

建筑电气技术

唐定曾 唐 海 主编

机械工业出版社

本书第一章简要介绍了电工基础知识及国际通用的 TT、TN-C 及 TN-S 供电系统。第二章介绍了常用低压控制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符合国际惯例的标注方法。第四章介绍了常用电光源的特点、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、七章介绍工程供电及临时供电技术,重点内容是负荷及供电导线截面的计算、临时施工供电设计方法、继电保护装置及变配电系统等,对变配电工程设备选型也作了重点介绍。第八章主要介绍了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。第九章及以后的内容主要是建筑施工管理技术、质量管理及安全用电技术。还扼要介绍了流水作业法和网络图的基本知识,重点是施工管理中常用的技术规程及实施要领。本书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。

本书可供建筑行业电气工长、工程技术人员及相关专业大中专院校师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑电气技术/唐定曾, 唐海主编. -北京: 机械工业出版社, 1996. 12
ISBN 7-111-05350-8

I. 建… II. ①唐…②唐… III. 建筑工程-电气设备-应用 IV. TU731

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 18632 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 边 萌 版式设计: 王 颖 责任校对: 陈立耘
封面设计: 姚 毅 责任印制: 路 琳
机械工业出版社印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
1997 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆ · 22 印张 · 540 千字
0 001—4 000 册
定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

改革开放以来，建筑工业得到迅猛的发展，因此，在培养技术骨干力量方面需要相应的教材。本书内容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、安全用电技术知识及工程质量管理知识。在内容中介绍了一些新材料、新技术和新工艺。本书范围很宽，内容丰富，可作为“电气设备”课、“工程供电”课、“施工管理”课及“电气工程质量管理”等课程的综合教材，也可作为“电气工程概（预）算”培训班的配套教材。

本书可作为大学、中专、职业高中有关专业学生的教材或参考书。由于本书的特点是深入浅出、理论联系实际，文字简炼、图文并茂，所以适合于在岗的工程技术人员参考书。为了帮助学员具体掌握建筑工程技术知识，对每章重点内容编写了大量习题，并附有参考答案，所以也便于自学。

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。书的内容适用范围比较宽，力求达到实用、适用、好用的目的。

本书由唐定曾和唐海主编，由钱根南和张小青审核。

目 录

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	10	
第五节 三相交流电路	13	
第六节 TT、TN-C、TN-S 及 IT 供电系统	17	
习题及答案	21	
第二章 低压电气设备	23	
第一节 动力设备	23	
第二节 常用低压控制和保护电器	30	
第三节 保护电器	38	
第四节 配电线路	41	
第五节 导线截面的选择	47	
习题及答案	50	
第三章 电气识图	54	
第一节 阅读电气工程图所需要的基本知识	54	
第二节 照明工程施工图	57	
第三节 外线与动力工程施工图	60	
第四节 建筑电气工程二次接线图	63	
第五节 共用天线电视系统	66	
习题及答案	69	
第四章 照明设备与安装技术	71	
第一节 建筑照明设备	71	
第二节 光学的基本知识	76	
第三节 照明设计基础	79	
第四节 照明设备安装	84	
第五节 灯具电器安装常见缺陷	87	
习题及答案	90	
第五章 建筑工程供电系统	94	
第一节 供电的组成	94	
第二节 暂载率及其换算	100	
第三节 利用系数法和二项式法确定计算负荷	103	
第四节 低压配电系统和电力系统中性点运行方式	107	
第五节 供电系统一次设备	111	
第六节 变电所母线的主结线类型	117	
第七节 继电保护装置	122	
习题及答案	135	
第六章 建筑施工现场临时供电设计	141	
第一节 临时供电的特点及电源容量的选择	141	
第二节 临时供电平面设计	143	
第三节 施工配电箱和开关箱	146	
第四节 电动施工机械和手持电动工具	151	
习题及答案	156	
第七章 变配电所工程	160	
第一节 变配电所的规划和形式	160	
第二节 变配电所的布置	165	
第三节 高低压配电设备的选择	170	
第四节 变压器、互感器的选择和安装	173	
第五节 组合式变电所(箱式变电站)	178	
习题及答案	182	
第八章 弱电工程技术	184	
第一节 共用天线电视系统设备	184	
第二节 共用天线电视系统的设计	191	
第三节 共用天线电视系统的施工	202	
第四节 电话系统	204	
第五节 高层建筑防火问题分析	211	
第六节 火灾探测器	217	
第七节 火灾报警系统	223	
习题及答案	228	
第九章 建筑电气线路施工技术	230	
第一节 架空线路的敷设	230	
第二节 电缆线路的敷设	235	
第三节 硬母线和滑触线的安装	238	
第四节 室内电气设备的安装	247	
习题及答案	251	
第十章 施工组织设计与管理	255	
第一节 施工组织设计	255	

第二节 施工技术管理	262	第三节 建筑工程的防雷系统	290
第三节 质量控制与管理	266	第四节 高层建筑的防雷技术及防雷 设计	300
第四节 竣工验收及技术档案管理	273	第五节 漏电保护技术	302
习题及答案	277	习题及答案	311
第十一章 安全用电技术	280	附录 电气工程图形符号	315
第一节 触电事故及救护	280	参考文献	346
第二节 安全用电技术	282		

第一章 建筑电气基础知识

第一节 电路的组成

一、电路的作用及其组成

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它种类的能量，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联接起来，组装成电路才能实现。

电路由电源、中间环节和负载组成。中间环节指导线、各种控制设备、保护设备、电缆等；电源指发电机或变压器等；负载指各种用电设备。所以，电路是由一些元件和设备组合起来为了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、原子的核能等转换成电能，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，供用户负载使用。

应该注意，在电路的分析和计算中，最初直接对象不一定是实际设备，而是理想化了的模型（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，也有利于提高分析其它同类问题的能力。本章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，电流的大小是随着时间在变化的；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，就称其为恒定电流，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所具有的电位能。用 φ 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，称为电位参考点，用符号 $\perp$ 表示。那么，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，电流的方向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。当电场力把单位正电荷从电场的 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）、 μ V（微伏）等。

$$U_{ab} = \frac{A_{\text{外}}}{Q} \quad (1-1)$$

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 φ_a , b 点的电位为 φ_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, 即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

电压的方向以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 为了表征电源内部外力做功的本领, 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。外力把 1C 电荷从负极移到正极所作的功就是 1V。电动势的方向在电源内部是从负极指向正极的, 而在电源外部则是从正极指向负极, 公式为

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

式中 $A_{\text{外}}$ ——外力移动正电荷所作的功 (J);

Q ——被移动的正电荷量 (C)。

电动势的大小和方向都不随时间变化的电源是直流电源, 反之称为交流电源。

5. 电能 当电流通过电路时, 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做功, 从而把其它能转换成电能。通过外电路, 电荷不断地被送到负载, 把电能转换成其它形式的能。

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。

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

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 Ω 。

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 S 成反比, 即

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

式中 ρ ——电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)。

在 20°C 时的电阻率 $\rho_{\text{Cu}} = 0.0172\Omega \cdot \text{m}$ $\rho_{\text{Al}} = 0.029\Omega \cdot \text{m}$ 。

三、电路的工作状态

只要电路中导体内有电流通过, 导体就会发热。若导体电阻是 R , 电阻所消耗的电能全部变为热能, 经过时间 t 秒后, 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, 但多数情况下发热是有害的, 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。检修线路应在开路状态下进行。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联接时，称为短路，其特征是电流很大。根据电流的热效应，导体所消耗的电能为

$$A=IU_t=I^2Rt$$

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

3. 额定工作状态 对用电设备一般都规定有额定电流。额定电流是指电气设备长时间工作所容许通过的最大电流，用 I_N 表示。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。满载就是额定工作状态。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

$$I=\frac{U}{R} \tag{1-7}$$

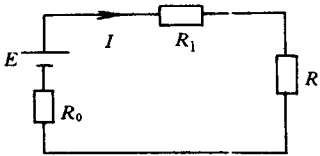


图 1-1 全电路的欧姆定律

2. 全电路的欧姆定律 图 1-1 所示是一简单的闭合回路， R_0 是电源内阻， R_L 是线路电阻， R 是负载电阻。根据式 (1-7) 可知，电源内阻上的电压降为 $U_0=IR_0$ ，供电线路上的电压降 $U_L=IR_L$ ，负载上的电压降为 $U=IR$ ，所以

$$E=U+U_L+U_0=IR+IR_L+IR_0$$

或
$$I=\frac{E}{(R+R_L+R_0)} \tag{1-8}$$

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，通过的电流越大，则线路的电压损失及电源内部损失也越大，因此负载得到的电压越低。

例 1-1 已知电源电动势为 100V，内阻 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正常时负载

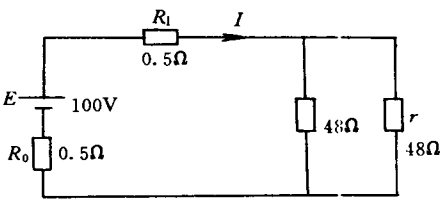


图 1-2 例 1-1 用图

工作电压和线路损耗（含电源内部）电压；③若切断一个负载电阻，后果如何？

解 ① 短路电流 $I_k=100\div(0.5+0.5)=100\text{A}$

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

根据 $E = IR + IR_L + IR_0$

有 $IR = E - IR_L - IR_0$

故 $u = E - I(R_L + R_0)$

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

线路及电源内部损耗电压为 4V 。

并联电路中若切除一个电阻后，负载总电阻将变大，线路电流则变小，线路损耗电压变小，负载电压将升高。所以，在建筑工程施工中常利用这个原理，切断一部分次要负载以改善过低的负载电压。

二、基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫第一定律 又称为节点电流定律。当多个电流经过某一公共节点时，流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和，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 又称为回路电压定律。沿任一闭合回路升高的电位，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 $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$

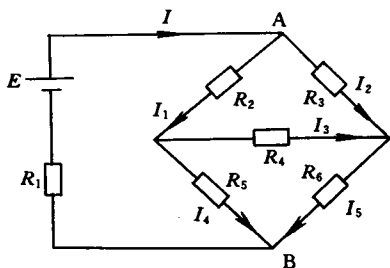


图 1-3 基尔霍夫第一定律

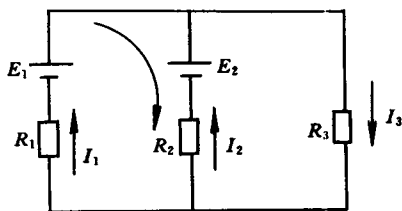


图 1-4 基尔霍夫第二定律

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。如果需要使用直流电，则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。实用电网中使用的电流和电压是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 是用来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，单位用 s（秒）表示。交流电在每一秒钟内所变化的周数称为频率，用 f 表示，单位 Hz（赫兹）。

从定义可知周期与频率的关系是互为倒数，即

$$T = \frac{1}{f} \tag{1-11}$$

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，还可以用角频率 ω 来表示（也称作角速度）。交流电变化一周，也就是变化了 2π 弧度（rad）。所以，角频率为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \text{ (rad/s)} \tag{1-12}$$

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

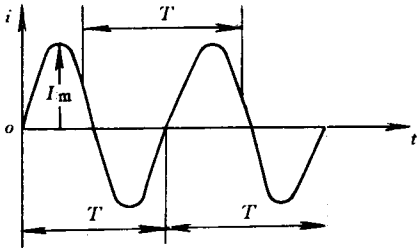


图 1-5 正弦交流电的特征

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。它表示的是交流电大小的特征，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° 电角。如果开始观察交流电时，它已经变化了 φ 角度，则 φ 称为初相角。交流电以电角速度 ω 经过 t 秒时所变化的电角度 α 为

$$\alpha = \omega t + \varphi \tag{1-13}$$

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

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

上式表明这两个交流电在任何时刻的相位角之差为 90° 。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° ，则称其互为反相。若其中一个先达到零值则称为超前，后达到零值的称为滞后。图 1-6 中 i_2 超前于 i_1 ， i_1 滞后于 i_2 。

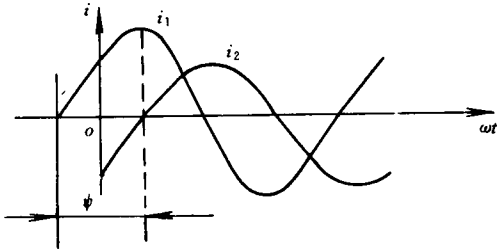


图 1-6 相位与相位差

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，所以本节只介绍定性分析用的相量表示法。因交流电的大小需要有一个确定的数来表示才方便，因此提出有效值的概念。

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,与一直流电通过同一电阻、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。用 U 、 I 分别表示正弦交流电电压和电流的有效值。

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,电工计算和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的。

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,用箭长代表有效值的大小。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 超前 I_1 60° 。不同电学量(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学量的加、减法。

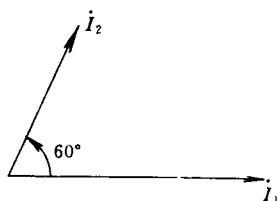


图 1-7 相量表示法

三、负载的性质

交流电路中负载用电抗 X 表示,负载是由三个参数组成的,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的大小决定的。

1. 纯电阻性负载 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 图 1-8 所示是理想状态下的纯电阻电路。

(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它形式的能。可证明其平均功率为

$$P=IU \quad (1-16)$$

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,其它参数小到可以忽略时,可视为纯电感电路,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° 相位角。如图 1-9 中 b、c 所示。

(2) 电流与电压的数值关系 由数学分析可知电压 U_L 、电流 I 、电感 L 、角频率 ω 的关系为

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

上式表明,当电压一定时,电流 I 与 ωL 成反比, ωL 对电流起着阻碍作用,称为感抗,用 X_L 表示,单位为 Ω 。

工频时,

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 314L \quad (1-18)$$

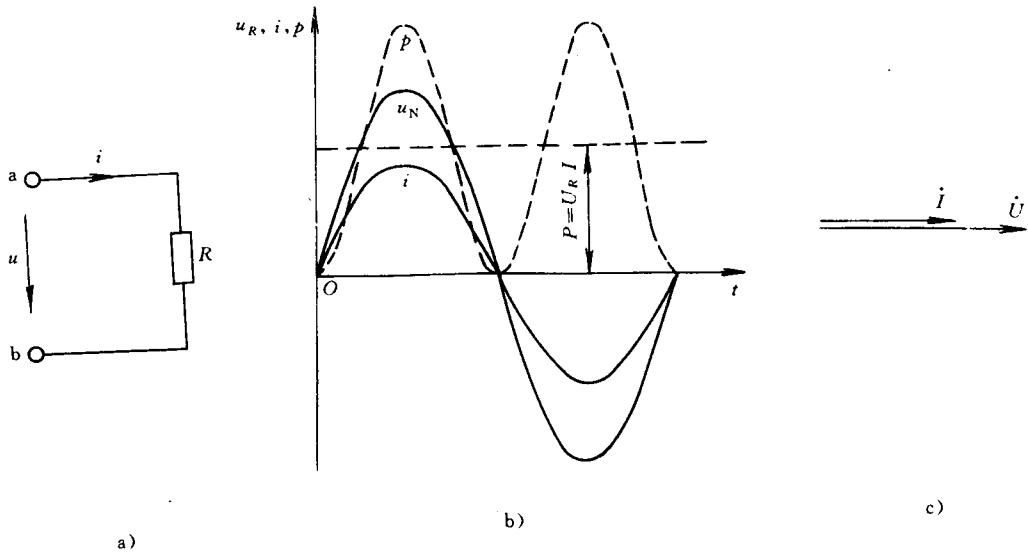


图 1-8 纯电阻电路

a) 电路图 b) 电流、电压及功率曲线 c) 相量图

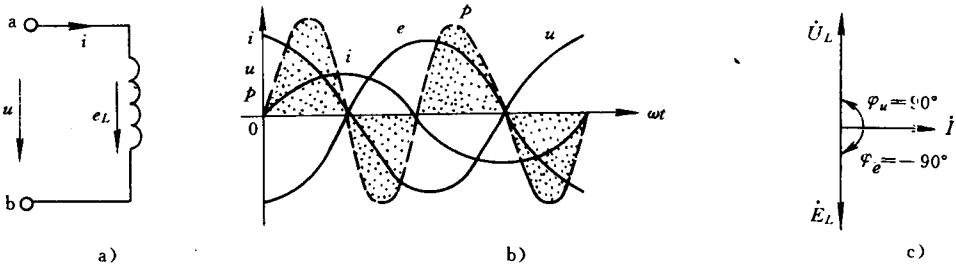


图 1-9 纯电感电路

a) 电路图 b) 电流、电压、功率曲线图 c) 相量图

式中 X_L ——感抗 (Ω);
 L ——电感 (H);
 ω ——角频率 (rad/s)。

式 (1-17) 是纯电感电路的欧姆定律表示式, 表明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, 频率越高则电流越小。如果把线圈接入直流电源, 直流电频率为零, 这时感抗为零。所以线圈在直流电路中可视为短路。同样, 电感 L 越大, 产生自感电动势的能力越强。电感电压 U_L 与电流之积称为无功功率, 用 Q 表示。

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

3. 纯电容负载 负载参数只有电容 C , 其它参数都小到可以忽略的程度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 给电容器通入交流电会产生充放电现象, 电流总是超前于电压 90° 电角, 如图 1-10 所示。

(2) 电流与电压的数值关系 由数学分析可知电流 I 、电压 U 、角频率 ω 、电容 C 的关系

为

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

X_C 称为容抗, 它与电流成反比, 单位也为 Ω 。式 (1-20) 即为纯电容电路的欧姆定律。在工频时, 容抗为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314C}$$

上式表明, 电容 C 与容抗成反比。

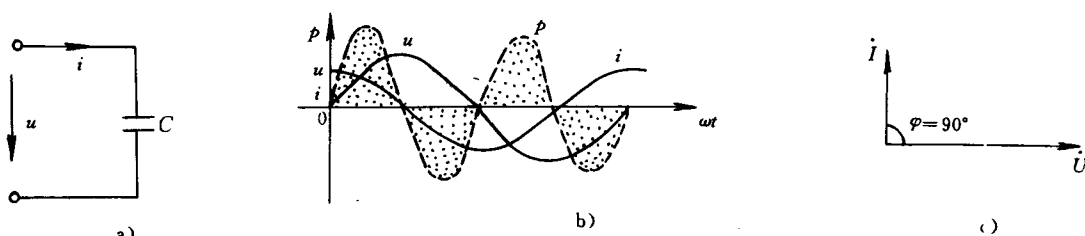


图 1-10 纯电容电路

a) 电路图 b) 曲线图 c) 相量图

(3) 功率关系

1) 瞬时功率 瞬时功率 $p = iu$, 即将各瞬时的电流和电压相乘而得到的瞬时功率, 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

$$P = 0 \quad \text{W} \quad (1-21)$$

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能量的“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, 即电流与电容电压有效值之积也称为无功功率, 用 Q 表示。单位为乏 (var) 或千乏 (kvar)。

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

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。主要关系如下。

(1) 电流和电压的相位关系 如图 1-11 所示, 由数学分析可知, 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 φ 角, 如图 1-11c 所示。

(2) 电流与电压的数值关系 由数学分析可知,

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

或

$$I = \frac{U}{Z} \quad (1-23)$$

式中 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ —— 阻抗 (Ω)。

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

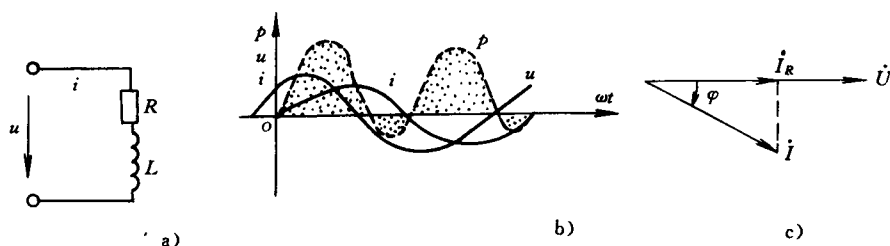


图 1-11 R-L 串联电路

a) 电路图 b) 曲线图 c) 相量图

(3) 功率关系

1) 瞬时功率 瞬时功率 $p = iu$, 即将各瞬时的电流和电压相乘而得到的瞬时功率。由图 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 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, 即 I_R 与电压 U 的乘积。

$$P = IU \cos \varphi \quad (\text{W}) \quad (1-24)$$

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 即为电流和电压的无功分量的乘积。

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

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 表示, 单位为 VA 或 kVA。

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

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 220 V , 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

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

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

根据欧姆定律

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

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

平均功率

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

第四节 功率因数及其改善的方法

在交流用电设备中,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 φ 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 φ 角,所以计算功率时,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 φ 的余弦称为功率因数。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° ,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° , $\cos\varphi=0$;当负载为纯电容时,电流和电压的相位差角也是 90° , $\cos\varphi=0$;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。

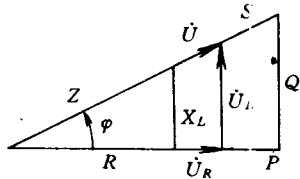


图 1-12 阻抗、电压、功率三角形

感性负载三个电压相量(U 、 U_L 、 U_R)的关系,称为电压三角形。把电压三角形三个边缩小 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为

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

不同性质的负载功率因数不同,也就是它们的电流与电压相位差角不同。如果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 φ_1 和 φ_2 ,如图1-13所示。可见,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求和法相加,而是用相量法相加。

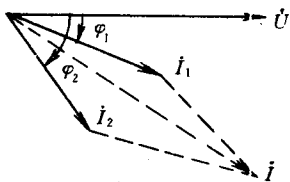


图 1-13 不同性质的负载电流相加

例如居民使用的白炽灯电流为 0.45A ,日光灯的电流是 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,各种不同性质的负载从电源取用的有功功率可以直接用代数法相加求和,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法相加的。

例 1-3 某教学楼一条照明支路有10只 40W 的日光灯(实用中包括镇流器,按 50W 计算),电压为 220V ,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 $S=IU=3.55\times 220=781\text{VA}$

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

二、改善功率因数的意义

改善功率因数有重要的现实意义,功率因数高则有以下好处。

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,问它能带多少千瓦负载?若负载功率因数为 1,能带多少千瓦负载?

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

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

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 ΔP 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 ΔU 小 同理, $\Delta U = I R_L$, I 越小则 ΔU 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。

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 φ 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,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- Δ ”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降低约 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, 而且在运行时间的安排上有很多学问, 尤其是限制一些电器的空载运行时间的问题, 如采用空载延时断电装置来限制电焊机和机床的空载运行。

(4) 异步电动机的同步化运行 如负荷率不大于 70% 及最大负荷率不大于 90% 的绕线转子异步电动机, 必要时可在绕线转子异步电动机起动完毕后, 向转子三相绕组中送入直流励磁, 即产生转矩把异步机牵入同步运行, 运行中可向电网输送无功功率, 从而改善了供电线路的功率因数。

2. 用补偿法提高功率因数 是指在感性负载两端并联适当容量的电容器。由于电容器是储能元件, 利用它的无功功率来补偿用电设备的自感无功功率, 故称为补偿法提高功率因数, 其原理如图 1-14 所示。

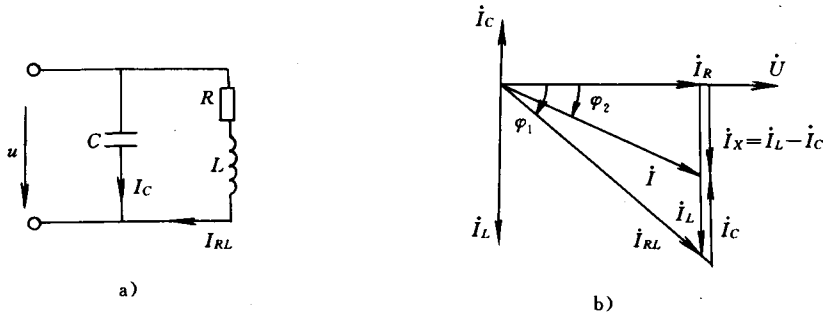


图 1-14 感性负载与电容并联电路

a) 电路图 b) 相量图

在图 1-14 中, 设电压为参考相量, 画在横坐标方向, 负载电流 I_{RL} 可分解为 I_R 和 I_L 两个分量。因为电容电流 I_C 超前电压 90° , 所以与 I_L 反相, 可以抵消一部分自感无功电流分量 I_L , 剩余无功电流分量为

$$I_X = I_L - I_C$$

结果, 线路电流 I 小于 I_{RL} , 即

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

如果并联电容前的功率因数为

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_R}{I_{RL}}$$

则并联电容以后的线路功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \frac{I_R}{I}$$

因为 $I < I_{RL}$, 所以 $\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$, 功率因数提高了。

注意: 所谓提高功率因数是指供电线路的功率因数, 并没有改变负载本身的性质或功率因数。对于负载, 其电流、电压、功率及功率因数都不变。

计算并联电容器的电容值, 可按以下步骤进行。

(1) 首先确定功率因数提高的标准 可根据供电部门规定的功率因数与电费挂钩标准 (如低压用户功率因数大于 0.85 则电费降低, 功率因数低于 0.85 则提高电费) 权衡利弊, 尽可能提高。