

变电站值班员

职业技能鉴定培训教材

丁毓山 金开宇 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

变电站值班员

职业技能鉴定培训教材

丁毓山 金开宇 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.ccm.cn

内 容 提 要

本书根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范·变电站值班员》编写,是变电站值班员职业技能鉴定的培训教材。全书共分六篇:电路基础知识、电气设备、计算机基础知识、主接线与倒闸操作、继电保护、实际操作部分实践知识。在附录中还给出了初级和中级变电站值班员鉴定试题,供参考。

本书可供变电站值班员阅读,也可供相关专业技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电站值班员职业技能鉴定培训教材/丁毓山,金开宇主编.-北京:中国水利水电出版社,2003

ISBN 7-5084-1499-3

I.变… II.①丁…②金… III.变电所-电工-职业技能鉴定-教材 IV.TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 030391 号

书 名	变电站值班员职业技能鉴定培训教材
作 者	丁毓山 金开宇 主编
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利本电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 22 印张 522 千字
版 次	2003 年 7 月第一版 2003 年 7 月第一次印刷
印 数	0001—5100 册
定 价	36.00 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

为适应开展电力职业技能鉴定工作的需要，按照劳动和社会保障部关于制定国家职业标准，加强职业技能鉴定教材建设的要求，电力行业职业技能鉴定指导中心在有关省（直辖市、自治区）电力公司和水电工程单位的大力支持下，统一组织编写了电力职业技能鉴定指导书。

本书是在《指导书》要求的基础上，根据职业培训、考核的特点，以实际技能操作为主线，拟定了下述内容。

第一篇：电工基础知识，包括直流电路、电与磁、单相交流电路、三相交流电路等。

第二篇：电气设备，包括变压器、仪用互感器、断路器、避雷器、电抗器等。

第三篇：计算机基础知识，包括计算机的构成原理、计算机操作系统、计算机网络等。

第四篇：变电所的主接线和倒闸操作，包括变电所各种类型主接线、有关倒闸操作的安全规定以及各项倒闸操作的实施。

第五篇：继电保护与二次回路，包括继电保护事业的发展、继电保护与二次回路的各种图形与符号、断路器的控制、线路保护、变压器保护、操机保护、计量仪表等内容。

第六篇：实际操作部分，包括初、中、高、技师的单项操作、多项操作和综合操作等内容。

参与本书编写的人员有：沈阳市于洪农电局金开宇、孙成宝、程云峰、周丽、裴路国、王天策、李伟同志；沈阳市新城子区农电局刘杰同志；丹东市电业局吕志恒、唐燕、张福华、邢焱同志；锦州电业局鞠英俊同志；东港市农电局邹晓彤同志；辽阳电业局窦文雷、关文鹏同志；灯塔市农电局高宏同志；四川省成都市省信息工程学校王凌

同志；沈阳农业大学电力系吴仕宏、丁毓山同志。

参与本书的所有编者，衷心地希望广大培训教师和读者，能对本书的结构和内容提出宝贵意见，以鞭策我们以后的工作。

编者

2003年3月

目 录

前 言

第一篇 电工基础知识

第一章 直流电路	1
第一节 直流电路基本概念和简单直流电路	1
第二节 复杂电路计算	6
复习思考题	15
第二章 电与磁	24
第一节 磁的性质和电流的磁场	24
第二节 感应电势和载流导体受力	28
复习思考题	32
第三章 单相交流电路	34
第一节 R 、 L 、 C 串联电路的分析	34
第二节 R 、 L 、 C 并联电路的分析	38
复习思考题	40
第四章 三相交流电路	49
第一节 三相电势的产生和三相电路的连接	49
第二节 不对称三相电路的概念和三相电路的功率	55
复习思考题	59

第二篇 电 气 设 备

第一章 变压器	69
第一节 变压器的工作原理	69
第二节 变压器的额定技术数据	70
第三节 变压器的构造	74
第四节 变压器分接开关	77
第五节 变压器并列运行的条件和经济运行	79
第六节 变压器运行规程	82
复习思考题	90
第二章 仪用互感器	95

第一节 电压互感器	95
第二节 电流互感器	101
第三节 互感器的运行	105
复习思考题	107
第三章 高压开关电器	109
第一节 高压断路器的种类、结构组成和参数	109
第二节 油断路器的灭弧原理	116
第三节 操动机构	119
第四节 少油断路器	121
第五节 六氟化硫 (SF ₆) 气体	123
第六节 六氟化硫 (SF ₆) 断路器	127
第七节 真空断路器	129
第八节 高压隔离开关	136
复习思考题	137
第四章 防雷与接地设备	140
第一节 大气过电压	140
第二节 防雷保护设备	141
第三节 接地	145
第四节 接地方式	150
复习思考题	152
第五章 消弧线圈的运行	154
第一节 小接地系统的单相接地运行	154
第二节 消弧线圈的作用原理及补偿方式	155
第三节 消弧线圈的运行	157

第三篇 计算机基础知识

第一章 计算机构成原理	158
第一节 计算机的分类和其在电力系统中的应用	158
第二节 计算机的组成	159
复习思考题	165
第二章 Windows 98 操作系统	167
第一节 操作系统的基本知识	167
第二节 中文 Windows98 基础	168
第三节 利用资源管理器管理文件	172
复习思考题	174
第三章 计算机局域网	177

第一节 计算机网络的优点和分类	177
第二节 局域网拓扑结构	178
复习思考题	181

第四篇 变电所的主接线和倒闸操作

第一章 变电所的主接线	183
第一节 变电所的主接线装设原则	183
第二节 几种常用的主接线	184
第二章 变电所倒闸操作	194
第一节 电业安全工作规程关于倒闸操作的有关规定	194
第二节 倒闸操作的实施	199
第三节 倒闸操作的实例	200
第四节 变电所倒闸操作综合举例	203
第五节 220kV 变电所倒闸操作规程实例	211
第六节 电网运行管理	214
复习思考题	218

第五篇 继电保护与二次回路

第一章 继电保护和二次回路的基础知识	220
第一节 继电保护的发展和二次回路的文字和图形符号	220
第二节 二次回路接线图的绘制	225
第二章 断路器的控制	233
第一节 断路器控制要求和原则	233
第二节 具有防跳装置的灯光监视控制回路	234
第三节 音响监视和液压操动机构的断路器控制回路	236
第四节 自动重合闸装置	239
第五节 备用电源自动投入装置 (BZT)	244
第六节 低频减载装置	248
第三章 线路保护	250
第一节 三段过流保护装置	250
第二节 电流电压联锁速断保护	253
第三节 电流方向保护	254
第四节 距离保护	262
第五节 高频保护	262
第四章 变压器保护	266
第一节 变压器保护的一般概念	266

第二节	变压器过流保护	269
第三节	变压器差动保护	270
第四节	变压器保护接线举例	275
第五章	继电保护综合类题	279
第一节	填空题、判断题、画图题	279
第二节	问答题	284
第六章	微机保护	289
第一节	微机保护的基本知识	289
第二节	线路保护的装设原则及系统的功能配置	290
第三节	35/10kV 线路保护的整定计算	293
第四节	变压器微机保护	295
第五节	变压器微机差动保护的工作原理和保护配置	299
第七章	计量仪表	303
第一节	计量仪表及配电装置的安装要求	303
第二节	计量及配电装置的施工工艺	303
第三节	计量仪表及配电装置安装实例	307

第六篇 变电站值班员职业技能鉴定的实际操作部分

第一章	初级工单项操作	312
第二章	多项操作、综合操作节选	326
附录一	变电站值班员职业技能鉴定初级工试卷	337
附录二	变电站值班员职业技能鉴定中级工试卷	341

第一篇 电工基础知识

第一章 直流电路

第一节 直流电路基本概念和简单直流电路

一、电流

导体中的自由电子在电场力的作用下，做有规则的定向运动，称为电流。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向。因此，在金属导体中，电流的方向与自由电子的实际移动方向是相反的。

电流的大小用电流强度来表示，其数值等于单位时间内通过导体截面的电量，通常用符号 I 表示，即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1-1)$$

式中 I ——电流强度，A；

Q ——通过导体截面的电荷量，C；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间，S。

电流强度的单位可用千安 (kA)、安 (A)、毫安 (mA)、微安 (μ A) 表示，且

$$1\text{kA} = 1000\text{ A}$$

$$1\text{A} = 1000\text{ mA}$$

$$1\text{mA} = 1000\text{ }\mu\text{A}$$

二、电位和电压

1. 电位

电场中某点的电位，在数值上等于单位正电荷沿任意路径从该点移至无限远处电场力所做的功。其单位为伏特，简称伏 (V)。

在电场中电位等于零的点叫做参考点，凡电位高于零电位的点，电位为正，凡电位低于零电位的点，其电位为负。通常往往以大地作为参考点。

2. 电压

电场中任意两点间的电压，等于这两点电位差，因此电压也称电位差。

电压的单位可用千伏 (kV)、伏 (V)、毫伏 (mV)、微伏 (μ V) 表示，即

$$1\text{kV} = 1000\text{ V}$$

$$1\text{V} = 1000\text{ mV}$$

$$1\text{mV} = 1000\text{ }\mu\text{V}$$

电场中各点的电位，随着参考点的改变而不同，但是无论参考点如何改变，任意两点间的电位差是不变的。电压的正方向是从高电位点指向低电位点。

三、电源的电势

电势是电源内部的电源力，常称局外力，是将单位正电荷从电源负极移到正极时所做的功。因此，电源电势是衡量电源力做功能力的物理量，可用下式表示为

$$E = \frac{A}{Q} \quad (1-1-2)$$

式中 E ——电势，V；

A ——电源力所做的功，J；

Q ——正电荷的电荷量，C。

电势的方向规定为电源力推动正电荷运动的方向，即从负极指向正极的方向，也就是电位升高的方向。

四、电阻和电阻率

在电场力的作用下，电流在导体中流动时，所受到的阻力，称为电阻，用“ R ”或“ r ”表示。电阻常用的单位为兆欧（ $M\Omega$ ）、千欧（ $k\Omega$ ）、欧（ Ω ），即

$$1M\Omega = 1000000 \Omega$$

$$1k\Omega = 1000 \Omega$$

$$1\Omega = 1000m\Omega = 1000000 \mu\Omega$$

当导体两端的电压是1V，导体中的电流是1A时，这段导体的电阻为1 Ω 。即

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

同一种材料对电流的阻力，主要决定于导体的长度和横截面积。如截面积相同时，则导体越长，电阻越大；如长度相同时，则截面积越大，电阻越小。所以电阻与导线长度 L 成正比，而与导线截面积 S 成反比。即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-1-3)$$

式中 ρ ——电阻率。

ρ 的物理意义是：在+20℃时，长度为1m，横截面积为1mm²的导线的电阻值。与材料性质有关， ρ 值越小，导电性能越好。 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

电流通过导体时，其温度增高；导体的环境温度增高时，其温度也增高。温度升高，导体中分子运动加快，电子与分子碰撞机会增多，致使导体的电阻增大。表1-1-1中所列的 R 值为20℃时的数值，温度增高， R 值增大。

表 1-1-1

温度为 20℃时的 ρ 和 α 值

材料	ρ $\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	α $\left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$	材料	ρ $\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	α $\left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$
铜	0.0175	0.004	锡	0.114	0.00438
铝	0.0283	0.004	铅	0.222	0.00387
铁	0.1	0.0057	康铜	0.44	0.00004

为了考虑温度对导体电阻的影响,引入了温度系数 α , 其物理意义是: 温度每升高 1°C 时, 1Ω 电阻的变化量。

设温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时电阻的数值为 R_t , 若温度由 $t^{\circ}\text{C}$ 增加到 $T^{\circ}\text{C}$, 则电阻的变化量为

$$\Delta R = R_t \alpha (T - t)$$

由此, 在 $T^{\circ}\text{C}$ 时电阻的总值应为电阻的原值 R_t 加上变化值 ΔR , 即

$$R_T = R_t + \Delta R = R_t + R_t \alpha (T - t) = R_t [1 + \alpha (T - t)] \quad (1-1-4)$$

式中 R_T ——温度为 $T^{\circ}\text{C}$ 时的电阻, Ω ;

R_t ——温度为 20°C 时的电阻, Ω 。

五、欧姆定律

1. 简单直流电路的意义

简单直流电路是指能用欧姆定律对电阻串、并、混联求解的电路。

2. 外电路欧姆定律

外电路欧姆定律指出: 在一段电路中, 流过电阻 R 的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比, 而与这段电路的电阻成反比。用公式表示是

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

或写成

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

式中 U ——电压, V ;

I ——电流, A ;

R ——电阻, Ω 。

3. 全电路欧姆定律

全电路欧姆定律是用来说明在一个闭合电路中, 电势、电压、电流、电阻之间基本关系的定律。即在一个闭合电路中, 电流与电源的电势 E 成正比, 与电路中电源的内阻 r 和外电阻 R 之和成反比。用公式表示为

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1-1-6)$$

式中 E ——电路中电源电势, V ;

I ——电流, A ;

R ——外电阻, 即负载电阻, Ω ;

r ——电源内阻, Ω 。

六、功和功率

在一段时间内, 电源力 (电场力) 做的功称为电功或电能, 电能用符号 A 表示。其总值是焦耳 (J)。通常电能也以电量的形式表现, 以千瓦时 ($\text{kW}\cdot\text{h}$) 为单位, 称为度。二者之间的换算关系为 $1 \text{度} (\text{kW}\cdot\text{h}) = 3.6 \times 10^6 \text{焦} (\text{J})$

单位时间内电源力所做的功称为电功率。电功率用符号 P 表示, 常用的单位为千瓦 (kW)、瓦 (W) 等, 即

$$1\text{kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1\text{W} = 1000 \text{ mW}$$

电功率的计算公式为

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UI t \times 10^{-3}}{t} = UI \times 10^{-3} = I^2 R \times 10^{-3} = \frac{U^2}{R} \times 10^{-3} \quad (1-1-7)$$

式中 P ——电功率, kW;

t ——时间, h;

A ——电能, kW·h。

$$1\text{kW} = 1.36 \text{ 马力}$$

七、电流的热效应

当电流流过导体时, 由于导体具有一定的电阻, 因此就要消耗一定的电能。这些电能不断地转变为热能, 使导体温度升高, 这种现象就叫做电流的热效应。根据能量守恒原理, 电路中消耗的电功率将全部转换为热功率, 由式 (1-1-7) 知

$$Q = 0.24 I^2 R \text{ (cal/s)} \quad (1-1-8)$$

式中 0.24——热功当量, 它说明 1 焦耳的电能与 0.24 卡的热量相当。

八、短路和断路

如果电源通向负载的两根导线不经过负载而相互直接接通, 就发生了电源被短路的情况, 这时电路中的电流可能增大到远远超过导线所允许的电流限度。

断路, 一般是指电路中某一部分断开, 例如导线、电气设备的线圈等断线, 使电流不能导通的现象。

短路会造成电气设备的过热, 甚至烧毁电气设备、引起火灾。同时, 短路电流还会产生很大的电动力, 造成电气设备损坏, 严重的短路事故甚至还会破坏系统稳定, 所以对运行中的电气设备应采取一定的保护措施, 例如安装自动开关、熔断器等, 当发生短路故障时, 这些装置可将短路点及时切除, 以防止短路造成电气设备的破坏。

九、电阻的串并联

1. 串联电路

图 1-1-1 所示的为两个电阻 R_1 、 R_2 的串联电路, 其特点是:

- (1) 两个电阻 R_1 、 R_2 首尾相接, 没有分支。
- (2) 电路总电压等于 R_1 、 R_2 上的分电压 U_1 、 U_2 之和。
- (3) 所有电阻流过相同的电流。

串联电路的总电阻等于参与串联的所有电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2$$

对于 n 个电阻的串联电路的总电阻等于

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-1-9)$$

2. 电阻的并联

并联电路的特点是:

(1) 所有参加并联电阻的首端并接在一起, 末端并接在一起, 所有电阻受相同电压的作用, 如图 1-1-2 所示。

(2) 并联电路总电流 I 等于各个并联电阻的电流 I_1 、 I_2 、 $\cdots$ 、 I_n 之和。如果用图

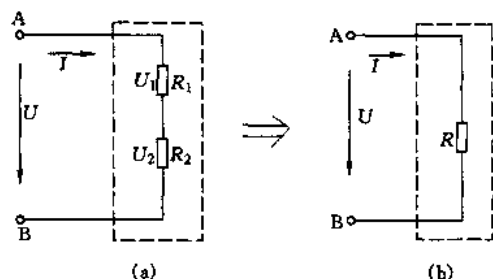


图 1-1-1 串联电路

(a) 实际电路; (b) 等效电路

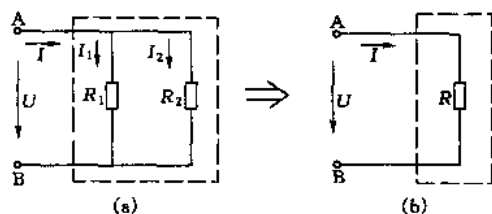


图 1-1-2 并联电路

1-1-2 (b) 来等效图 1-1-2 (a), 就是用 R 来代替 R_1 、 R_2 的作用。对图 1-1-2 (a) 的总电流, 应等于所有电阻的各个分电流之和, 即

$$I = \frac{U}{R} = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

故

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-1-10)$$

对于 n 个电阻并联则有

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-1-11)$$

十、纯电容电路

1. 电容电路中的物理现象

能够储存电荷的容器称为电容器, 例如, 两块金属板便可构成一个电容器, 如图 1-1-3 所示。在极板面积一定的条件下, 电容器的正、负极板上积累的电荷 Q 越多, 其极板间的电位差越高。

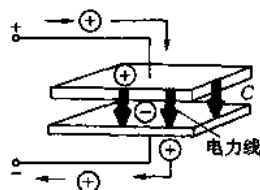


图 1-1-3 电容器

电容器电容的大小是按着下述方法定义的: 两极板间的电压升高 1V 所需要的电荷量, 称为电容器的电容, 单位为法拉, 简称法, 用符号 F 表示。若将两极板间电压提高 100V, 所需的电荷量为 50C, 则该电容器的电容 C 为

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{50}{100} = 0.5 \text{ (F)} \quad (1-1-12)$$

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

在这里有一个很重要的概念是: 电容器两端电压与电荷量成正比例, 即 $Q = CU$ 。由于极板上电荷量 Q 必须逐步积累, 不能突变, 所以电容器两端电压不能突变。

此外, 若电容器两端电压上升得快, 表明极板上电荷积累得快, 通过电容器的电流就越大; 若两端电压下降得快, 表明电荷泄放得快, 其放电电流就越大。可见电容器中的电流由端电压随时间的变化率确定。因此, 通过电容器的电流只能是暂态电流和交流。

2. 电容的串并联计算公式

(1) 电容的并联计算公式

电容的并联公式如同电阻的串联计算公式一样, 如有 n 个电容并联, 则总电容为

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n \quad (1-1-13)$$

因为电容并联相当于电容器的极板扩大一样。

(2) 电容的串联计算公式

电容的串联公式如同电阻的并联计算公式一样, 如有 n 个电容并联, 则总电容得倒数为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (1-1-14)$$

对于两个电容则有

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1-1-15)$$

因为电容串联是把电荷量按电容器的容量分布在各个极板上, 相当电容器的极板缩小一样。

第二节 复杂电路计算

一、基尔霍夫定律

1. 电路的节点

复杂电路是不能用串、并、混联简化的电路。在电路中三条及以上电路汇聚的一点, 叫做节点。

2. 支路

在电路中两个节点之间的电路元件叫做支路。即支路可以是有源元件, 也可以是无源元件。

3. 回路

由数条支路所构成的闭合电路, 叫做回路。

4. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律的内容是: 在网路中, 汇聚于电路节点所有电流的代数和等于零。例如, 对于图 1-1-4 的节点 A 有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-1-16)$$

或者写成

$$\sum_A I = 0$$

式中 $\sum_A$ 号下的字母 A 表示节点 A。

基尔霍夫第一定律也称为节点电流定律。节点电流的方向如果假定流入为正, 则流出为负, 或者相反。第一定律说明流入节点的电流等于流出节点的电流, 它实质上是电荷不灭定律, 即在节点处电荷既不能消失, 也不能再生, 更不能储容, 流出的电荷等于流入的电荷。

5. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律的内容是: 在闭合回路中, 所有电势的代数和等于回路中所有电阻压降的代数和。现利用图 1-1-5 来证明这个结论。

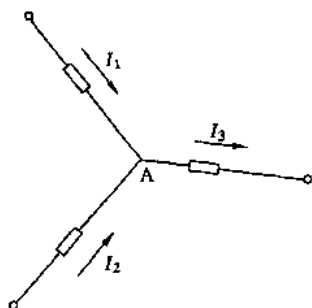


图 1-1-4 基尔霍夫
第一定律图形

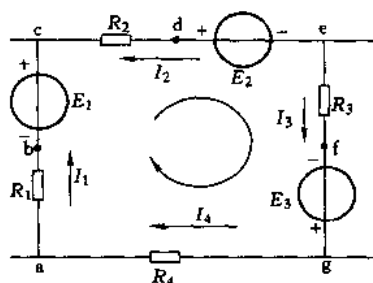


图 1-1-5 基尔霍夫
第二定律图形

今假定点 a (图 1-1-5) 为参考点, 即 $\varphi_a = 0$, 则

$$b \text{ 点的电位} \quad \varphi_b = \varphi_a - I_1 R_1$$

$$c \text{ 点的电位} \quad \varphi_c = \varphi_b + E_1$$

$$d \text{ 点的电位} \quad \varphi_d = \varphi_c + I_2 R_2$$

$$e \text{ 点的电位} \quad \varphi_e = \varphi_d - E_2$$

$$f \text{ 点的电位} \quad \varphi_f = \varphi_e - I_3 R_3$$

将上述所有方程式等号左边的相加, 等号右边的也相加, 将所有电位都消去, 再将剩余部分经过移项后, 得

$$E_1 + E_3 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4$$

$$\sum E = \sum IR \quad (1-1-17)$$

公式 (1-1-17) 就是第二定律的内容, 式中符号的选取应遵循下述原则: 凡与循行方向一致的电势、电流取正号, 相反的取负号。所谓循行方向就是沿回路求出各点电位时的绕行方向, 这个绕行方向也是任意选取的。

二、支路电流法

图 1-1-6 所示的电路, 电势、电阻已标在图中, 求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 中的电流。

解: 第一步, 先假定三个支路中电流的方向, 如图 1-1-6 中 I_1 、 I_2 、 I_3 所示。

第二步, 列写节点方程式。

$$\text{对节点 a 有} \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-1-18)$$

$$\text{对节点 b 有} \quad -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (1-1-19)$$

式 (1-1-18)、式 (1-1-19) 只是符号相反, 因此, 两个方程只有一个是独立的, 即可用式 (1-1-18) 改变符号的办法推导出式 (1-1-19) 来。图 1-1-6 中有两个节点, 可列写一个独立方程式。一般说来, 如果有 n 个节点, 则可列写 $n-1$ 个独立方程式。

第三步, 列写回路电压方程式。

在电路中要求出的有三个电流: I_1 、 I_2 、 I_3 , 因此需要三个独立方程式联立求解。而由基尔霍夫第一定律已列写一个独立方程式 (1-1-18), 其余两个独立方程可由基尔霍夫第二定律来补写。一般来讲, 如果要求电流数为 m 个, 节点为 n 个, 则由基尔霍夫第二定律所补写的回路方程数为 $P = m - n + 1$ 个。

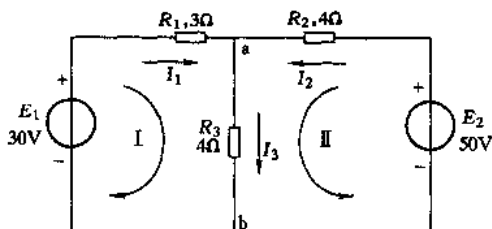


图 1-1-6 支路电流法电路图

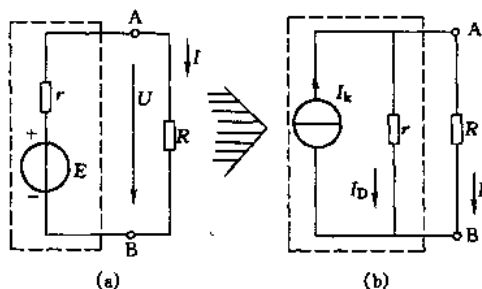


图 1-1-7 电源变换

在列写回路方程时，应选定循行回路的方向，在图 1-1-6 中，循行方向用罗马数字 I 和 II 标出，按此循行方向列写方程如下

$$\text{回路 I} \quad E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (1-1-20)$$

$$\text{回路 II} \quad E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad (1-1-21)$$

第四步，联立求解。将式 (1-1-18) 代入式 (1-1-20) 和式 (1-1-21)，代入具体数字后，得

$$30 = 7I_1 + 4I_2$$

$$50 = 4I_1 + 8I_2$$

$$\text{解得} \quad I_1 = 1\text{A}, I_2 = 5.75\text{A}, I_3 = I_1 + I_2 = 1 + 5.75 = 6.75 (\text{A})$$

三、电流源、电压源及其变换

1. 电压源

电压源是电池 E 和内阻 r 串联来表示实际电源的一种模型，如图 1-1-7 (a) 所示。这种模型的电源电势、内阻压降、端电压有如下关系

$$E = U + Ir \quad (1-1-22)$$

2. 电流源

现在将上式两边同除以电阻 r ，则有

$$\frac{E}{r} = \frac{U}{r} + I$$

若设 $\frac{E}{r} = I_k$ ， $\frac{U}{r} = I_D$ ，则上式可改写为

$$I_k = I_D + I \quad (1-1-23)$$

式中 I_k ——短路电流；

I_D ——假想电流；

I ——负载电流。

这样，便可将图 1-1-7 (a) 的串联电源模型等效成图 1-1-7 (b) 的并联模型。

在这个并联模型中，既能发出恒定的电流 I_k ，又有内阻 r 与 I_k 并联，通常称它为电流源。在电流源中，电源发出的恒定电流 I_k 被分成两部分：

(1) I_D 供给电源内阻消耗。

(2) I 供给外负载。