有正负之分, “正”表明负载电阻消耗电能及电感线圈从电源吸取电能变为磁场能, “负”表明负载将磁场能返还给电源。而且, 各周期中正负不相等, 正大负小, 故瞬时功率平均值不为零。

2) 有功功率 即平均功率, 用  $P$  (W) 表示。由数学推导可得知: 有功功率等于电流有效值  $I$  在电压有效值  $U$  方向上的投影与电压  $U$  的乘积, 即

$$P = IU \cos \varphi \quad (1-24)$$

或

$$P = I^2 R = IU_R$$

由电压关系可知  $U_R = U \cos \varphi$

3) 无功功率 电阻、电感串联负载既消耗电源功率, 又占用了电源功率, 故无功功率  $Q$  (var) 即电流和电压的无功分量的乘积, 即

$$Q = IU_L = IU \sin \varphi = I^2 X_L \quad (1-25)$$

4) 视在功率 电阻、电感串联负载既消耗又占用电源功率, 电流、电压有效值之乘积称为视在功率。用  $S$  (VA) 表示。单位为 VA 或 kVA。

$$S = IU = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1-26)$$

在电气工程中, 变压器的容量就是用视在功率 (kVA) 表示的。

**【例 1-2】** 一个电感线圈,  $L = 25.5\text{mH}$ , 电阻  $R = 6\Omega$ , 接于电压 220V, 求电路中的电流  $I$ 、平均功率和视在功率, 并画出电压、电流相量图。

解

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 25.5 \times 10^{-3} \Omega = 8\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} \Omega = 10\Omega$$

根据欧姆定律

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\text{V}}{10\Omega} = 22\text{A}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0.6$$

平均功率

$$P = IU \cos \varphi = 22\text{A} \times 220\text{V} \times 0.6 = 2904\text{W}$$

#### 第四节 功率因数及其改善的方法

交流用电设备中, 感性负载比较多, 如电动机、日光灯、变压器等。它们在运行中电流总是滞后电压一个  $\varphi$  角, 这个相位角影响重大, 简述如下。

## 一、功率因数

1. 功率因数的定义 由于感性负载电流滞后电压  $\varphi$  角, 所以进行功率计算时, 需要把电流相量投影到电压相量方向上去 (如果以电压相量作为参考相量), 因此出现一个  $\cos\varphi$ , 这个相位差角  $\varphi$  的余弦称为功率因数。功率因数也可以定义为有功功率  $P$  和视在功率之比, 即

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1-27)$$

2. 功率因数的大小 根据负载的性质决定功率因数的大小, 当负载为纯电阻时, 电流和电压的相位差角为  $0^\circ$ , 所以  $\cos\varphi = 1$ ; 当负载为纯电感时, 电流和电压的相位差角为  $90^\circ$ ,  $\cos\varphi = 0$ ; 当负载为纯电容时, 电流和电压的相位差角也是  $90^\circ$ ,  $\cos\varphi = 0$ ; 而感性负载 (相当于电阻和电感串联负载),  $\cos\varphi$  在 0 和 1 之间, 如图 1-12 所示。

感性负载三个电压相量 ( $U$ 、 $U_L$ 、 $U_C$ ) 的关系, 可称为电压三角形。把电压三角形的三个边缩小  $I$  (电流) 倍, 而得到阻抗  $Z$ 、感抗  $X_L$ 、电阻  $R$  之间的关系, 称为阻抗三角形。把电压三角形的三个边扩大  $I$  (电流) 倍, 而得到视在功率  $S$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  之间的关系, 称为功率三角形。从而得到功率因数大小的关系式, 即

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U} = \frac{P}{S} \quad (1-28)$$

不同性质负载的功率因数不同, 也就是它们的电流与电压相位差角不同, 如以电压为参考量画在水平坐标方向, 有两个感性负载功率因数角分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 如图 1-13 所示。可见, 在单相并联的许多负载, 若功率因数不同, 则它们的总电流不能直接用算术和相加, 而是用相量加法相加。

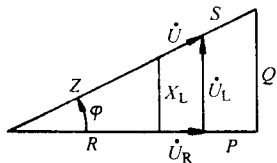


图 1-12 阻抗、电压、功率三角形

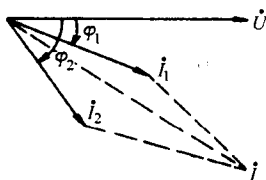


图 1-13 不同性质负载电流相加

例如居民用电有白炽灯电流为 0.45A, 日光灯电流为 0.35A, 其电流之和不是 0.8A, 而比 0.8A 小。

从功率关系中还可以看出, 各种不同性质负载从电源取用的有功功率可以直接代数相加求和, 但是多个不同性质负载的视在功率之和是不能直接用代数相加的。

【例 1-3】某教学楼一个照明支路有 10 只 40W 的日光灯 (实用中包括镇流器, 按 50W 计算), 电压为 220V, 测得总电流为 3.55A。求该支路的视在功率和功率因数是多少?

解 ① 视在功率为  $S = IU = 3.55\text{A} \times 220\text{V} = 781\text{VA}$

$$\text{② } \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{50\text{W} \times 10}{781\text{VA}} = 0.64$$

## 二、改善功率因数的意义

改善功率因数有重要的现实意义, 功率因数高则有下列好处。

1. 可以充分利用电源的容量 由于发电机或变压器都有一定的额定电压和额定电流,



当负载的功率和电压一定时，负载电流和功率因数成反比，即

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \quad (1-29)$$

**【例 1-4】** 某单相变压器容量为 2.0kVA，负载功率因数为 0.5，电压为 220V，问它能带多少负载？若负载功率因数为 1，能带多少负载？

$$\text{解 } P_1 = S \times \cos \varphi = 2.0 \text{ kVA} \times 0.5 = 1.0 \text{ kW}$$

$$P_2 = 2.0 \text{ kVA} \times 1 = 2.0 \text{ kW}$$

可见，功率因数越高，电源带的有功功率越大。

2. 线路功率损耗  $\Delta P$  小 当电压、线路电阻  $R_L$  和负载功率一定时，功率因数越高，电流越小，线路功率损耗  $\Delta P = I^2 R_L$  越小。

3. 线路电压损失  $\Delta U$  小 线路电压损失  $\Delta U$  越小，同理， $\Delta U = IR_L$ ， $I$  越小则  $\Delta U$  越小。

4. 节省投资 因为功率因数高，线路电流小，所以导线截面小，还可降低控制设备、保护设备的规格，节省投资。

5. 功率因数高可节约电费 规定对低压用户，功率因数大于 0.85，则调低电费单价；功率因数小于 0.85 则调高电费单价。对高压用户，功率因数大于 0.9 则调低电费单价；功率因数小于 0.9 则调高电费单价。高压用户功率因数高则电费起价也低。

因此，改善功率因数可以节约电能，对国家有利；可以提高负载的电压等，对用电单位也有利。对新建的工厂，功率因数低于 0.9 时，不予供电。

### 三、改善功率因数的方法

改善功率因数的方法主要有两种途径，都是设法使电源电压与线路电流的相位差角  $\varphi$  减小。

#### 1. 提高自然功率因数的方法

(1) 选择电动机的容量要尽量使其满载 采用降低用电设备无功功率的措施，称为提高设备的自然功率因数。各工业企业所取用的无功功率中，异步电动机约占 70% 以上。因为异步电动机在轻载或空载时，功率因数很低，空载功率因数只有 0.2~0.3，满载时功率因数很高，约为 0.85~0.89。所以，要正确选择异步电动机的容量，容量不能过大，要尽可能满载运行。

为了避免电动机轻载运行（俗称“大马拉小车”）的不合理的运行方式，且现有电动机又不能更换小容量时，可以改变电动机定子绕组接线来降低电动机运行电压。最常用的方法是“Y- $\Delta$ ”法，适用于定子绕组为三角形联结，并有六个接线端、平均负荷在 40% 以下的轻载电动机。

(2) 电力变压器不宜长期轻载运行 同理，选择电力变压器容量也不宜太大，因为对高压电网来说，变压器是高压电网的负载，也有提高功率因数的问题。如果变压器满载运行，变压器一次侧功率因数仅比二次侧低约 3%~5%。若变压器轻载运行，当负荷率小于 60% 时，一次侧的功率因数就显著下降，可达 11%~18%。因此，电力变压器在负荷率为 60% 以上时，运行才比较经济，通常在 75%~80% 比较合适。如果变压器负荷率长时间小于 30% 时，宜更换较小的变压器。

(3) 合理安排工艺流程 在建筑工地，用电设备多，在运行时间安排上有很多学问。尤