



普通高等教育“十二五”规划教材

电工与电机学基础

林文孚 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



要 點 理 內

普通高等教育“十二五”规划教材

电工与电机学基础

林文孚 主编

ISBN 7-111-21111-1

国内：京北 一 第1版 2011年 11月 1日 16开 16.75印张 388千字

ISBN 7-111-21111-1

7-111-21111-1

第一版 2011年

16开

16.75印张

388千字

ISBN 7-111-21111-1

7-111-21111-1



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

本书可作为高等院校水利水电类专业及相关专业的教材，也可供从事水利水电工作的工程技术人员参考。

责任编辑：李 强

内 容 提 要

本书根据火力发电机组运行的实际需要,讲述了电工与电机学的基本知识,包括电路基本定律、电磁感应、单相交流电路、三相对称及非对称电路、电子技术初步、中性点接地方式、变压器、异步电动机、同步发电机及其励磁系统的原理与运行等电气运行必备的基础知识。本书具有如下特点:注重基本概念、强调知识的作用、力求基础与应用结合。

本书可作为集控、热动、新能源发电等专业教材,同时可作为相关专业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电机学基础 / 林文孚主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-8967-4

I. ①电… II. ①林… III. ①电工学—高等学校—教材②电机学—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第181304号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 电工与电机学基础
作 者	林文孚 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.75印张 398千字
版 次	2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书根据火力发电机组运行的实际需要，讲述了电工与电机学的基本知识，包括电路基本定律、电磁感应、单相交流电路、三相对称及非对称电路、电子电路初步、中性点接地方式、变压器、异步电动机、同步发电机及其励磁系统的原理与运行等电气运行必备的基础知识。本书具有如下特点：

(1) 注重基本概念。根据运行岗位的需要和动力类专业特点，用通俗易懂的语言描述电气运行必需的电工与电机学基本概念及系统的应用知识。简化数学推导，突出重点、分散难点、深入浅出、循序渐进，概念清楚，着力于读者学习能力的提高。

(2) 强调知识的作用。把学习的目的性融入知识学习的过程中，用运行人员的视野看待电工与电机学的基础知识，能在基础知识的介绍中“看到”它在“电气运行”中应用的“影子”，引导读者自觉加强基础知识的学习和应用。

(3) 力求基础与应用结合。电机学部分不仅介绍电机运行原理，还讨论了电机的正常与异常运行，发电机电压调节与电网频率调节等，实际上已延伸到了电气运行。

本书可作为集控、热动、新能源发电等专业教材，同时可作为相关专业的培训教材。

为便于读者阅读，下面简要介绍各章的重点和难点。

(1) 直流电路，重点是全电路欧姆定律、KVL、KCL、节点电压法与回路电流法。节点电压法与回路电流法是三相电路分析的基本工具，KCL 是各种差动保护的理论基础。

(2) 电磁感应，重点是铁磁物质性质、左手定则与右手定则、感应电势与同名端的概念。铁磁物质的非线性特性是解释电机运行特性的基本依据之一，楞次定律是电机正常与非正常运行分析最重要的工具，同名端概念与变压器连接组别，TV、TA 的正确使用，电气设备并列操作等密切相关。

(3) 单相正弦交流电路，重点是电气量的三要素、相量图， R 、 L 、 C 元

件上电压与电流的关系，谐振、有功功率、无功功率、功率因数的概念。相位是电气运行分析最基本的概念，相量图是电气运行分析的基本工具， L 、 C （含分布电容的概念）的性质，是电机运行分析中最基本的概念。 K 、 L 电路的暂态过程是难点，是电机故障分析的基础，重点是了解合闸初相角与暂态电流的关系。

（4）三相交流电路，重点是星形与三角形连接及电压电流的相位关系，正序、负序、零序等非对称运行分析的基本概念，电力系统中性点运行方式及特点。要注意电路中的高次谐波特别是3次谐波的特点。对称分量法是难点，只需理解分析结论即可。

（5）电子技术初步，主要介绍了基本的模拟电子电路和数字电子电路元件，晶体管放大、整流滤波电路的基本原理。重点理解二极管及可控硅整流滤波电路的工作原理，以作为学习发电机励磁系统和有关保护原理的基础。

（6）变压器，重点是简化等值电路及其相量图，变压器运行特性， Y/Δ 连接时初级电压与次级电压的相位关系，变压器并联运行条件。短路阻抗对变压器运行性能有决定性的影响，变压器负载运行和负载短路的物理过程对于电动机和发电机运行分析具有重要意义。

（7）异步电动机，重点是三相对称交流电流的旋转磁场，异步电动机的正转和反转，异步电动机的启动特点。三相对称交流电流在定子、转子气隙空间的旋转磁场是分析同步电机电枢反应的重要基础。

（8）同步发电机，重点是同步电机的电枢反应，简化等值电路，运行特性；发电机的欠励、过励、正常励磁与无功功率调节的概念与励磁控制；功角与功角特性、有功调节与静态稳定的概念；发电机转子电流与定子电流的限制；发电机的同期并列；发电机的不对称运行与突然短路。难点是电枢反应、等值电路及其相量图、突然短路的物理过程。

可以通过实验来加强对电路基本概念物理意义的理解。例如，可以通过基尔霍夫定律实验来加强对节点电流、回路电压的认识；可以通过同名端判别实验来进一步认识电磁感应现象和规律，并强化“极性”的概念；可以通过功率因数提高实验来认识电感、电容电路的特性，磁场能量与电场能量的转换与补偿；通过 Y/Δ 电路实验来认识三相电流、电压之间的关系。

利用变压器、电动机、同步发电机相关实验，理解电机运行的基本原理与特性。如通过变压器实验，观察变压器的励磁涌流、空载与短路特性，测定变压器的极性，认识变比和阻抗不等时，并联运行变压器输出电流的变化，以及极性接反时的冲击电流。通过观察电动机绕组结构和电动机实验，观察

电动机的启动电流；通过观察相序变化改变电机转动方向，理解三相电流的空间旋转磁场。通过发电机实验，认识发电机的空载与短路特性，理解发电机并列的条件。通过实验得到感性认识，通过理论分析和引导上升到理性认识。

各章后面的复习思考题反映该章的主要学习目标，读者在阅读每章节内容前后要认真思考，根据该章复习思考题检查学习效果。

本书由武汉电力职业技术学院教授、高级工程师林文孚撰写。在编写过程中，得到了武汉电力职业技术学院仿真中心全体同仁的热情支持和帮助，对此，作者谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，书中缺点和谬误在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2011年5月

目录

前言

第 1 章 直流电路	1
1.1 电路	1
1.2 欧姆定律与电路的工作特性	4
1.3 串联电路与并联电路	9
1.4 基尔霍夫定律	13
1.5 复杂电路的分析方法	16
复习思考题	25
第 2 章 电磁感应	27
2.1 磁场	27
2.2 电磁感应原理	35
复习思考题	45
第 3 章 单相正弦交流电路	46
3.1 单相正弦交流电的概念	46
3.2 交流电的相量表示法	52
3.3 纯电阻、电感、电容电路	56
3.4 电阻、电感、电容串联电路	64
3.5 电路的谐振	71
3.6 功率因数的提高	75
3.7 一阶电路的暂态过程	77
复习思考题	82
第 4 章 三相交流电路	85
4.1 三相交流电路原理	85
4.2 三相电路的分析计算	93
4.3 对称分量法及其应用	103
4.4 电力系统中性点接地方式	111
4.5 三相电路中的高次谐波	116
复习思考题	120

第 5 章 电子技术初步	121
5.1 基本电子器件	121
5.2 基本电子电路	128
复习思考题	141
第 6 章 变压器	142
6.1 变压器的基本知识	142
6.2 变压器的运行原理	146
6.3 三相变压器	162
6.4 变压器的运行	170
复习思考题	177
第 7 章 异步电动机	178
7.1 异步电动机的基本工作原理和结构	178
7.2 三相异步电动机的运行原理及工作特性	182
7.3 三相异步电动机的启动与调速	192
复习思考题	196
第 8 章 同步发电机	197
8.1 汽轮发电机的基本结构	197
8.2 同步发电机的运行原理	200
8.3 同步发电机的功率调节	212
8.4 同步发电机的励磁系统	227
8.5 发电机组的同期并列	238
8.6 同步发电机的正常运行	245
8.7 同步发电机的非正常运行	250
复习思考题	259
参考文献	260

第 1 章 直 流 电 路

在工农业生产和日常生活中用到的各种用电设备，都是靠电流的作用而工作的。直流电路通常是比较简单的电路，但它是研究各种复杂电路的基础。因为，直流电路的有关概念同样适用于交流电路；简单电路的分析方法也可以推广到复杂电路，这是学习直流电路的主要目的。此外，电气设备的控制回路也大都采用直流电路。

1.1 电 路

1.1.1 电路的组成

电路是电流的通路，图 1.1 是一个简单电路，它由以下四部分组成：

(1) 电源 E 。电源是供给电能的。电源的能量由其他形式的能量转换而来，例如，电池中的电能是由化学能转换而来的，火力发电厂输出的电能是由机械能转换而来的，而机械能则是由燃料的化学能转换而来的。

(2) 负载 R 。负载指各种用电设备，也称为用电器，如电灯、电炉、电动机等。电源供给的电能通过负载转换为其他形式的能。例如，在灯泡中电能转换为光能和热能；在电炉中电能转换为热能；在电动机中电能转换为机械能。

(3) 导线 l 。导线用来将电源和负载连成通路，达到传导电流的目的。常用导线一般由铜或铝制成。

(4) 开关 K 。根据负载需要；开关对电路进行控制，如合闸接通电路，分闸断开电路。

电路的形式是多种多样的，电力系统是最典型的例子。发电机组是电源，它把热能、水能或核能转换成电能。分布于家庭，企、事业单位的各种电灯、电机（电器）是负载。通过电力网将各种电源的电能汇集起来，分配、输送到千家万户，所形成的电路就是电力系统。

1.1.2 电流

用导线将电源、负载连接起来，再合上开关使电路闭合，电路里就有电流通过。电流是电荷有规则的运动。在电源中具有一种推动电荷运动的原动力，称为电源力。对于电池来说，这种电源力就是化学力；对于发电机来说就是电磁力。在电源的内部，电源力把正电荷由负极推向正极。同时，由于两极正、负电荷的集聚，在两极间建立了电场。当电路闭合起来时，在外电路也建立了电场，在电场力的作用下，正电荷由电源的正极经过负载

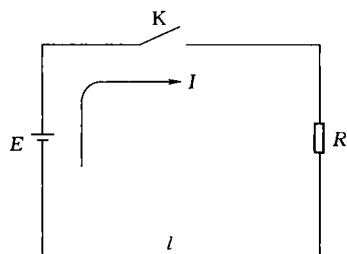


图 1.1 电路的组成

流向电源的负极。这种电荷有规则的运动，就形成了电流。

电路中电流的大小可以用电流强度来表示。电流强度是以单位时间通过电路某一截面的电量来衡量的，即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

式中： I 为电流强度，A（安培）； q 为电量，C（库仑），1库仑相当 6.24×10^{18} 个电子带的电量； t 为时间，s（秒）。因此

$$1\text{A(安培)} = 1\text{C/s(库仑/秒)}$$

电流强度的单位还有： $1\text{kA(千安)} = 10^3\text{A}$ ； $1\text{mA(毫安)} = 10^{-3}\text{A}$ 。

在电路中，规定正电荷流动的方向作为电流的方向，它与电场力的方向是一致的。而在电源内部，正电荷是由负极流向正极的。应当指出，在金属导体里，导电的是自由电子，它带负电，因此它的移动方向正好与规定的电流方向相反。

1.1.3 电动势、电压和电位

1. 电动势

电源力推动电荷运动的过程也就是电源力做功的过程。电源力把单位正电荷由负极推向正极所做的功表明了电源推动电荷运动的本领，称为电源的电动势，简称电势，用字母 E 表示，则

$$E = \frac{A}{q} \quad (1.2)$$

如果功 A 的单位用 J（焦耳），电荷 q 的单位用 C（库仑），则电势 E 的单位为 V（伏特），即

$$1\text{V(伏特)} = \text{J/C(焦耳/库仑)}$$

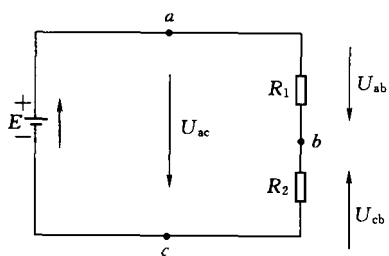


图 1.2 电势与电压的方向

电势的方向与电源力的方向一致，即由电源负极指向电源正极，如图 1.2 中电源 E 右侧的箭头所示。

2. 电压和电位

由于电源正极和负极集聚着正电荷和负电荷，因此它不仅在电源内部建立电场，当外电路接通时，也在外电路中建立电场。从能量的角度来讲，电场力推动电路中电荷移动的过程就是电场力做功的过程。把电场力将单位正电荷沿电路由 a 点推向 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压。推动单位正电荷做的功越多， a 、 b 两点间的电压就越高，反之，做的功越小，电压越低。由此可见，电路中的电压表明了电场力推动电荷运动的能力。 a 、 b 两点间的电压用符号 U_{ab} 表示

$$U_{ab} = \frac{A}{q} (\text{V}) \quad (1.3)$$

电压的单位也用 V。如果电场力在 a 、 b 两点之间推动 1C 的电荷做的功为 1J，则这两点间的电压就是 1V。电压较大的单位有 kV（千伏），较小的单位有 mV（毫伏）。

$$1\text{ 千伏(kV)} = 10^3\text{V}; 1\text{ 毫伏(mV)} = 10^{-3}\text{V}$$

物体在空间每一点都有一定的位能，在空间某一点位能的高低是相对的，与所取的参

考点有关。电荷 q 在电路中某点的电位能高低也是相对的，与所取的电位能零点（称为参考点）有关。用 φ_a 表示单位正电荷在电路中 a 点具有的电位能，称为电位，其值等于 a 点与参考点之间的电压。用 φ_b 表示单位正电荷在电路中 b 点具有的电位能，其值等于 b 点与参考点之间的电压。则电路中 a 、 b 两点间的电压就是这两点的电位差，如图 1.2 所示，即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.4)$$

如果选 b 点为参考点，则

$$\varphi_b = 0, U_{ab} = \varphi_a$$

故电位实际上也是电压，是对参考点的电压。所以，电位的单位就是电压的单位，即 V。

如前所述，电势的方向就是电源力的方向，是由负极指向正极的，如图 1.2 所示。可见，电势的方向也是从低电位到高电位的。电路中电压的方向与电场力方向一致，即与外电路中电流的方向一致，是从高电位到低电位的。所以，电源电势的方向与其两端的电压的方向正好相反。如图 1.2 所示，电势 E 的方向与电压 U_{ac} 的大小相等，方向相反。

【例 1.1】 在电路（图 1.2）中 a 、 b 、 c 三点的电位分别为 $\varphi_a = 6\text{V}$ 、 $\varphi_b = 3\text{V}$ 、 $\varphi_c = 0\text{V}$ ，求电压 U_{ab} 、 U_{cb} 、 U_{ac} 。

解

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 6 - 3 = 3(\text{V})$$

$$U_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = 0 - 3 = -3(\text{V})$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 6 - 0 = 6(\text{V})$$

由此可见，电压 U_{ab} 的方向是由高电位 a 点指向低电位 b 点的，其值为正；而电压 U_{cb} 是由低电位 c 点指向高电位 b 点的，其值为负，“负”表示 U_{cb} 的指向与实际电压方向相反。而 $U_{ac} = \varphi_a$ ，即某点与零电位点间的电压就是这一点的电位。在参考点明确的情况下，可以将电压符号的下标省略。如图 1.2 中 U_{ac} 指整个电路的电压，也可将 U_{ac} 简记为 U 。

1.1.4 导体的电阻

物质按导电性能可分为导体、半导体和绝缘体。导体的导电具有两重性，它既具有导电的一面，也有阻碍电流的一面。如金属导体，它之所以导电，是因为其中有自由电子；之所以对电流有阻碍，是因为自由电子在移动的过程中要同金属的原子（或分子）发生碰撞，使电子移动受到阻碍，导体就表现出一定的电阻。

1. 导体的电阻

由于导体存在电阻，电流通过它就要受到一定限制。作为传导电流的导线，要求它的电阻要小一些，但是对于一些用电设备，如电灯、电烙铁、电炉等，又要使它具有有一定的电阻，这样才能达到用电的目的。在实际工作中还有用电阻来限制或调节电流而专门做的电阻元件和可变电阻器。

电阻的单位是 Ω （欧姆）。在计量较大的电阻时还会用到 $\text{k}\Omega$ （千欧）和 $\text{M}\Omega$ （兆欧）。

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega; \quad 1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

导体的电阻越大，其导电性能越差，电阻越小，导电性能越好。导体电阻 R 的倒数（ $1/R$ ）的大小表明了导体导电性能的好坏，称为电导，用符号 g 表示，即

$$g=1/R \quad (1.5)$$

电导的单位是 S (西门子)。

2. 影响电阻大小的因素

在一定的温度下, 导体电阻的大小由两方面因素决定: 一个与导体的材料有关, 例如, 同样几何尺寸的金属导体, 银、铜、铝相比, 银的电阻最小, 铜的电阻稍大些, 铝的电阻最大; 另一个与导体的尺寸有关, 导体越长, 电阻越大, 导体越细, 电阻越大。如果已知某种导体构成的均匀导线, 其长度为 l (m), 截面积为 S (mm^2), 则其电阻在常温 (20°C) 下的数值可按下式计算

$$R=\rho \frac{l}{S} \quad (1.6)$$

式中: ρ 为该种导体的电阻率, 其值是指长 1m、截面积为 1mm^2 的某种材料的导线在 20°C 时的电阻值, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

在 20°C 温度下, 铜的电阻率为 $0.0172\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 铝的电阻率为 $0.0283\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

导体的电阻除与其材料性质和尺寸有关外, 还与温度有关。实验表明: 金属导体的电阻随金属材料的温度升高而成正比地增加, 材料不同, 增加量也不同。例如, 在 20°C 常温下, 当温度升高 1°C 时, 1Ω 铜导线的电阻增加 0.004Ω , 1Ω 铝导线电阻增加 0.0042Ω 。把在 20°C 常温下 1Ω 的某种金属导线, 当温度升高 1°C 时它的电阻增加量称为这种金属材料的电阻温度系数, 用 α 表示, 则铜的电阻温度系数 $\alpha=0.004$ 。

如果已知某种材料的导线在 20°C 常温下的电阻 R_{20} 和它的电阻温度系数 α , 则温度升高到 t 时, 其电阻 R_t 用下式近似计算

$$R_t=R_{20}+\alpha R_{20}(t-20) \quad (1.7)$$

1.2 欧姆定律与电路的工作特性

1.2.1 欧姆定律

电路中流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比, 而与电路的电阻成反比, 这就是欧姆定律, 其表达式如下

$$I=\frac{U}{R} \quad (1.8)$$

式中: R 为电路的电阻, Ω ; I 为流过电阻 R 的电流, A; U 为电阻两端的电压, V。

欧姆定律是电工学中基本定律之一, 它是电路分析和计算的基础。

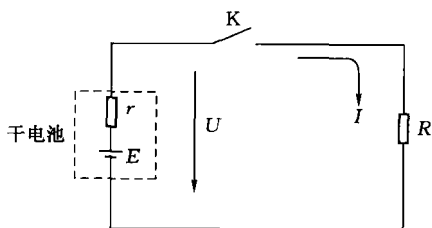


图 1.3 全电路欧姆定律

图 1.3 所示的电路, 当开关 K 断开时, 电路中的电流 I 等于零, 称这种状态为电路的开路 (或空载) 状态。如果电路中的电源为 1.5V 的干电池, 这时用万用表可以测得电源两端的电压 U 为 1.5V 。这个电压称为开路电压或空载电压, 记为 U_0 。若将开关 K 合上, 电路中有了电流, 这种状态称为电路的有载工作状态。这时再用万用表测

量（精度较高的万用表）电源两端的电压，就会发现此时电压低于 1.5V。这说明电源内部存在电阻，当电流流过电池时，在内部电阻上产生电压降，使负载电阻上的电压降低了。电源内部的电阻简称为内阻，用符号 r 表示。如果电源电势为 E ，外电路的电阻（即负载电阻）为 R ，电源的内阻为 r ，则电路中的电流为

$$I = \frac{E}{r + R} \quad (1.9)$$

电路中的电流等于全电路的电压（即电源电势）除以全电路的电阻。这一结论称为全电路欧姆定律。

1.2.2 电功和电功率

1. 电流的功

电能是由其他形式的能转换而来的，电能又可以转换为其他形式的能。电流做功的过程就是电能转换为其他形式能量的过程。如电流通过电动机使其转动，就将电能变成机械能。将电压通过连接导线加在负载两端，就在电路中建立了电场，电场力推动电荷（产生电流）要做功。由式（1.3）可知，电场力移动电荷的功为

$$A = Uq \quad (1.10)$$

如果将移动的电荷 q 用电流 I 表达，即 $q = It$ ，则有

$$A = Uq = UIt \quad (1.11)$$

式中： U 为某段电路两端的电压，V； I 为通过该段电路的电流，A； t 为电流通过电路持续的时间，s； q 为时间 t 内通过电路的电量，C； A 为电源在时间 t 内消耗在该段电路的功，J。所以

$$1\text{J} = 1\text{V} \times 1\text{A} \times 1\text{s}$$

就是说，电流的功是一段时间内在电路中消耗的电能。显而易见，加在电路中某用电器两端的电压越高、通过用电器的电流越大、通电的时间越长，用电器消耗的电能就越多。

2. 功率

电流的功不仅与电压的大小和电流强度有关，还与做功的时间有关，不能直接反映电源的工作能力。所谓功率，就是做功的速率。通常所说机械设备的出力、容量或工作能力的大小，都是指其功率。电功率就是电源做功的速率，它等于电源做功 A 与做功时间 t 之比，用 P 表示，根据式（1.11）有

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1.12)$$

式（1.12）表明：电功率的大小取决于电压和电流两个量的乘积。如果电压的单位为 V，电流的单位为 A，则功率的单位为 W（瓦特），即 $1\text{W} = 1\text{V} \times 1\text{A}$ 。较大的单位有 kW（千瓦）、MW（兆瓦）。

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}; \quad 1\text{MW} = 10^6\text{W}$$

发电机的发电量（产出的电能）或用电设备的用电量（消耗的电能）可由其功率乘以运行时间来求得，即 $A = Pt$ 。电量的单位一般不使用焦耳，因它太小，通常使用 kW·h（千瓦时）。

电功率由电压和电流这两个因素共同决定。如果电压是加在电阻上的，根据欧姆定律

可以求得电阻上消耗的功率的计算式,即

$$P=UI=U\frac{U}{R}=\frac{U^2}{R}=I^2R \quad (1.13)$$

电流通过电阻要发热,在电阻上消耗的电能转换为热能散发到空间,电流通过电阻的发热量为

$$Q=I^2Rt \quad (1.14)$$

式中:电流单位为 A;电阻单位为 Ω ;时间单位为 s;则发热量单位为 J。

式(1.14)表明:电流在电阻中的发热量 Q 与电流的平方、电阻 R 和通电时间 t 成正比。这一结论称为焦耳—楞次定律。

电流通过电阻发热,简称为电热,它是现代工业中的重要加热方法之一,应用较广。但对于不是以加热为目的的电气设备(如输电线、电动机)来说,电流通过导体发出热量,不仅造成能量的损耗,而且会使设备温度升高,严重时可能导致设备的损坏。例如,一般常用的导线总具有一定的电阻,如果电流过大,使导线温度过高,严重时有可能损坏导线的绝缘,引起短路,甚至引发火灾。所以,不同截面的导线在使用中都要有一定的电流限制。不仅如此,一切电气设备都有一定的电压(或电流)限制,这个电压(或电流)称为额定电压(或额定电流)。在使用电气设备时,首先要注意其铭牌规定的额定电压(或额定电流),使所加的电压或通过的电流不要超过额定值。

【例 1.2】 220V、100W 的灯泡和 110V、100W 的灯泡,哪一个工作电流大?哪一个电阻大?

解 根据 $P=UI$ 求得电流为

$$I_1=\frac{P_1}{U_1}=\frac{100}{220}=0.455(\text{A})$$

$$I_2=\frac{P_2}{U_2}=\frac{100}{110}=0.91(\text{A})$$

根据 $R=U/I$ 求得电阻为

$$R_1=\frac{U_1}{I_1}=\frac{220}{0.455}=484(\Omega)$$

$$R_2=\frac{U_2}{I_2}=\frac{110}{0.91}=121(\Omega)$$

可见,在用电器取用功率相等的情况下,额定电压越低,则用电器的电阻越小,通过用电器的电流越大。换句话说,对于消耗功率一定的用电设备,如果可以承受的电压越高,则通过的工作电流就越小。

如果 110V、100W 的灯泡错接到 220V 电路中,其通电电流为

$$I_2=\frac{220}{R_2}=\frac{220}{121}=1.81(\text{A})$$

其值大大超过它的额定电流 (0.91A),会使灯泡过热烧毁。所以,用电设备一定要在其规定的额定电压下工作。

1.2.3 电路的工作特性

所谓电路的工作特性,就是电路在各种状态下电流、电压和功率的特性。

1. 有载工作状态

如前所述, 对于图 1.3 所示的电路, 当开关 K 合上时, 电路处于有载工作状态。这时负载电阻两端的电压为

$$U = IR \quad (1.15)$$

将此式代入式 (1.9) 得

$$U = E - Ir \quad (1.16)$$

电源内阻 r 产生的电压降为 Ir 。内阻 r 上的电压称为内阻压降; 电源加给负载的电压 U , 即电源两端的电压, 称为端电压。电流 I 越大, 电源的端电压 U 越低, 即电源的输出电压下降越多。如果以电源输出的电流 I 为横坐标、以电源的输出电压 U 为纵坐标, 作出的 U 与 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线。如图 1.4 所示, 曲线 (1) 和曲线 (2) 分别是电源内阻为 r_1 、 r_2 时的外特性曲线。当 E 和 r 不变时, 随着 I 的增加, U 是一条向下倾斜的直线。电源内阻 r 越大, 电源的端电压随电流下降越快, 外特性曲线斜率 (绝对值) 越大。将式 (1.16) 两端同时乘以电流 I 得

$$UI = EI - I^2 r \text{ 或 } P = P_E - \Delta P \quad (1.17)$$

其中, $P = UI$ 为电源的输出功率; $P_E = EI$ 为电源产生的功率; $\Delta P = I^2 r$ 为电源内阻消耗的功率。这说明, 电源实际输出功率等于它产生的功率减去内阻损耗, 内阻损耗越大, 输出功率越小。

式 (1.9)、式 (1.16)、式 (1.17) 分别表示图 1.3 所示的电路在有载工作状态下, 电流、输出电压和功率的特性。

2. 开路工作状态

如前所述, 将图 1.3 中的开关断开, 电路处于开路状态, 如图 1.5 所示。开路状态下, 外电路的电阻相对于电源来说等于无穷大, 所以电路中的电流为零, 内阻压降也为 0, 此时的输出电压称为开路电压, 用 U_0 表示, 其值等于电源的电动势 E 。这时, 电路中电流、输出电压和功率的特性分别为

$$I = 0, U = U_0 = E, P = 0 \quad (1.18)$$

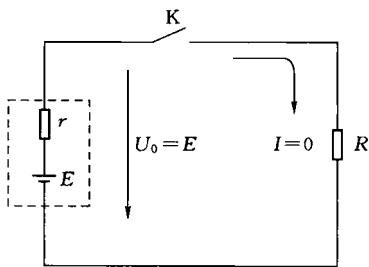


图 1.5 电路的开路状态

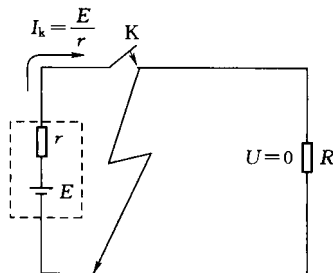


图 1.6 电源的短路

3. 短路状态

图 1.3 所示的电路, 由于某种原因使电源的两端被连接在一起, 如图 1.6 所示, 则电

源被短路。电源短路时，外电路的电阻为零，电流有捷径可走，不再流过负载。因为在电流的回路中仅有很小的电源内阻 r ，所以这时的电流很大，此电流称为短路电流，用 I_k 表示。短路时电源产生的电能全部被内阻所消耗。短路可能使电源设备因受到短路电流的电磁力或过热而损伤或毁坏。

电源短路时外电路电阻为零，所以电源的端电压也为零，电源的电势全加在内阻上。这时，电路中电流、输出电压和功率的特性为

$$I = I_k = \frac{E}{r}; U = 0; P_E = \Delta P = I_k^2 r, P = 0 \quad (1.19)$$

短路也可以发生在线路或负载的任何地方，通常是一种严重的事故，应尽力预防。短路产生的原因往往是绝缘损坏或接线错误。因此，经常检查电气设备和线路的绝缘情况是防止发生短路事故的重要安全措施。此外，为了防止短路事故引起的严重后果，通常在电路中接入熔断器或断路器，以便在发生短路时能迅速断开短路回路（如断开电路中的开关 K），将故障电路自动切除。这种能自动地检测发现故障，并借助于断路器将故障切除的设备称为继电保护装置。有时，由于某种需要，如为了测量电源的内阻 r 的大小，在一定的安全条件下，还可以进行短路试验。

【例 1.3】 有一电源，其端电压 $U = 230\text{V}$ ，内阻 $r = 0.6\Omega$ ，输出电流 $I = 5\text{A}$ 。求电源的电动势 E 、负载电阻 R 、各项功率 P ，并求出电源两端短路时的短路电流 I_k 。

解

电源的电动势 $E = U + Ir = 230 + 5 \times 0.6 = 233(\text{V})$

负载电阻 $R = \frac{U}{I} = \frac{230}{5} = 46(\Omega)$

电源产生的功率 $P_E = EI = 233 \times 5 = 1165(\text{W})$

内阻消耗的功率 $\Delta P = I^2 r = 5 \times 5 \times 0.6 = 15(\text{W})$

输出功率 $P = UI = 230 \times 5 = 1150(\text{W})$

可见，电源产生的功率 P_E 等于电源内阻消耗的功率 ΔP 与外电路电阻消耗的功率 P 之和，即功率是平衡的。

短路电流 $I_k = \frac{E}{r} = \frac{233}{0.6} = 388(\text{A})$

短路电流值是正常工作电流的 77.6 倍。可见，首先要防止电路短路，而在万一发生短路的情况下，采取措施迅速切除短路故障也是十分重要的。

1.2.4 含有反电势负载的电路

作为供电的电源，其电势的方向和电流的方向是一致的。在电路中还会遇到电势的方向与电流方向相反的情况，这种电势叫反电势。例如，用电源对蓄电池充电，蓄电池的电势就是个反电势，电源克服这个反电势做功，使电能转换为化学能储存在蓄电池中。由此可见，反电势也是负载的一种形式。下面以蓄电池充电为例来讨论具有反电势负载的电路的特点。

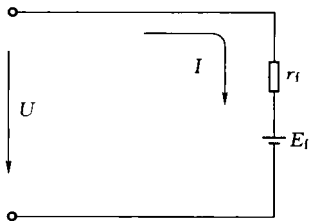


图 1.7 具有反电势的电路

先看电路中电流和电压关系。如图 1.7 所示，被充电的蓄电池的电势为 E_i ，其内阻为 r_i ，接至电压为 U 的电源进

行充电。设充电电流为 I ，则在电阻 r_i 上要引起一个电压降 Ir_i ，电路中的反电势 E_i 与电流方向相反，对电流起阻碍作用，也要引起电压降落，其数值与反电势大小相等，方向与反电势相反。所以，电路中电源的端电压 U 应当等于两部分电压降之和，即

$$U = E_i + Ir_i \quad (1.20)$$

从而可得电路中的电流为

$$I = \frac{U - E_i}{r_i}$$

不难看出，上式中 $U - E_i$ 是在电阻 r_i 上的电压，而它除以 r_i 即得到电路中电流。将式 (1.20) 两端乘以电流 I 得

$$UI = E_i I + I^2 r_i \quad (1.21)$$

式 (1.21) 中，等号左端 UI 是电源供给的总功率；等号右端第一项 $E_i I$ 是克服反电势的功率，也就是使蓄电池充电转换为化学能的功率，第二项 $I^2 r_i$ 是克服蓄电池内阻的功率，也就是变为热能而损耗掉的功率。

反电势存在于多种用电设备，如变压器、电动机中。式 (1.21) 表示的能量平衡方程式具有普遍意义，即电源传递给负载的功率，等于负载的输出功率（或转换成其他形式的能量）与负载本身消耗的功率之和。

1.3 串联电路与并联电路

1.3.1 电路的串联

1. 串联电路

串联是电路最基本的连接方式，事实上，图 1.3 所示电路就是串联电路。电路中，电源的内阻 r 和负载电阻 R 是以串联方式连接的。如图 1.8 所示，有两个及以上的电阻，一个接着一个首尾相连串接在一起，组成一个没有分支的电路就是串联电路。串联电路有如下几个特点：

(1) 由于串联电路没有分支，电路中流过各电阻的电流是相同的，即不论是大电阻，还是小电阻，流过的电流大小相同。这是因为电荷在电路中不能堆积，也不能在流动中自行消失，就是说，电流具有连续性。

(2) 因为串联电路各段电流相同，所以在电阻上分布的电压大，小电阻上分布的电压小，即各段电压与对应的电阻成正比例分配。

因为 $U_1 = U_{R1} = IR_1$ ； $U_2 = U_{R2} = IR_2$ ； $U_3 = U_{R3} = IR_3$

所以 $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$ (1.22)

式中： U_{R1} 、 U_{R2} 、 U_{R3} 分别为电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 上的电压。

(3) 因串联电路各段电流相同，因此，各段电路消耗的功率也与对应的电阻成正比例分配。

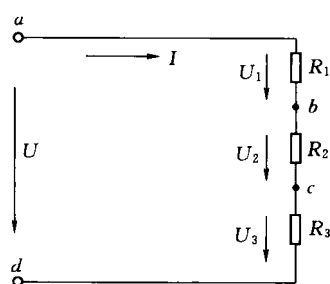


图 1.8 电阻的串联