

第二版

进网作业电工

通用培训教材

JINWANG ZUOYE DIANGONG
TONGYONG PEIXUN JIAOCAI

孙方汉 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

进网作业电工

通用培训教材

(第二版)

孙方汉 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依据《进网作业电工培训考核大纲》和《电力行业职业技能鉴定规范》对运行、维修电工的基本要求编写而成。全书共十二章,内容包括电工基础知识、电力系统与电力供应、电力变压器、高低压开关设备、无功补偿和高次谐波、电力线路、过电压防护与绝缘预防性试验、继电保护与二次回路、电工测量技术、用电设备、安全用电知识和典型事故案例。

本书可作为进网作业电工的培训教材,亦可供进网作业电工为提高专业技术水平自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

进网作业电工通用培训教材/孙方汉编著. —2 版. —北京:
中国电力出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-5123-4604-8

I. ①进… II. ①孙… III. ①电工技术-技术培训-教材
IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 134921 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 2 月第一版

2013 年 8 月第二版 2013 年 8 月北京第七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 613 千字

印数 19501—22500 册 定价 49.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

本书自 2003 年出版以来,已经十年有余,承蒙广大读者眷顾,得以先后印刷六次,不胜感谢。

古人云,“良工不以拙示人”。在技术培训教育中,教材是基础。因此,编写教材时,责任重大,不可掉以轻心。

此次修订主要参考了使用本书的广大师生结合教学实践、心得体会提出的修改建议。另外,考虑到近几年我国主要电气设备技术标准很多已修订改版。例如,随着 GB 50150—2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》替代 GB 50150—1991,各主要电气设备的交流耐压试验数据不少都已修改。又如,随着 GB/T 6451—2008《油浸式电力变压器技术参数和要求》替代 GB/T 6451—1999,对节能变压器的损耗水平要求更为严格,S8 型变压器随之退出市场。这些情况都需要在教材中及时反映出来。因此决定将本书修订后再版。

此次再版,书中涉及主要电气设备的技术要求和具体数据都与我国现行新规程——作了核对修订,并对书中原有若干内容作了补充调整,使教材内容更贴近实际。每章之后,将原有的复习思考题改为“考试复习参考题”,其形式和内容尽量符合进网作业电工考试要求,便于考生练习。

希望本书既适于用作进网作业电工培训考试时的参考教材,又可用作从事进网作业电工工作人员的自学教材。

限于编者水平,书中如有疏漏之处,敬请不吝指正,以利下次再版时修正,不胜感谢之至!

目 录

前言

第一章 电工基础知识	1
第一节 直流电路中的基本物理量	1
一、电动势；二、电位和电压；三、电流；四、电阻和电导	
第二节 直流电路基本定律	3
一、一段电路欧姆定律；二、全电路欧姆定律；三、基尔霍夫定律（KCL 和 KVL 定律）	
第三节 直流复杂电路的计算	5
一、电路的简化；二、支路电流法；三、节点电压法；四、叠加原理	
第四节 电功、电功率、电流的热效应	9
一、电功；二、电功率；三、电流的热效应	
第五节 电磁和电磁感应	10
一、电流产生的磁场；二、电磁力——电动机左手定则；三、电磁感应；四、自感与互感	
第六节 电容	16
一、电容器；二、电容器的电容量；三、电容器的充电和放电；四、电容器的电场能量； 五、电容器的串、并联	
第七节 单相正弦交流电路	19
一、正弦交流电；二、正弦交流电的表示法；三、正弦交流电的运算；四、纯电阻正弦交流电路； 五、纯电感正弦交流电路；六、纯电容交流电路；七、电阻电感串联电路；八、电阻电容串联电路； 九、电阻、电感、电容串联电路——电压谐振电路；十、电阻、电感、电容并联电路——电流谐振电路； 十一、集肤效应和邻近效应	
第八节 三相交流电路	32
一、对称三相交流电；二、三相电源的接法；三、三相负荷的连接；四、三相电路的功率； 五、三相电路线电流之和与线电压之和的特点；六、三相不对称交流电路；七、三相电源相序的测量； 八、不对称三相负荷的对称分量	
第九节 电子技术基础及其应用	41
一、半导体器件基本知识；二、基本放大电路；三、半导体整流电路；四、滤波电路； 五、直流稳压电路；六、晶闸管基础知识	
考试复习参考题	53

第二章 电力系统与电力供应	57
第一节 概述	57
一、电力系统基本概念；二、电力系统的负荷和用电负荷的分级	
第二节 电力系统的电压等级	59
一、标称电压和额定电压；二、系统标称电压（系统额定电压）的标准值；三、发电机额定电压；四、电气设备额定电压和最高允许运行电压；五、高压、低压电气设备的区分	
第三节 接地分类和电力系统中性点运行方式	62
一、接地分类；二、电力系统中性点运行方式	
第四节 变电站的主接线	68
一、概述；二、变电站一次主接线的基本形式	
第五节 电力供应与使用	71
一、供电质量；二、与电工进网作业相关的电力法律和法规	
考试复习参考题	77
第三章 电力变压器	80
第一节 变压器工作原理和结构	80
一、变压器工作原理；二、变压器的电动势方程式；三、变压器相量图；四、电力变压器的结构	
第二节 变压器主要技术参数	86
一、额定容量、额定电压、额定电流和额定频率；二、空载电流、空载损耗、负荷损耗、额定阻抗电压；三、变压器的联结组标号；四、温升和冷却方式；五、变压器的型号表示法	
第三节 变压器的调压装置	96
一、电力变压器调压的目的和方法；二、调压开关使用中的注意事项	
第四节 变压器运行与维护	101
一、新变压器的投入运行；二、变压器的运行监视；三、变压器的异常情况处理；四、变压器停运操作；五、变压器并列运行；六、变压器的检修和干燥	
第五节 低损耗变压器	112
一、变压器的技术标准；二、低损耗电力变压器；三、非晶合金配电变压器；四、电力变压器的性能数据	
第六节 变压器油	116
一、变压器油的物理性质；二、变压器油的防潮与抗劣化；三、混油注意事项；四、油中溶解气体的分析与判断（气体色谱分析）；五、变压器油的合格标准	
第七节 气体继电器	122
考试复习参考题	122
第四章 高低压开关设备	126
第一节 短路电流及其计算方法	126
一、短路的定义及种类；二、短路造成的严重后果；三、短路电流大小的计算	
第二节 高压断路器	131

一、电弧基本理论及电气触头；二、高压开关设备分类；三、对高压断路器的基本要求； 四、各种高压断路器的性能和应用	
第三节 熔断器	148
一、熔断器熔体的安秒特性；二、高压熔断器的种类和技术特性；三、低压熔断器的种类 和技术特性	
第四节 高压负荷开关和隔离开关	157
一、高压负荷开关；二、高压隔离开关	
第五节 高压开关的操动机构	160
一、电磁操动机构；二、弹簧储能操动机构；三、液压操动机构	
第六节 低压开关设备	167
一、概述；二、刀开关；三、低压断路器；四、交流接触器	
第七节 成套开关设备和箱式变电站	174
一、高压开关柜；二、低压开关柜；三、箱式变电站和组合式变压器	
考试复习参考题	182
第五章 无功补偿和高次谐波	186
第一节 无功补偿方法	186
一、交流电的能量转换；二、有功和无功；三、无功补偿	
第二节 并联电容器的应用与运行维护	189
一、并联电容器补偿无功的特点；二、并联电容器的构造；三、电力电容器的技术参数和 额定工作条件；四、并联电容器的容量选择；五、高压并联电容器组的接线方式比较； 六、并联电容器的运行维护	
第三节 公用电网谐波、电压波动和闪变的允许限值	198
一、公用电网谐波；二、公用电网谐波电流允许值；三、公用电网谐波电压限值；四、电 压波动和闪变的允许值	
考试复习参考题	202
第六章 电力线路	204
第一节 架空电力线路	204
一、概论；二、架空电力线路的主要技术数据；三、架空电力线路的绝缘配合、防雷和接 地；四、架空电力线路允许载流量；五、架空配电线路导线最小允许截面；六、架空电力 线路的保护区	
第二节 高、低压接户线和低压内线装置	213
一、高、低压架空进户装置和接户线、进户线；二、低压内线装置	
第三节 电力电缆	220
一、电力电缆的种类及结构特点；二、电力电缆的型号；三、电力电缆的电压值及其选 择；四、电力电缆的允许载流量；五、电力电缆的敷设方法；六、电力电缆敷设深度及平 行跨越注意事项；七、电缆附件	
考试复习参考题	232

第七章 过电压防护与绝缘预防性试验	234
第一节 过电压种类	234
一、过电压的分类；二、雷电过电压；三、内部过电压	
第二节 直击雷防护	238
一、单支避雷针的保护范围；二、两支等高避雷针的保护范围；三、多支避雷针的保护范围；四、在变电站里避雷针、避雷线安装位置等的有关规定	
第三节 雷电侵入波的防护	240
一、变电站进线段保护；二、变压器中性点的防雷保护；三、避雷器的接地方式及各种电气设备接地电阻最大允许值；四、阀型避雷器；五、排气式避雷器	
第四节 内部过电压原因分析举例	246
一、一相断线过电压；二、分频谐振过电压	
第五节 变电站电气设备绝缘试验方法	248
一、绝缘电阻和吸收比试验；二、泄漏电流测试与交直流耐压	
考试复习参考题	254
第八章 继电保护与二次回路	257
第一节 继电保护基本知识	257
一、继电保护的的任务、基本要求和继电器的图形符号；二、电磁型电流电压继电器；三、GL系列感应型过电流继电器；四、电磁型时间、中间和信号继电器；五、数字式继电器	
第二节 互感器及其接线方式	266
一、电流互感器及其接线方式；二、电压互感器及其接线方式	
第三节 变电站常用继电保护和自动装置	273
一、3~10kV变配电站常用继电保护；二、过电流和电流速断保护的接线方式和整定计算；三、主要电气设备的保护方式和整定计算；四、继电保护的灵敏度；五、变电站常用的自动装置	
第四节 二次回路基本知识	280
一、二次回路接线图；二、二次回路编号与设备标志	
考试复习参考题	283
第九章 电工测量技术	285
第一节 电工测量仪表的分类	285
第二节 测量仪表的准确度等级	286
第三节 测量仪表的作用原理及技术特点	287
第四节 几种常用的测试仪表	289
考试复习参考题	292
第十章 用电设备	293
第一节 电气照明设备	293
一、热辐射式电光源；二、气体放电式电光源	
第二节 电动机	296
一、三相异步电动机；二、单相异步电动机；三、同步电动机；四、直流电动机	

第三节 电炉设备	305
一、电阻炉；二、电弧炉；三、电弧电阻炉；四、感应炉	
考试复习参考题	308
第十一章 安全用电知识	309
第一节 触电及其防护	309
一、电流强弱对人体的影响；二、直接接触和间接接触；三、直接接触防护；四、间接接触防护；五、触电急救	
第二节 工作票制度	321
一、在变电站工作防止人身触电的安全措施；二、工作票制度；三、执行工作票制度中应注意的几个问题；四、保证安全的组织措施和技术措施	
第三节 操作票制度	326
一、必须填写操作票的操作；二、怎样填写操作票；三、怎样执行倒闸操作	
考试复习参考题	328
第十二章 典型事故案例	330
案例1 值班人员擅自进入高压柜触电死亡事故	330
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例2 值班人员擅自登上带电母线触电受伤事故	331
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例3 继电保护定值不当，值班人员判断失误，扩大事故	332
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例4 配线不当引起人员触电死亡事故	334
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、通过事故引发的思考	
案例5 实习生值班擅自清扫带电设备造成触电事故	336
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、新参加电气工作人员的岗前教育	
案例6 监护不当 险送性命	338
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、装设接地线的具体要求	
案例7 值班人员判断错误扩大事故	340
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例8 值班员判断不认真耽误恢复供电	341
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例9 分接开关事故	342
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例10 习惯性违章发生触电事故	342
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、常用词语解释：习惯性违章	

案例 11 临时工清扫变电站引起触电身亡事故	343
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、常用词语解释	
案例 12 车间主任违章作业引起触电身亡事故	346
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例 13 一家损坏电缆 百家受牵连	346
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例 14 雷电波反射造成事故	347
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、技术术语解释：雷电进行波反射引起过电压及其预防	
案例 15 错合隔离开关误操作酿成事故	349
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施；五、技术术语解释：带负荷合隔离开关	
案例 16 操作人员心情紧张引起误操作事故	351
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例 17 带短路接地开关合电源开关造成事故	352
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故的措施；五、技术名词解释：短路接地开关	
案例 18 非值班人员代替操作造成事故	353
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	
案例 19 徒工从事复杂操作造成重大事故	354
一、事故经过；二、事故的危害；三、事故原因分析；四、防止事故措施	



电 工 基 础 知 识



第一节 直流电路中的基本物理量

一、电动势

最简单的电路由电源、负荷、控制器件和连接导线四部分组成,如图 1-1 所示。图中 E 是电源, K 是控制开关, L 是一个指示灯。当合上开关 K 后,指示灯就发光,说明电路中有电流流过。这是因为电源 E 内部有一种推动电荷移动的电源力。电源力在电源内部将正负电荷分别向正负两极移动,使正极聚集正电荷,负极聚集负电荷。因此,在电源正负两极之间出现电场,产生电场力。电场力在外电路中(即电源以外的电路)把正电荷从正极移向负极,形成电流。

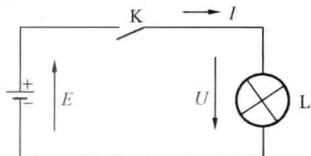


图 1-1 电路的组成

电源力在电源内部将单位正电荷从负极移到正极所做的功,叫做电源的电动势,简称电势,用符号 E 表示,单位是伏特,简称伏,用符号 V 表示,即

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

式中 W ——电源力所做的功, J (焦耳);

Q ——电荷量, C (库仑);

E ——电动势, V (伏特)。

电动势的正方向规定为由低电位指向高电位,即由负极指向正极。

二、电位和电压

(一) 电位

电场力把单位正电荷从 A 点移至参考点所做的功,称为 A 点的电位。这里规定参考点的电位为零,参考点也称零电位点。电位的单位也是伏特,简称伏,用 V 表示。电位用符号 φ 表示。上述 A 点的电位用 φ_A 表示。

(二) 电压

某两点的电位之差称为这两点之间的电压。电压用 U 表示,单位也是伏特,用 V 表示。

例如在电路中,已知 a 、 b 两点的电位分别是 φ_a 、 φ_b ,则 a 、 b 两点间的电压为

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-2)$$

不难证明, a 、 b 两点之间的电压在数值上也等于电场力将单位正电荷从 a 点移至 b 点所做的功,即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-3)$$

式中 W_{ab} ——电场力将电荷 Q 从 a 点移至 b 点所做的功, J (焦耳);

Q ——电荷量, C (库仑);

U_{ab} ——a 点对 b 点的电压, V (伏特)。

需要注意的是: 在电路中, 当选定的参考点不同时, 各点的电位也会随之改变。但任意两点之间的电压 (电位差) 却保持不变。

在分析电路中各点电位时, 常常选择大地作为参考点, 亦即以大地作为零电位点。凡电位低于零电位的点, 其电位为负。

电压的正方向是从高电位点指向低电位点的, 正好与电动势的正方向相反 (见图 1-1)。

电压的单位可用千伏 (kV)、伏 (V)、毫伏 (mV) 表示, 即

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

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

三、电流

电荷在电路中有规则的移动称为电流。在金属导体中, 电流是自由电子在电场力的作用下从电源的负极移向正极。在某些气体或液体中, 电流是由正负离子在电场力作用下定向移动形成的。习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的正方向。

电流的大小用电流强度来表示, 电流强度即指每秒通过导体横截面的电荷量, 用符号 I 表示, 单位为安培, 简称安, 用 A 表示, 其大小为

$$I=\frac{Q}{t} \quad (1-4)$$

式中 I ——电流强度, A (安培);

Q ——电荷量, C (库仑);

t ——通过导体横截面的电荷量为 Q 时所用的时间, s (秒)。

电流较大的单位是千安 (kA), 较小的单位是毫安 (mA)、微安 (μA), 其换算关系为

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

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

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

$$1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

四、电阻和电导

(一) 电阻

电流在电路中流动时所受到的阻力称为电阻, 用 R 表示, 单位为欧姆, 符号为 Ω 。

导体的电阻与导体的材料性质及导体的尺寸有关, 用公式表示为

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

式中 R ——电阻, Ω ;

l ——导体长度, m (米);

S ——导体截面积, mm^2 (平方毫米);

ρ ——导体的电阻率, $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ (欧·平方毫米/米)。

电阻率 ρ 是指导体长度为 1m, 截面积为 1mm^2 , 在 20°C 时的电阻值。但应注意, 在国际单位制中, 电阻率的单位为 $\Omega\cdot\text{m}$ 。这时, 导体长度单位取 m, 导体截面积单位取 m^2 , 电阻的单位仍为 Ω 。

电阻的常用单位还有千欧 (k Ω)、兆欧 (M Ω)、微欧 ($\mu\Omega$), 其换算关系为

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

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

$$1\mu\Omega=10^{-6}\Omega$$



(二) 电阻温度系数

金属材料的电阻随温度的升高而增加。这是因为温度升高时,金属中的原子和分子热运动加剧,增加了自由电子定向移动过程中与原子和分子的碰撞机会,对自由电子的定向移动增加了阻力。电阻随温度的这种变化一般用温度系数 α 来表示

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

式中 R_1 ——温度为 t_1 时的电阻值, Ω ;

R_2 ——温度为 t_2 时的电阻值, Ω ;

α ——电阻温度系数,单位 $1/^\circ\text{C}$ 。

化学纯金属的电阻温度系数在 $0.004/^\circ\text{C}$ 左右。例如铜为 $0.0041/^\circ\text{C}$, 铝为 $0.0042/^\circ\text{C}$, 铁为 $0.0062/^\circ\text{C}$ 。合金的电阻温度系数一般要比纯金属小得多,例如康铜(铜、镍合金)约为 $0.000005/^\circ\text{C}$, 锰铜(铜、锰合金)约为 $0.000006/^\circ\text{C}$ 。随着合金中成分比例的不同,电阻温度系数也不尽相同。

值得注意的是合金的电阻率要比纯金属高得多。例如在 20°C 时,导电材料铜的电阻率为 $\rho = 0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 铝的电阻率约为 $\rho = 0.029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 银的电阻率约为 $\rho = 0.0165 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。而康铜的电阻率为 $\rho = 0.4 \sim 0.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 锰铜的电阻率约为 $\rho = 0.42 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。由于康铜、锰铜具有较高的电阻率,而电阻温度系数又极小,因此,常用它们来制造标准电阻,或制作测量仪器的分流器及附加电阻。

(三) 电导

电阻的倒数叫电导。电导能直接反映导体的导电能力,电导越大,导电能力越强。电导的单位是西门子(符号 S),电导用 G 表示

$$G = \frac{1}{R}$$

在并联电路计算时,有时采用电导要比电阻更为方便。

第二节 直流电路基本定律

一、一段电路欧姆定律

电路中电流的大小与电路两端的电压大小有关,同时又与电路的电阻大小有关。反映电流、电压、电阻三者之间数量关系的规律称为欧姆定律,即

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

在一段电路中,电流的大小与这段电路两端的电压大小成正比,与这段电路电阻的大小成反比。这就是一段电路欧姆定律。

二、全电路欧姆定律

如图 1-2 所示,包括电源 E 、负荷 R 的电路称为全电路。电源本身有内电阻 r ,在图中画成与电动势 E 串联。我们把负荷电阻 R 及其连接导线称为外电路,而把电源电动势 E 及其内部电阻 r 称为电源内电路。把包括内电路和外电路在内的总的电路称为全电路。对于全电路,电流 I 与电源电动势 E 、内电阻 r 及外电阻 R 有如下关系

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

即在含有电源的全电路中,电流的大小与电源电动势成正比,与电路总电阻成反比。总电阻

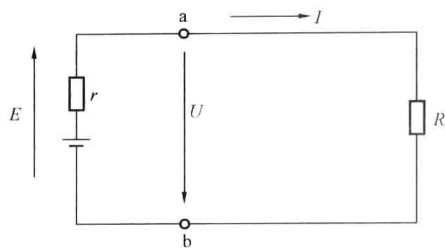


图 1-2 全电路

中包括外电路电阻和电源内部电阻之和。这就是全电路欧姆定律。

在图 1-2 中我们还注意到电动势 E 的方向从下往上，而外电路电压的方向从 a 点指向 b 点。两者方向正好相反。

【例 1-1】 设图 1-2 中电动势 $E=20\text{V}$ ， $r=1\Omega$ ， $R=9\Omega$ 。试求：电流 I 和 a 、 b 两点间的电压 U 。

解：由全电路欧姆定律及一段电路欧姆定律可知

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{20}{9+1} = \frac{20}{10} = 2 \text{ (A)}$$

$$U = IR = 2 \times 9 = 18 \text{ (V)}$$

答：电路中电流为 2A， a 、 b 两点间电压为 18V。

由 [例 1-1] 可见，外电路的端电压 U 小于电源电动势 E ，其差值与内电阻的大小有关，同时也与外电路的电阻大小有关，即与 r 和 R 的比例有关，这个差值也称为电源内阻压降。在 [例 1-1] 中电源压降为 2V。

三、基尔霍夫定律 (KCL 和 KVL 定律)

欧姆定律只适用于计算简单电路。如要计算多电源带分支的复杂电路，常常需要运用基尔霍夫定律。基尔霍夫定律分为第一定律和第二定律两种。

(一) 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律，也称作电流定律，用 KCL 表示。其内容为：在电路的任一节点上，任一时刻流进节点的电流之和等于同一时刻流出节点的电流之和。如规定流入节点的电流为正值，流出节点的电流为负值，则流进流出节点各电流的代数和为零。如用公式表示，则有

$$\sum I = 0$$

(二) 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律也称作电压定律，用 KVL 表示。其内容为：沿着任一闭合电路回路，按任一方向绕行一周，各电源电动势的代数和等于各电阻电压降的代数和。即

$$\sum E = \sum U \quad (1-7)$$

或

$$\sum E = \sum IR \quad (1-8)$$

这一定律体现了能量守恒规律，即单位正电荷沿着回路流动一周时，各电动势的电源力对电荷做功使其获得的能量代数和（即电位升的代数和）与电场力对电荷做功使其失去的能量代数和（即电位降的代数和）相等。应用式 (1-8) 时应注意以下两点。

(1) 绕行方向可任意选定（顺时针或逆时针）。

(2) 绕行方向选定后，与绕行方向一致的电动势取正号，反之取负号。当电流流经电阻时，如电流方向与绕行方向一致，电阻上的电压取正号，反之取负号。

如果把电动势 E 视作负的电压降，即 $E = -U$ ，则基尔霍夫第二定律也可写成

$$\sum U = 0 \quad (1-9)$$

【例 1-2】 设图 1-3 中， $E_1=20\text{V}$ ， $E_2=10\text{V}$ ， $R_1=5\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $R_3=20\Omega$ 。

试求：三个支路中的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。



解: 根据 KCL 和 KVL 列出方程式

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 & (1-10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 & (1-11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -E_2 = -I_3 R_3 - I_2 R_2 & (1-12) \end{cases}$$

式 (1-11) + 式 (1-12), 并代入数字得

$$20 - 10 = 5I_1 - 10I_2,$$

$$I_1 = \frac{10 + 10I_2}{5} = 2 + 2I_2 \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-10), 得

$$2 + 2I_2 + I_2 - I_3 = 0$$

$$3I_2 - I_3 = -2$$

$$I_3 = 3I_2 + 2$$

(1-14)

将式 (1-14) 代入式 (1-12), 并代入数字, 得

$$-10 = -(3I_2 + 2) \times 20 - I_2 \times 10$$

$$-10 = -60I_2 - 40 - 10I_2$$

$$I_2 = -\frac{3}{7} \text{ (A)}$$

将 I_2 值代入式 (1-14) 得

$$I_3 = 3 \times \left(-\frac{3}{7}\right) + 2 = \frac{5}{7} \text{ (A)}$$

将 I_2 、 I_3 值代入式 (1-10), 得

$$I_1 + \left(-\frac{3}{7}\right) - \frac{5}{7} = 0$$

$$I_1 = \frac{8}{7} = 1\frac{1}{7} \text{ (A)}$$

答: $I_1 = 1\frac{1}{7} \text{ A}$, $I_2 = \frac{3}{7} \text{ A}$, $I_3 = \frac{5}{7} \text{ A}$, I_1 、 I_3 电流方向与图 1-3 中电流 I_1 、 I_3 箭头所标方向相同, I_2 的电流方向与图 1-3 中箭头所标方向相反。

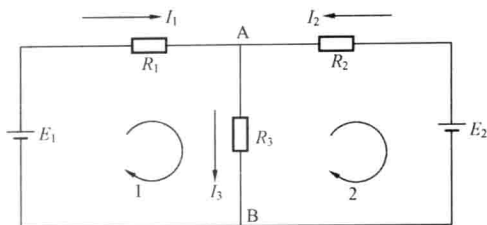


图 1-3 [例 1-2] 图

第三节 直流复杂电路的计算

一、电路的简化

有时需要计算的电路看上去很复杂, 计算起来麻烦, 但如果将电路简化后就方便了。

(一) 电阻的串联

若有几个电阻串联, 可以用一个等值电阻代替, 等值电阻阻值应等于这几个串联的电阻阻值之和。如果有 n 个电阻串联, 则总电阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

(二) 电阻的并联

所谓电阻的并联, 是指这些电阻的头接在一起, 尾接在一起。并联电阻接在电路内, 各个电阻上承受的电压相同。设 R_1 、 R_2 、 R_3 三个电阻并联, 所加电压为 U , 则可算出各电阻中流过的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, I_3 = \frac{U}{R_3}$$

因此, 总电流为三个电流之和, 即

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 \\ &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \\ &= U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \\ &= \frac{U}{R} \end{aligned}$$

由此可见, 电阻并联时, 等值总电阻 R 的倒数等于各并联电阻倒数之和。设有 n 个电阻并联, 则

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-15)$$

如果只有两个电阻 R_1 、 R_2 并联, 则并联后总电阻 R 的倒数等于 R_1 、 R_2 两电阻的倒数之和, 即

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

因此

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

(三) 电阻的串并联

如果在一个电路中, 既有电阻串联, 又有电阻并联, 即为电阻串并联, 或者称作电阻的混联。在分析计算时, 先计算出单纯串联或并联部分电路的等效电阻, 再进一步根据串并联关系逐步化简, 算出总的等效电阻, 然后根据欧姆定律算出总电流, 再依次应用欧姆定律算出各支路电流。

(四) 电源的串并联

将一个电源的负极与另一个电源的正极依次相连, 称为电源的串联。电源串联可以获得较高的电源电压。串联电源的总电源电动势等于各电动势之和, 其总内阻等于各串联电源内阻之和。

如果有几个电动势相等的电源将正极联在一起, 负极也联在一起, 则称为电源并联。如果这些并联电源的内阻也相同, 则总电源的电动势等于其中一个电源的电动势, 总内阻等于几个并联电源内阻并联后的等值电阻。

如果有几个电动势不相等或内阻不相等的电源并联, 则不能简单化简。这时, 可运用前面介绍的基尔霍夫定律和后面将要介绍的直流复杂电路计算方法进行计算。

二、支路电流法

不能用串并联方法进行简化求其等效电阻的电路, 称为复杂电路。下面介绍求解复杂电路一个常用的方法——支路电流法。

所谓支路电流法就是以各支路的电流为未知数, 应用基尔霍夫定律列出方程式, 联立求解计算出各支路电流的方法。其步骤如下:

- (1) 选定各支路电流的参考方向。
- (2) 若电路有 n 个节点, 则可根据 KCL 列出 $(n-1)$ 个节点电流方程。
- (3) 若电路有 m 条支路, 则待求的电流个数也有 m 个, 根据 KVL 可列出 $(m-n+1)$ 个电压方程, 从而组成了 m 元一次方程组。
- (4) 解联立方程组, 求出各支路电流。如求得的电流为正值, 表示所设定的电流方向与实际

方向相同；如求得电流为负值，则所设电流方向与实际电流方向相反。

前面介绍的 [例 1-2] 实际上就是支路电流法解复杂电路的一个例子。在图 1-3 中有三条支路，两个节点，即 $m=3, n=2$ ，因此，根据 KCL 可列出 $2-1=1$ 个节点电流方程，即式 (1-10)；根据 KVL，列出 $m-n+1=3-2+1=2$ 个电压方程，即式 (1-11) 和式 (1-12)，对这三个方程式联立可计算出三个未知数 I_1, I_2, I_3 。由于 I_2 为负值，因此，其实际电流方向与图 1-3 中的 I_2 箭头方向相反。而 I_1, I_3 为正值，因此实际电流方向与图中 I_1, I_3 箭头方向相同。

三、节点电压法

当电路的支路很多，而节点只有两个时，如果用支路电流法求解，需要列出和支路数目相同数量的方程，联立求解很繁琐，而如用节点电压法求解，就比较方便。

所谓节点电压法，就是在具有两个节点的复杂电路中，首先求出节点电压，然后应用欧姆定律求出各支路电流的方法。下面举例说明。

【例 1-3】 试用节点电压法解图 1-3 所示电路中各支路的电流。

解：为说明清楚，这里先推导求节点电压的公式。

对于图 1-3，根据基尔霍夫电压定律，不难列出 I_1, I_2 两支路的电流电压关系式。

$$\text{对 } I_1 \text{ 支路} \quad U_{AB} = E_1 - I_1 R_1$$

$$\text{或} \quad I_1 = \frac{E_1 - U_{AB}}{R_1}$$

$$\text{对 } I_2 \text{ 支路} \quad U_{AB} = E_2 - I_2 R_2$$

$$\text{或} \quad I_2 = \frac{E_2 - U_{AB}}{R_2}$$

$$\text{对 } R_3 \text{ 支路} \quad U_{AB} = I_3 R_3$$

$$\text{或} \quad I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3}$$

对于节点 A，根据 KCL 可列出电流方程式

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

将上面的 I_1, I_2, I_3 的公式代入电流方程式，有

$$\frac{E_1 - U_{AB}}{R_1} + \frac{E_2 - U_{AB}}{R_2} + \frac{-U_{AB}}{R_3} = 0$$

$$\frac{E_1}{R_1} - \frac{U_{AB}}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} - \frac{U_{AB}}{R_2} - \frac{U_{AB}}{R_3} = 0$$

在上式中，用电导 G 代替电阻 R ，已知 $G = \frac{1}{R}$ ，则

$$E_1 G_1 - U_{AB} G_1 + E_2 G_2 - U_{AB} G_2 - U_{AB} G_3 = 0$$

整理后得

$$U_{AB} = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3}$$

即对于两节点的多支路电路，其节点电压等于各支路电动势与该支路电导乘积的代数和，除以各支路电导的总和。其一般表达式为

$$U_{AB} = \frac{\sum E_n G_n}{\sum G_m} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 中 n 表示有源支路数， m 表示总的支路数。并规定式中 E 的正方向指向节点 A 时取正号，反之取负号。

现将图 1-3 中电动势和电阻的数值（见 [例 1-2] 中所给数值）代入式 (1-16)，算出节点电