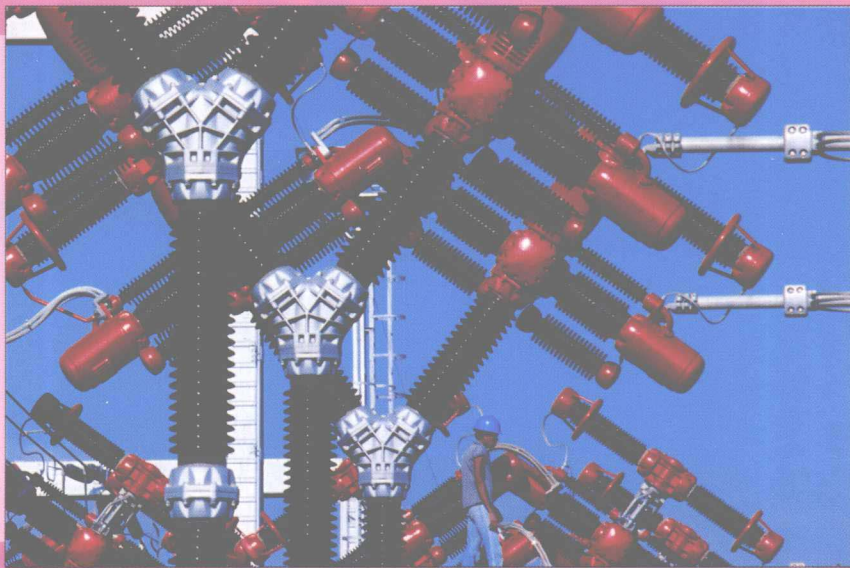


最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材

(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 罗毅

变电检修



知识

技能

题库

主编 朱显富 鞠英俊



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材

(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 罗毅

变 电 检 修

主编 朱显富 鞠英俊



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据劳动和社会保障部的电力行业《国家职业技能鉴定规范》、电力行业职业技能鉴定指导中心的《电力行业职业技能鉴定指导书》(第二版)、《电力工人技术等级标准》及相关专业国家标准、行业标准和岗位规范编写,为《最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材》之一。

本书共七篇 25 章,内容包括:电工基础知识,工程力学和机械制图基础知识,变电设备,微机保护,倒闸操作与带电作业,无功补偿,技能操作等。为了便于学习和培训,每章后附有大量复习思考题,并附有答案。

本书为电力行业职业技能鉴定及岗位培训教材,也可供相关技术人员及管理人员在日常工作中学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电检修 / 朱显富, 鞠英俊主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 2
最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材
初、中、高级工及技师、高级技师适用
ISBN 978-7-5084-7223-2

I. ①变… II. ①朱… ②鞠… III. ①变电所—检修—技术培训—教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第024228号

书 名	最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材 (初、中、高级工及技师、高级技师适用) 变电检修
总 主 编	丁毓山 罗毅
作 者	主 编 朱显富 鞠英俊
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 (营销中心)
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
刷 厂	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 32.25印张·765千字
版 次	2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

为了提高电力技术工人的业务素质，满足电力行业职业技能鉴定和岗位培训工作的需要，根据劳动和社会保障部制定的电力行业《国家职业技能鉴定规范》和电力行业技能鉴定指导中心组织编写的《电力职业技能鉴定指导书》（第二版）的要求，本书作者编写了《最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材·变电检修》。

随着电力体制改革的深入，我国电力网正在向大电网、大电厂、超高压和特高压、核电站、高度自动化的方向发展，输电网、配电网和发电厂正在经历着一次重大的变革。面对电力系统这种发展的新形势，以往教材的内容已略显陈旧，特别是有些内容与当代的现实相差较远。为了配合新形势下电力系统人员培训的需要，中国水利水电出版社决定，组织有关专家和培训一线的教师编写这套《最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材》。其编写原则是：反映电力新技术、新设备、新方法，以满足当前电力企业的培训要求；不要求面面俱到，力求少而精，抓住重点，深入浅出。全书包含三方面内容：知识、技能、题库。为此，总主编聘请了辽宁省电力公司、沈阳农业大学、华北电力大学、中国农业大学、沈阳大学有关专家和教授参与编写。

本套培训教材在编写过程中注重各工种专业技术知识的系统性和全面性，将公用基础理论知识融汇到专业技术知识当中，力求做到学以致用，避免理论与实际相脱节。本套培训教材还具有专业技术丛书的功能，突出技能方面的要求，坚持实用性。本套培训教材不仅适用于各工种专业技术人员的岗位培训及职业技能考核的需要，而且对现场的工程技术人员也有较好的参考价值。

本书共分七篇 25 章，其主要内容包括：电工基础知识，工程力学和机械制图基础知识，变电设备，微机保护，倒闸操作与带电作业，无功补偿，技能操作等。在附录中只给出了初级、中级和高级工的理论鉴定试题，以供参考。每章后面皆附有复习思考题与习题，并附有答案。

本套培训教材由丁毓山、罗毅担任总主编。

参与本书编写的人员有：罗毅、丁毓山、朱显富、鞠英俊、罗乃东、赵振伟、黄怡然、耿光飞、曹一萍、徐宏全、杜江、周世新、吴运峰、赵友鹏、金永柱、苗庆仁、刘武、杜琳、李茂林、赵铁民、邹晶、寇艳秋、胡建光、姜新明、曹晋利、唐立敏、周丽、王天策、侯庭阳、程云峰、李奎生、李伟、刘宁、吴秀华、张锦梅、张立富、张福华、邢焱、唐燕、高宏、刘志、邹德清、刘春荣、刘佳、邢路明、邢篮心、艾婷、韩晶晶。全书由罗毅、丁毓山统稿。

提供资料并参加本书部分编写工作的还有：叶常容、谈文华、张强、王卫东、石威杰、贺和平、潘利杰、张娜、石宝香、李新歌、尹建华、苏跃华、刘海龙、李小方、李爱丽、王志玲、李自雄、陈海龙、韩国民、刘力侨、任翠兰、张洋、李翱翔、孙雅欣、李景、赵振国、任芳、吴爽、李勇高、杜涛涛、李启明、郭会霞、霍胜木、李青丽、谢成康、马荣花、张贺丽、薛金梅、李荣芳、孙洋洋、余小冬、丁爱荣、王文举、徐文华、李键、孙运生、王敏州、杨国伟、刘红军、白春东、魏健良、周凤春、董小玫、吕会勤、孙金力、孙建华、孙志红、孙东生、王惊、李丽丽等。

作者虽尽了很大努力，但疏漏之处仍在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2010年1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 直流电路的基本概念和简单直流电路	1
第二节 复杂电路计算	7
复习思考题与习题	16
第二章 磁场的基本知识	28
第一节 磁的性质和电流的磁场	28
第二节 感应电势和载流导体受力	31
复习思考题与习题	35
第三章 单相交流电路	38
第一节 交流电路的基本概念	38
第二节 单参数单相交流电路	43
第三节 多参数单相交流电路	45
复习思考题与习题	52
第四章 三相交流电路	58
第一节 三相电势的产生和三相电路的连接	58
第二节 不对称三相电路的概念和三相电路的功率	61
第三节 三相电路的计算	63
复习思考题与习题	67

第二篇 工程力学和机械制图基础知识

第一章 力学的基础知识	74
第一节 力的基本概念	74
第二节 平面汇交力系的合成与分解	79
第三节 力矩	81
第四节 弯曲的概念	84
第五节 力学在检修施工中的应用	85
复习思考题与习题	91

第二章 识绘图知识	93
第一节 制图的基本原理	93
第二节 机件的表达方法	99
复习思考题与习题	104

第三篇 变 电 设 备

第一章 变压器概述	105
第一节 变压器的分类及工作原理	105
第二节 变压器的额定技术数据	108
第三节 变压器的构造	112
第四节 分接开关与调压变压器	116
复习思考题与习题	118
第二章 变压器检修	121
第一节 特殊结构的变压器	121
第二节 检修有关规定和要求	129
第三节 变压器芯体的检修	132
第四节 冷却装置的检修	138
第五节 各种辅助装置的检修	140
第六节 变压器的状态检修	143
第七节 三相电力变压器绕匝数测试法	149
第八节 变压器中性点接地方式	151
第九节 变压器室通风问题	155
第十节 变压器瓦斯保护动作原因与对策	158
复习思考题与习题	160
第三章 箱式变电站	164
第一节 箱式变电站概述	164
第二节 箱式变电站配变、补偿电容的容量确定	166
第三节 箱式变电站的运行	169
第四节 箱式变电站的安装与现存问题	171
第五节 箱式变电站的操作与维护	176
复习思考题与习题	179
第四章 真空断路器的检修	181
第一节 真空断路器的基本结构	181
第二节 户内、户外真空断路器	186
第三节 真空断路器机械参数及其调整	192
第四节 真空断路器的检修	195
第五节 真空断路器拒动处理及巡视要求	202
第六节 真空断路器的在线检测	204

第七节	截流过电压产生和对电机产生的危害	206
第八节	真空断路器的应用	209
第九节	真空断路器的故障分析	212
	复习思考题与习题	214
第五章	SF₆ 断路器的检修	219
第一节	六氟化硫 (SF ₆) 气体的特性安全防护	219
第二节	SF ₆ 断路器结构和灭弧原理	222
第三节	检修项目、周期及准备工作	229
第四节	SF ₆ 断路器检修工艺	232
第五节	SF ₆ 断路器状态检修	240
第六节	SF ₆ 在寒冷地区的使用	243
第七节	SF ₆ 断路器的二次接线	245
	复习思考题与习题	247
第六章	环网供电设备的检修	252
第一节	概述	252
第二节	有关环网柜的技术要求	255
第三节	RM6、AR6 环网柜	257
第四节	环网柜的检修操作	259
第五节	环网柜电缆的连接工艺	262
第六节	环网柜的应用实例	266
	复习思考题与习题	268
第七章	隔离开关和负荷开关	270
第一节	隔离开关	270
第二节	隔离开关的检修	272
第三节	SF ₆ 负荷开关在城乡电网中的应用	276
	复习思考题与习题	279
第八章	送配电线路检修	283
第一节	送电线路检修	283
第二节	检修作业	287
第三节	检修实例	293
第四节	配电网导线的故障及其防止措施	294
第五节	倒杆、断杆和断横担故障及其防止措施	299
第六节	绝缘子故障及其防止措施	301
第七节	跌落式保险器故障及其防止措施	302
	复习思考题与习题	304
第九章	重合器、分段器与配电开关	307
第一节	重合器	307
第二节	线路分段器	309

第三节	FDK10—12/D 型户外跌落式分段器	310
第四节	配电开关	312
第五节	开关设备与熔断器的配合	315
	复习思考题与习题	319
第十章	防雷与接地	321
第一节	大气过电压	321
第二节	避雷器与避雷针	325
第三节	金属氧化物避雷器的接线分析	332
第四节	金属氧化物避雷器损坏的原因	336
第五节	变电所的防雷保护	339
第六节	接地	343
	复习思考题与习题	346

第四篇 微机保护

第一章	线路保护	349
第一节	35/10kV 微机线路保护的整定计算	349
第二节	66kV 微机线路保护装置	352
	复习思考题与习题	360
第二章	变压器保护	362
第一节	概述	362
第二节	瓦斯保护	365
第三节	变压器比率差动保护与保护判据	368
第四节	按二次、偶次谐波原理形成的差动保护	373
第五节	变压器微机后备保护	375
	复习思考题与习题	380

第五篇 倒闸操作与带电作业

第一章	倒闸操作	382
第一节	电气设备倒闸操作的内容、程序和制度	382
第二节	倒闸操作中的安全技术	386
第三节	线路和设备中高压开关和刀闸的操作	389
第四节	母线、线路的操作	392
第五节	变压器操作	395
第六节	电源并列操作	397
	复习思考题与习题	398
第二章	电气设备检修和维护中的安全技术	404
第一节	开关和电力线路检修、维护的安全技术	404

第二节 发电机、调相机和高压电动机的检修安全技术	408
复习思考题与习题	409
第三章 带电作业与带电检修	411
第一节 邻近带电导线工作的安全技术	411
第二节 带电作业的规定和要求	413
第三节 带电作业的原理和工具	415
第四节 带电作业的安全措施	419
第五节 绝缘子的带电清扫、水洗与测试	420
复习思考题与习题	424

第六篇 无功补偿

第一章 无功补偿的规划	427
第一节 全网无功优化	427
第二节 无功功率平衡及优化补偿	432
第三节 配电网的无功补偿的配置	434
第四节 补偿容量的确定和电容器的运行	439
复习思考题与习题	443
第二章 电能质量	444
第一节 电能质量的总体论述	444
第二节 国家标准关于电能质量的规定	445
复习思考题与习题	448

第七篇 技能操作

第一章 单项操作	451
第一节 隔离开关操作	451
第二节 断路器	460
第三节 互感器	464
第四节 其他操作	468
第二章 多项操作	471

附 录

附录 1 变电检修职业技能鉴定初级工试题	495
附录 2 变电检修职业技能鉴定高级工试题	497
附录 3 变电检修职业技能鉴定中级工试题	499
附录 4 变电检修职业技能鉴定技师试题	502

第一篇 电工基础知识

第一章 直流电路

第一节 直流电路的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，作有规则的定向运动，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，电流的方向是与自由电子的实际移动方向相反。

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（安培）；

Q ——通过导体截面的电荷量，C（库仑）；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间，s（秒）。

电流强度的单位用 kA（千安）、A（安）、mA（毫安）、 μ A（微安）表示，这几个单位之间的换算关系是

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

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

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

二、电阻和电阻率

1. 电阻和电阻的单位

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： $\text{M}\Omega$ （兆欧）、 $\text{k}\Omega$ （千欧）、 Ω （欧），这几个单位之间的换算关系是

$$1\text{M}\Omega = 1000000\Omega$$

$$1\text{k}\Omega = 1000\Omega$$

$$1\Omega = 1000\text{m}\Omega = 1000000\mu\Omega$$

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

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

同一种材料对电流的阻力，主要取决于导体的长度和横截面积。当截面积相同时，则导体越长，电阻越大；当长度相同时，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

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-1-2)$$

式中 ρ ——电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

2. 电阻率

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

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°C 时的数值，温度增高， R 值增大。

表 1-1-1 温度为 20°C 时的 ρ 值和 α 值

材 料	ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	α ($^\circ\text{C}^{-1}$)	材 料	ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	α ($^\circ\text{C}^{-1}$)
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

3. 电阻温度系数以及电阻与温度的关系

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 时电阻的数值为 R_t ，若温度由 t 增加到 T ，则电阻的变化量为

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

由此，在 T 时电阻的总值应为电阻的原值 R_t 加上变化值 ΔR ，即

$$R_T = R_{20^\circ\text{C}} + \Delta R = R_{20^\circ\text{C}} + R_{20^\circ\text{C}} \alpha (T - t) = R_{20^\circ\text{C}} [1 + \alpha (T - t)] \quad (1-1-3)$$

式中 R_T ——温度为 T 时的电阻， Ω ；

$R_{20^\circ\text{C}}$ ——温度为 20°C 时的电阻， Ω 。

4. 算例

已知电阻为 R ，在温度 20°C 时，其阻值为 7Ω ，当温度升高到 75°C 时，其阻值为多少欧？导线为铜制。

解：铜导线的电阻温度系数 $\alpha = 0.004$ ，当温度升高到 75°C 时，电阻值为

$$\begin{aligned} R_T &= R_t + \Delta R = R_t + R_t \alpha (T - t) = R_t [1 + \alpha (T - t)] \\ &= 7 \times [1 + 0.004 \times (75 - 20)] = 8.54 (\Omega) \end{aligned}$$

三、电位和电压

1. 电位

所谓电场中某点的电位，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 V （伏特，简称伏）。

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。通常以大地作为参考点。

2. 电压

为了使电流通过电阻，在导体两端必须加一定的电压。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 kV（千伏）、V（伏）、毫伏（mV）、 μV （微伏）表示，它们之间的换算关系是

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

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

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

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。

四、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，可用式（1-1-4）表示为

$$E = \frac{A}{Q} \quad (1-1-4)$$

式中 E ——电势，V；

A ——电源力所做的功，J（焦耳）；

Q ——正电荷的电荷量，C（库仑）。

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。

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和电阻串联、并联、混联求解的电路。

2. 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。用公式表示为

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

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，与电路中电源的内电阻 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 ——电源内电阻, Ω 。

4. 算例

已知 $E=110\text{V}$, $R=109\Omega$, $r=1\Omega$, 求: (1) 电路中电流为多少? (2) 外电路端电压为多少? (3) 内电阻压降为多少? (4) 外电阻、内电阻、全电路消耗的功率为多少?

解: (1) 电路中电流 $I = \frac{E}{R+r} = \frac{110}{109+1} = 1 \text{ (A)}$
 (2) 外电路端电压 $U = IR = 1 \times 109 = 109 \text{ (V)}$
 (3) 内电阻压降 $U_r = Ir = 1 \times 1 = 1 \text{ (V)}$
 (4) 外电阻消耗的功率 $P_2 = UI = 109 \times 1 = 109 \text{ (W)}$
 内电阻 r 消耗的功率 $P_3 = U_r I = 1 \times 1 = 1 \text{ (W)}$
 全电路消耗的功率为

$$P_1 = EI = 110 \times 1 = 110 \text{ (W)}$$

$$P_1 = P_2 + P_3 = 109 + 1 = 110 \text{ (W)}$$

六、功和功率

在一段时间内, 电源力 (电场力) 所做的功称为电功或电能, 电能用符号 A 表示。其单位是焦耳 (J)。通常电能也以电量的形式表现, 以 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时) 为单位。两者之间的换算关系为

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

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 kW (千瓦)、 W (瓦) 等, 即

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

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

电功率的计算公式为

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

式中 P ——电功率, kW ;
 t ——时间, h ;
 A ——电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

$$1\text{kW} = 1.36 \text{ 马力}$$

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，1 焦耳的电能与 0.24 卡的热量相当。

电流的热效应在电气设备的正常运行中，以及在电气设备的事故状态下，皆具有重要意义。

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。短路是电路、电气设备和电力系统的事故状态，在短路状态下，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，致使电路、电气设备烧毁。

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。在电气设备正常运行时发生断路，也是电路、电气设备的事故状态。因为在这种状态下，将要中断对电力用户的供电。

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. 电阻串联

图 1-1-1 所示为两个电阻 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 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

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

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

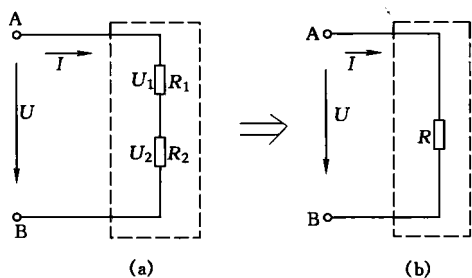


图 1-1-1 串联电路
(a) 实际电路; (b) 等效电路

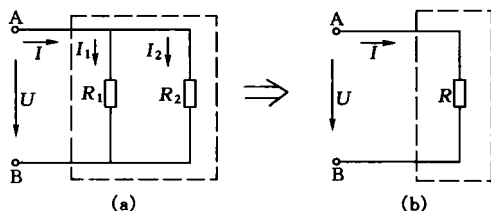


图 1-1-2 并联电路
(a) 实际电路; (b) 等效电路

对于 n 个电阻并联则有

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

十、电容

1. 电容中的物理现象

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量 Q 越多，其极板间的电位差越高。

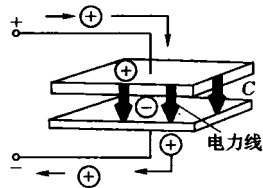


图 1-1-3 电容器

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 F（法拉，简称法）。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

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

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

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；若两端电压下降的快，表明电荷泄放的快，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，假若有 n 个电容并联，则总电容为

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

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，假若有 n 个电容串联，则总电容得倒数为

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

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，相当于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

复杂电路是指不能用串、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：在网络中，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。

基尔霍夫第一定律又称为节点电流定律。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，更不能储存，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。

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

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

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

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

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

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

$$\text{g 点的电位} \quad \varphi_g = \varphi_f + E_3$$