



变配电室 值班电工

初级、中级

谭 斐 谭延良 主编



化学工业出版社



变配电室 值班电工

初级、中级

谭 斐 谭延良 主编

杜天艳 盛碧琦 副主编 盛占石 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书根据变配电室值班电工岗位操作的实际要求,从电气技术工人学习掌握知识和技术的特点出发,在基础知识部分介绍了直流电路、单相正弦交流电路、三相交流电路和电磁与电磁感应,一些主要的一次设备的原理、操作方法,电气识图常识以及安全用电等;在初级工部分介绍了监盘与抄表、巡回检查、倒闸操作和一次设备的基本操作;在中级工部分介绍了监盘与抄表、巡回检查、倒闸操作、异常运行、事故处理和低压电气运行与维护。

本书可供电气运行操作人员学习使用,也可供相关技术、管理、教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变配电室值班电工:初级、中级/谭斐,谭延良主编.
北京:化学工业出版社,2009.10
ISBN 978-7-122-06339-7

I. 变… II. ①谭…②谭… III. 变电所-配电系统-
电工-基本知识 IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 123634 号

责任编辑:李玉晖

文字编辑:高 震

责任校对:宋 玮

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:北京市白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 469 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.80 元

版权所有 违者必究

前 言

变配电站（所）运行值班电工是电力系统中的“智能”型工种，是供电企业主要工种之一。变配电站（所）运行稳定与否，直接影响到电网安全运行。变配电站（所）值班电工的技术素质将直接影响电网运行的质量。为了提高变配电站（所）值班电工的技术素质，我们依据《变配电室值班电工国家职业标准》编写了本教材。

本书共分3个部分。第1部分分7章，叙述了值班电工的一些基本知识，包括直流电路、单相正弦交流电路、三相交流电路和电磁与电磁感应，介绍了一些主要的一次设备的原理、操作方法和值班电工应具备的电气识图常识以及安全用电等方面的知识。这些均为初、中级值班电工岗位培训的考核内容。本着“以职业活动为导向、以职业技能为核心”的原则，第2部分分4章，介绍了初级值班电工监盘与抄表、巡回检查、倒闸操作和一次设备的基本操作。第3部分分6章，介绍了中级值班电工的监盘与抄表、巡回检查、倒闸操作、异常运行、事故处理和低压电气运行与维护。对初、中级值班电工，在要求的内容上有一定的差异。

全书由谭斐、谭延良担任主编，负责全书内容与章节的确定以及统稿。本书第1~4章由谭斐编写；第5、11章由杜天艳、朱莉编写；第6、7章由黄丽编写；第8、9、12、13章由陈山、王海韬编写；第10、14、15、16、17章由谭延良、盛碧琦编写。全书由盛占石教授主审，在审阅过程中，对初稿提出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢，同时对所引用参考文献的各位作者也表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中恐有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2009年5月 于江苏大学

目 录

第1部分 基础知识

第1章 直流电路	2
1.1 电路的基本物理量	2
1.2 电路的基本概念	3
1.3 欧姆定律及其应用	6
1.4 电阻的串联、并联和混联	7
1.5 基尔霍夫定律	9
1.6 电功、电功率.....	10
1.7 电路中电位分析及其计算.....	11
1.8 电路的分析方法.....	13
练习与思考	16
第2章 单相正弦交流电路	20
2.1 正弦交流电的基本概念.....	20
2.2 正弦量的相量表示法.....	22
2.3 单一参数的正弦交流电路.....	23
2.4 电阻、电感与电容元件串联电路的正弦响应.....	27
练习与思考	31
第3章 三相电路	35
3.1 三相电源及其连接.....	35
3.2 三相负载的连接.....	37
3.3 三相电路的功率计算.....	43
练习与思考	44
第4章 磁场与电磁感应	46
4.1 磁场的基本概念.....	46
4.2 载流导体的磁场.....	48
4.3 电磁感应及其应用	50
4.4 自感、互感及应用	52
练习与思考	54
第5章 有关电气设备	56
5.1 变压器.....	56
5.2 互感器.....	65
5.3 高压断路器及其操动机构.....	73
5.4 高压隔离开关	88

5.5	电力电容器	91
5.6	避雷器	94
5.7	消弧线圈	98
5.8	绝缘子、母线及电缆	99
	练习与思考	105
第 6 章	电气识图	110
6.1	电气识图基础知识	110
6.2	电气图的特点、分类与识图要求	114
6.3	变配电所的电气线路图	119
	练习与思考	131
第 7 章	电气运行安全知识	134
7.1	安全用电	134
7.2	节约用电	143
7.3	触电急救知识	144
7.4	电气火灾消防	147
	练习与思考	149

第 2 部分 初 级 工

第 8 章	监盘与抄表	152
8.1	变配电室控制盘的监视	152
8.2	抄表	154
8.3	填写运行日志	163
	练习与思考	164
第 9 章	巡回检查	166
9.1	巡回检查注意事项	166
9.2	一次设备检查	166
9.3	变压器检查	168
9.4	断路器巡视检查	175
9.5	隔离开关巡视检查	179
9.6	线路、电缆与母线的巡视检查	180
9.7	设备缺陷记录填写	182
	练习与思考	183
第 10 章	倒闸操作	185
10.1	填写操作票	185
10.2	线路停送电操作	187
10.3	检修前的安全措施	188
	练习与思考	190
第 11 章	技能操作	192
11.1	变压器的投切操作	192
11.2	断路器的操作	198
11.3	隔离开关的操作	201

11.4 互感器的操作.....	202
11.5 消弧线圈的操作.....	204
练习与思考.....	206

第3部分 中级工

第12章 监盘与抄表	210
12.1 变配电室的控制盘监视.....	210
12.2 抄表.....	213
12.3 填写运行日志.....	216
练习与思考.....	219
第13章 巡回检查	222
13.1 运行中的互感器检查.....	222
13.2 直流系统检查.....	223
13.3 继电保护及二次回路的检查.....	226
练习与思考.....	235
第14章 倒闸操作	237
14.1 倒闸操作前的准备.....	237
14.2 变压器的停送电操作.....	240
14.3 母线倒闸操作.....	241
练习与思考.....	242
第15章 异常运行	244
15.1 电压降低的处理.....	244
15.2 单相接地故障的查找.....	246
练习与思考.....	249
第16章 事故处理	251
16.1 变压器故障处理.....	251
16.2 电力电缆故障处理.....	259
16.3 输电线路故障处理.....	261
练习与思考.....	262
第17章 低压电气运行及其维护	264
17.1 接触器的原理、运行维护及故障处理.....	264
17.2 低压断路器的维护及其故障处理.....	268
17.3 熔断器的维护及故障处理.....	272
17.4 运行中异步电动机的检查.....	273
练习与思考.....	277
参考文献	279

第 1 部分 基础知识

第 1 章 直流电路

1.1 电路的基本物理量

1.1.1 电荷、电流

(1) 电荷 物质是由分子组成的，而分子又是由原子组成的，原子由一个带正电荷的原子核和绕着原子核运动的若干带负电荷的电子组成。在正常情况下，核外电子所带的负电荷量与原子核所带的正电荷量相等，因此原子对外不显示电性。在外力作用下，外层电子离开原有的运动轨道成为自由电子时，这些自由电子可以跑到相接触的另一物体上去，这样失去电子的物体就带正电，获得电子的物体则带负电。因此电荷是客观存在的物质，它既不能创造，也不能消灭，只能从一个物体转移到其他物体。

(2) 电流 电荷有规律的运动称为电流。电流的方向习惯上规定正电荷从电源的正极流出，经导体通过负载流向电源的负极。电流分为直流和交流两种，大小和方向均不随时间变化的电流称为直流电；而大小和方向均随着时间变化的电流称为交流电。电流的大小用电流强度来衡量，即

$$\text{对直流电流} \quad I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

$$\text{对交流电流} \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中 I, i ——电流强度，A（安培）；

Q, q ——电荷量，C（库仑）；

t ——时间，s（秒）。

式（1-1）、式（1-2）表明，电流强度为单位时间内通过导体截面的电荷量。

1.1.2 电位、电压、电动势

(1) 电位 电场中某点的电位是指该点与参考点（零电位点）之间的电位差。高于零电位的点具有正电位，低于零电位的点具有负电位。电位通常用符号 V 表示，单位为伏特（V）。

(2) 电压 两个带电物体或电路中两点之间的电位差称为电压。电压用符号 U 表示，单位为伏特（V）。

(3) 电动势 电路中因其他形式的能量（如机械能、化学能等）转换为电能所引起的电位差称为电动势。电动势用符号 E 表示，单位为伏特（V）。

1.1.3 电阻、电阻率、电导

(1) 电阻 当电流通过导体时，导体对电流的通过具有一定的阻碍作用，这种阻碍作用称为电阻。电阻用符号 R 表示，单位为欧姆（ Ω ）。

实验表明，同一材料导体的电阻值与导体的截面积成反比，与导体的长度成正比。即

$$R=\rho \frac{l}{S} \tag{1-3}$$

式中 R ——在 20°C 时，导体对电流的电阻，欧姆 (Ω)；
 l ——导体长度，米 (m)；
 S ——导体截面积，毫米² (mm²)；
 ρ ——电阻率，欧姆·毫米²/米 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

(2) 电阻率 电阻率定义为长 1m，截面积为 1mm² 导体的电阻值。表 1-1 列出了几种常用材料在 20°C 时的电阻率。

表 1-1 材料的电阻率 温度： 20°C 单位： $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

材料名称	电阻率	材料名称	电阻率	材料名称	电阻率
银	0.0159	铁	0.0978	锰铜	0.47
铜	0.0175	钨	0.0578	康铜	0.48
铝	0.0283	钢	0.13~0.25	镍铬合金	1.09

(3) 电导 电阻的倒数称为电导，即

$$G=\frac{1}{R} \tag{1-4}$$

电导的单位为西门子 (S)。

1.2 电路的基本概念

1.2.1 电路及其组成

电路由电气元件或设备组成。用来实现能量的传输和转换或者信号的收集、传递和处理。

电路一般由四个基本部分组成。

(1) 电源 电路的能源，其作用是将非电能（如机械能、热能、化学能和原子能）形态转变为电能。

(2) 负载 即用电设备，其作用是将电能转换成所需形式的能量。如照明灯、电动机、电炉、电磁铁等。

(3) 控制装置 其作用是根据负载的需要，对电路实行控制、管理。如开关、接触器、断路器以及其他控制元件。

(4) 连接导线 其作用是沟通电路、输送电能或信号。

1.2.2 电路模型

实际电路都是由电磁性质较为复杂的元器件组成的，不便于分析和用数学模型描述。在电路分析中通常抓住其主要性质，忽略其次要性质，将实际电路中的元器件所体现出来的物理性质抽象化，用一些集中的理想电路元件来模拟实际电路元件。比如日光灯电路，其灯管可用电阻元件来表示，其镇流器可用电感串联电阻来表示，如图 1-1 所示。

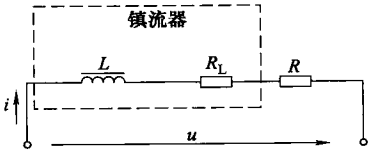


图 1-1 日光灯电路模型图

用理想电路元件组成的电路等效地模拟实际电路的功能，称为电路模型。图 1-2 给出了理想电路元件模型的电路符号和文字符号。

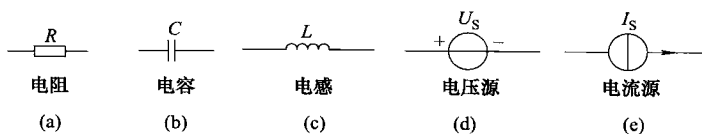


图 1-2 电器元件的基本模型

(1) 电阻 电阻是一种将电能转换成热能的元件，它是一种耗能元件。理想电阻元件的电路符号如图 1-2 (a) 所示。

设加在某导体两端的电压是 1V，产生的电流是 1A，则该导体的电阻为 1Ω 。

$$1\Omega = 10^{-3}\text{k}\Omega$$

(2) 电容器 也称为电容，它是一种用来表征电路中电场能储存这一物理性质的理想元件，它是一种储能元件。电容的文字符号为“C”，电路符号如图 1-2 (b)，单位为法 [拉] (F)。在实际工程中常采用微法 (μF)、皮法 (pF) 单位量纲。

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF}$$

(3) 电感 电感是一种用来表征电路中磁场能储存这一物理性质的理想元件，也是一种储能元件。电感的文字符号为“L”，电路符号如图 1-2 (c)，单位为亨 [利] (H)。

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

上述电阻、电感和电容这三种理想电路元件也称为理想无源元件。理想无源元件都满足以下两点：第一，这些元件都只具有一种参数，即所谓的单一参数元件；第二，元件的参数都是恒定的常数，不随电流、电压和频率的变化而变化，即所谓的线性元件。由线性元件和线性电源元件所构成的电路称为线性电路。

(4) 理想电压源 简称恒压源。理想电压源的特征是：输出电压 U 恒定，与外电路无关，而输出电流 I 取决于外电路。实际的电源（如蓄电池）如果忽略其内部的功率损耗，就可以用理想电压源来代替。理想电压源的电路符号如图 1-2 (d) 所示，文字符号为“ U_S ”，单位为伏 [特] (V)。

$$1\text{V} = 10^{-3}\text{kV} = 10^3\text{mV}$$

(5) 理想电流源 理想电流源简称恒流源。理想电流源的特点是：输出电流 I 恒定，与外电路无关，而输出电压 U 取决于外电路。理想电流源的电路符号如图 1-2 (e) 所示，文字符号为“ I_S ”，单位为安 [培] (A)。

$$1\text{A} = 10^{-3}\text{kA} = 10^3\text{mA}$$

1.2.3 电路的状态

电路的状态主要有以下三种：

(1) 通路 当电源与负载接通，图 1-3 (a) 中的刀开关 S 闭合时，电路中有了电流及能量的传递和转换，电路的这一状态称为通路，而电源这时的状态称为有载。

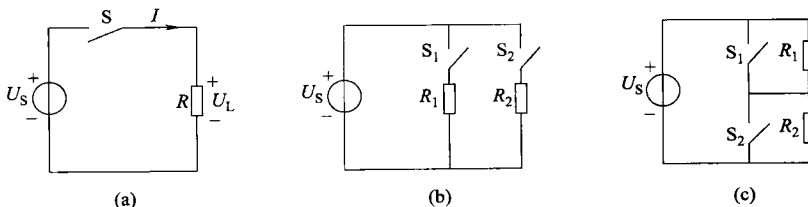


图 1-3 电路的通路、开路和短路

(2) 开路 当某一部分电路与电源断开，该部分电路中没有电流，也无能量的输送和转换，这部分电路所处的状态称为开路。例如图 1-3 (b) 中，当开关 S_1 单独断开时，电阻 R_1

所在的支路开路；当开关 S_2 单独断开时，电阻 R_2 所在的支路开路。

开路处的电流为零，电压应视电路情况而定。

如果开关 S_1 、 S_2 全部断开，即电源与负载全部断开，这时电源的工作状态称为空载。

(3) 短路 当某一部分电路的两端用电阻可以忽略不计的导线或开关连接起来，使得该部分电路中的电流全部被导线或开关所旁路，这一部分电路所处的状态称为短路或短接。例如如图 1-3 (c) 中，当开关 S_1 单独闭合时，电阻 R_1 被短路，此时无电流通过 R_1 ；当开关 S_2 单独闭合时，电阻 R_2 被短路。短路处的电压等于零，短路处的电流视电路而定。

如果图 1-3 (c) 中的开关 S_1 和 S_2 全部闭合，即所有负载全部被短路，这时电源所处的状态也称短路（一般不称短接）。电源短路时，电流比正常工作电流大得多，时间稍长，便会使供电系统中的设备烧毁或引起火灾。因此，图 1-3 (c) 所示电路的接线方式是不妥的，因为它造成了电源的短路。工作中应尽量避免发生这种事故，而且还必须在电路中接入熔断器等短路保护装置，以便在电源短路时能迅速将电源与电路的短路部分断开，从而保护电路。

1.2.4 电流和电压的参考方向

为了对电路进行正确的分析和计算，必须在电路图中用箭标或“+”、“-”号标出电路中的基本物理量电流 I 、电压 U 和电动势 E 的方向或极性，从而列出正确的电路方程。

(1) 电流、电压的实际方向 物理学中规定，电流的实际方向为正电荷的移动方向。电压的实际方向规定为由高电位（“+”极性）端指向低电位（“-”极性）端，即电位降低的方向。电动势的方向规定为在电源内部由低电位（“-”极性）端指向高电位（“+”极性）端，即电位升高的方向。图 1-4 就是一个简单的电路模型。

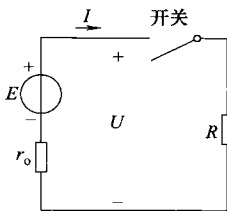


图 1-4 电路模型及
电流、电压方向

(2) 电流、电压的参考方向 在交流电路中，由于电流、电压的方向随时间而变，无法用一个箭标来表示它们的实际方向；同样在较为复杂的直流电路中，尽管它们的方向不变，但在分析电路前往往难以判断出它们的实际方向。因此为了方便地分析和计算电路，通常不管它们的实际方向如何，任意选定一个方向作为它们的参考方向（也称为正方向），然后根据选定的参考方向列出分析计算的电路方程，从计算结果中得到它们的实际方向和大小。若计算结果为正值，则说明参考方向和实际方向一致；若计算结果为负值，则说明参考方向和实际方向相反。图 1-5 中，用方框泛指电路元件，电流的方向为参考方向。图 1-5 (a) 中由于没有指定电流的参考方向，所以电流的数值就失去了意义，而且不能参与计算；图 1-5 (b) 中电流在所示参考方向下，数值为正，说明电流的实际流向与参考方向相同，因此电流是从 a 流向 b；图 1-5 (c) 中电流在所示参考方向下，其值为负，说明电流的实际流向与参考方向相反，即从 b 流向 a。

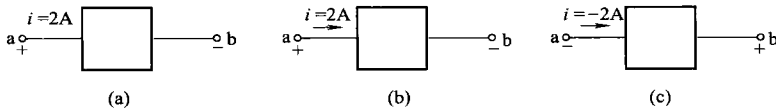


图 1-5 电流、电压及其参考方向

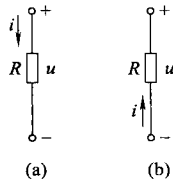


图 1-6 参考方向的关联性

参考方向常采用箭标的表示方法，此外，还可以用“+”、“-”号或双下标表示。其中，“+”号表示高电位、“-”号表示低电位；而双下标的表示方法是首字母表示高电位、次字母表示低电位。

必须指出：在分析电路时，一旦电路的参考方向确定了，那么在电路的整个分析计算过程中就不能再作变动。

(3) 电流、电压的关联方向 当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时，则称它们为关联参考方向，如图 1-6 (a) 所示。否则就是非关联参考方向，如图 1-6 (b) 所示。在分析电路，尤其是在分析无源元件上的电流、电压关系时，常常采用关联参考方向。在图 1-6 (a) 中，电压、电流之间采用了关联参考方向，这时电阻 R 的端电压为

$$U = RI$$

而图 1-6 (b) 则采用了非关联参考方向，这时电阻 R 的端电压为

$$U = -RI$$

在一般情况下，为方便起见，常常定义某一元件端电压的参考极性与电流的参考方向一致，即电流的参考方向就是电压降的参考方向。

1.3 欧姆定律及其应用

1.3.1 部分电路欧姆定律

如图 1-7 所示，在电阻 R 两端加上电压 U ，则通过电阻的电流 I 随着电压的变化而变化，即：通过电阻的电流与电阻两端的电压 U 成正比，与电阻值 R 成反比。这就是部分电路欧姆定律。

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-5)$$

式中 U ——电压，V；

R ——电阻， Ω ；

I ——电流，A。

部分电路欧姆定律也可以用图 1-8 来帮助记忆。计算时，按住要求的量，剩下的就是运算公式。

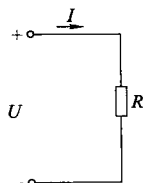


图 1-7 电阻的串联及其等效电路



图 1-8 欧姆定律示意图

1.3.2 全电路欧姆定律

包括电源在内的电路为全电路。在全电路中，电路中通过电阻的电流 I 与电源电压 U 成正比，而与全电路的电阻 $(R + r_0)$ 成反比。即

$$I = \frac{U}{R + r_0} \quad (1-6)$$

式中 r_0 ——电源的内阻， Ω 。

根据欧姆定律所表示的电流、电压和电阻之间的关系，可以很方便地根据已知的两个物理量来求出另外一个物理量。

【例 1-1】 有一台直流电动机的励磁绕组在 220V 电压作用下，通过绕组的电流为

0.427 A, 求绕组的电阻。

解: 该题为已知电压、电流求电阻, 在图 1-8 中, 按住 R , 可得公式: $R = \frac{U}{I}$ 。所以:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.427} \approx 515.2 (\Omega)$$

【例 1-2】有一台直流电源的电动势 $E = 20\text{V}$, 电源的内阻 $r_0 = 2\Omega$, 接入电阻 R 后测得电路中的电流 $I = 2\text{A}$, 求外接电阻值。

解: 由式 (1-6) 可知

$$R = \frac{U}{I} - r_0 = \frac{20}{2} - 2 = 8 (\Omega)$$

1.4 电阻的串联、并联和混联

1.4.1 电阻的串联

如果电路中有两个或两个以上的电阻顺序连接, 而且这些电阻中通过同一个电流, 这样的联接方法称为串联。图 1-9 (a) 就是两个电阻串联连接的电路, 其等效电阻如图 1-9 (b) 所示。

由于 R_1 、 R_2 通过同一个电流, 所以电路的等效电阻等于各个串联电阻之和。即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-7)$$

两个电阻上的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 &= R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可知, 串联电阻上电压的分配与电阻的阻值成正比。电阻串联的应用很多。例如在负载的额定电压低于电源电压的情况下, 可以与负载串联一个电阻, 在电阻上降落一部分电压; 有时为了限制负载中出现过大的电压, 也可以与负载串联一个限压电阻; 为了调节电路中的电压, 一般也可以用在电路中串联一个变阻器的方法来进行调节。

1.4.2 电阻的并联

如果电路中有两个或两个以上的电阻连接在两个公共节点之间, 这样的连接方法称为电阻的并联。电阻并联连接时, 各个电阻上承受的是同一个电压。图 1-10 (a) 就是两个电阻并联连接的电路, 其等效电阻如图 1-10 (b) 所示。

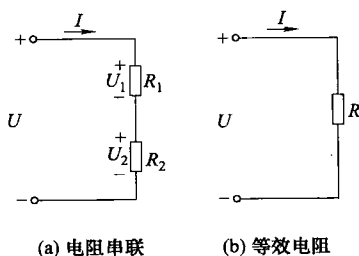


图 1-9 电阻的串联

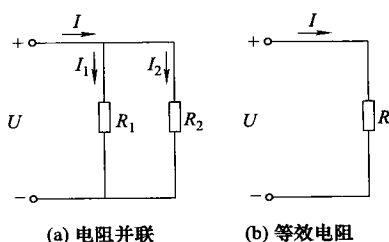


图 1-10 电阻的并联

两个电阻并联可用一个等效电阻 R 来代替, 如图 1-10 (b) 所示。等效电阻的倒数等于各个并联电阻的倒数之和。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-9)$$

有时将等效电阻写成
上式也可写成

$$G = G_1 + G_2 \quad (1-10)$$

当两个电阻并联时，通过电阻 R_1 、 R_2 的电流分别为：

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由此可见，并联电阻上电流的分配与电阻成反比。有时将电路中的某一段与电阻或变阻器并联，以起到分流或调节电流的目的。

负载在很多情况下都是并联运用的。这是因为并联负载处在同一个电压下，任何一个负载的工作情况基本上不受其他负载的影响。

1.4.3 电阻的混联

电阻混联是指电路中电气元件既有串联又有并联，如图 1-11 所示。在该电路中两个 4Ω 的电阻并联，两个 10Ω 的电阻并联，然后它们串联再与 7Ω 的电阻并联。因此电路的等效 R_{ab} 电阻为

$$R_{ab} = [(4//4) + (10//10)] // 7 = 3.5 (\Omega)$$

【例 1-3】 有一个测量电流的微安表，其最大量程为 $100\mu\text{A}$ ，内阻 $r_o = 1\text{k}\Omega$ ，如果要测量 10mA 的电流。问应采取什么措施才能实现？

解：根据并联电阻能够分流的原则，可与电流表并联一个电阻 R_L ，在测量较大电流时，并联电阻分去一部分电流，使通过电流表的电流不超过它的最大量程，如图 1-12 所示。因为

$$I_o = 100\mu\text{A} = 0.1\text{mA}, r_o = 1\text{k}\Omega, I = 10\text{mA}$$

所以

$$I_L R_L = (I - I_o) R_L = I_o r_o$$

$$R_L = \frac{I_o r_o}{(I - I_L)} = \frac{0.1 \times 1}{10 - 0.1} = 0.0101\text{k}\Omega = 10.1 (\Omega)$$

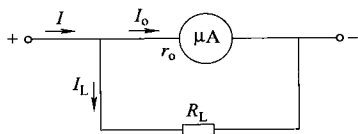


图 1-12 并联电阻扩大电流表量程的电路

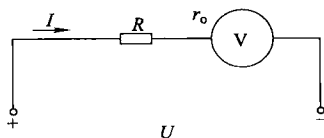


图 1-13 串联电阻扩大电压表量程的电路

即与电流表并联一个 10.1Ω 的电阻就可以测量 10mA 的电流。该并联电阻称为分流电阻。

【例 1-4】 有一个测量电压的伏特表，其最大量程为 100V ，内阻 $r_o = 50\text{k}\Omega$ ，如果要测量 220V 的电压。问应采取什么措施才能实现？

解：根据电阻串联能够分压的原则，可与电压表串联一个电阻 R 进行分压，使得电压表两端的电压不超过它的最大量程，如图 1-13 所示。

因为

$$U = 220\text{V}, U_V = 100\text{V}, r_o = 50\text{k}\Omega$$

按式 (1-8)

$$U_R = \frac{R}{R+r_o} U$$

所以

$$R = \frac{U_R r_o}{U - U_R} = \frac{(220 - 100) \times 50}{100} = 60 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

即与电压表串联一个 $60\text{k}\Omega$ 的电阻就可以测量 220V 的电压。该串联电阻称为分压电阻。

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律 (KL) 与欧姆定律一样, 是分析和计算电路的基本定律。基尔霍夫定律包括电流定律 (KCL) 和电压定律 (KVL)。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

电路中 3 个或 3 个以上的电路元件的连接点称为节点。如, 图 1-14 中有 a 和 b 两个节点。具有节点的电路称为分支电路, 不具有节点的电路称为无分支电路。

两个节点之间的每一条分支电路称为支路。支路中通过的电流是同一电流。在图 1-14 中有 acb、adb、ab 三条支路。

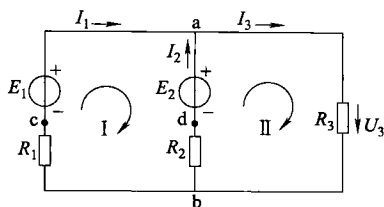


图 1-14 基尔霍夫定律电路举例

基尔霍夫电流定律是说明电路中任何一个节点上各部分电流之间相互约束关系的基本定律。根据电流连续性原理, 电路中任何一点 (包括节点) 均不能堆积电荷。因此, 在任一时刻, 流入任一节点的电流之和应该等于流出该节点的电流之和。即

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-12)$$

或

$$\sum i_i = \sum i_o \quad (1-13)$$

对图 1-14 的节点 a, 则有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

如果流入节点的电流前面取正号, 流出节点的电流前面取负号, 那么节点 a 的电流代数数和为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这就是说, 在任一瞬间, 一个节点上电流的代数数和等于零。即

$$\sum i_i = 0 \quad (1-14)$$

对直流电路而言:

$$\sum I_i = 0 \quad (1-15)$$

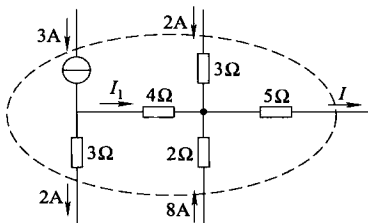


图 1-15 KCL 的推广应用

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中任一节点, 而且也可以推广应用于电路中任何一个假定的闭合面。例如对图 1-15 有:

$$I = 3 + 2 + 8 - 2 = 11 \text{ (A)}$$

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

由电路元件组成的闭合路径称为回路。在图 1-14 中共有 adbc、abda 和 abca 三个回路。

回路未被其他支路分割的单孔回路称为网孔。在图

1-14 中有 adbc 和 abda 两个网孔。

基尔霍夫电压定律是说明电路中任何一个回路中各部分电压之间约束关系的基本定律。其定义为: 在电路的任何一个闭合回路中, 沿同一方向绕行, 任一瞬间电位降的代数数和恒等于零。即

$$\sum u = 0 \quad (1-16)$$

在直流电路中

$$\sum U = 0 \quad (1-17)$$

以图 1-14 的回路 adbc 为例, 沿着图中所示的顺时针绕行方向, 有

$$E_2 - R_2 I_2 + R_1 I_1 - E_1 = 0$$

式中, E_1 和 $R_2 I_2$ 前面取负号, 是因为按规定的绕行方向, 由电源负极到正极, 属于电位升。而 E_2 和 $R_1 I_1$ 前面取正号, 是因为它们的参考方向与绕行方向相同, 所以是电位降。当然需要注意的是: 电源 E_1 、 E_2 和 $R_1 I_1$ 、 $R_2 I_2$ 本身还有数值的正负问题。

上式还可以写成

$$E_2 - E_1 = R_2 I_2 - R_1 I_1$$

这时, 基尔霍夫电压定律可以表述为: 回路中电源电压的电位升之和恒等于无源元件电压的电位降之和。其一般表达式为

$$\sum u = \sum R i \quad (1-18)$$

或

$$\sum U = \sum R I \quad (1-19)$$

基尔霍夫电压定律不仅适用于电路中任一闭合的回路, 而且还可以推广应用于非闭合回路的情况。如图 1-16 所示, 只要将 ab 两点间的电压作为电压降一样考虑进去, 按照图中选取的绕行方向, 则有

$$U_{ab} - E - U = 0$$

【例 1-5】 写出图 1-17 中 a、b、c、d 节点的电流方程和回路 abcda 的电压方程。

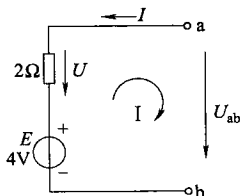


图 1-16 KVL 的推广应用

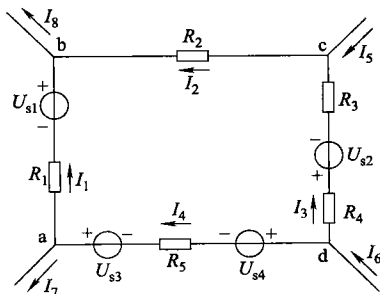


图 1-17 例 1-5 图

解: (1) 电流方程 按 KCL 定律:

$$a: I_4 - I_1 - I_7 = 0$$

$$b: I_1 + I_2 - I_8 = 0$$

$$c: I_3 + I_5 - I_2 = 0$$

$$d: I_6 - I_3 - I_4 = 0$$

(2) 电压方程 按 KVL 定律:

选择绕行方向 abcda, 则:

$$R_1 I_1 - U_{s1} - R_2 I_2 - R_3 I_3 - U_{s2} - R_4 I_3 + U_{s4} + R_5 I_4 - U_{s3} = 0$$

或:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_3 + R_5 I_4 = U_{s1} + U_{s2} + U_{s3} - U_{s4}$$

1.6 电功、电功率

1.6.1 电路的功率

电路的作用之一是将电能转换成其他形式的能量, 描述能量的转换速率的物理量是电功率 (简称功率)。一个电路元件 (或一段电路) 上的电功率等于该元件 (或该段电路) 两端的电压