



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 变电运行

马振良 编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>





## 内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书以模块的方式,共分6个模块19个单元77个课题。本书按照变电站运行人员所需要的知识和技能要求进行阐述。其中:基础知识包括电工基础,安全生产知识和电力系统概述;专业知识包括变压器与互感器,断路器与隔离开关,电抗器和电容器,防雷与接地装置,组合电器,电气测量,电气识图,直流系统,继电保护与自动装置的原理、结构;实际技能包括设备的运行、巡视、倒闸操作,设备的异常运行与事故的处理。

本书可作为职业院校电力技术专业教学用书,也可作为电力行业电气运行人员培训用书,还可作为工程技术人员参考用书。

主 审 马 振 良  
主 编 马 振 良

## 图书在版编目(CIP)数据

变电运行/马振良编. —北京:中国电力出版社,2008  
全国电力职业教育规划教材  
ISBN 978-7-5083-6065-2

I. 变... II. 马... III. 变电所—电力系统运行—职业教育—教材 IV. TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第141591号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2008年1月第一版 2008年1月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 20.25印张 491千字  
定价 29.80元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权所有 翻印必究

# 前言

---

本教材以《中华人民共和国职业技能鉴定·电力行业》和《国家职业标准》为依据，按照中华人民共和国劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心关于国家职业资格培训教程编写的要求进行编写。

本教材在内容上体现“以职业活动为导向，以职业技能为核心”的指导思想，紧贴该工种技能鉴定的标准、规范和指导书，突出技能操作，同时适当选编了相关基础知识内容，并以模块、单元、课题的层次结构来安排。本教材以实际操作为主线来编写，讲解通俗易懂，强调了“干什么，怎么干，为什么这么干”的原则，其内容符合电力行业相关典型规程和企业现行生产运行规程。

本书以培养电力技术应用型专门人才为目标，着重加强了教学内容的针对性和实用性，并与电力行业相关典型规程和企业现行生产运行规程相结合。在讲解上，本书以模块、单元、课题的层次结构来安排，力求语言通俗易懂，便于自学。

模块一重点介绍了变电站值班员应具备的基本知识；模块二、三介绍了变电设备的作用、原理、构造和特点，强调了其运行的标准与要求；模块四讲解了设备巡视的方法、内容、标准、注意事项以及设备的验收项目和标准；模块五以单一元件和综合操作的方式讲解了设备操作的原则、方法和危险点；模块六讲解了设备异常运行与事故时的现象、特征和处理方法。由模块一到模块六形成了完整的运行岗位理论与实践的体系。

本书由吉林供电公司马振良高级工程师编写，由吉林供电公司焦日升高级技师主审。本书在编写过程中，得到了电力行业相关领导和上述专家所在单位的大力支持，在此一并感谢。

由于编写人员水平所限，书中难免有些缺点和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2007年6月



87

# 目 录

88

88

88

前言

90

92

## 模块一 基础知识

第一单元 电工基础..... 1

    课题一 直流电路..... 1

    课题二 单相正弦交流电路..... 8

    课题三 三相交流电路..... 17

    课题四 电磁和电磁感应..... 22

    思考题..... 24

第二单元 安全生产知识..... 25

    课题一 保证安全生产的基本措施与法制建设..... 25

    课题二 触电急救..... 29

    课题三 电气防火..... 32

    思考题..... 33

第三单元 电力系统与变电站接线..... 34

    课题一 电力系统概述..... 34

    课题二 电力系统运行的特点..... 36

    课题三 变电站主接线..... 40

    思考题..... 43

## 模块二 一次设备与运行

第四单元 变压器与互感器..... 44

    课题一 变压器..... 44

    课题二 自耦变压器..... 52

    课题三 电流互感器..... 54

    课题四 电压互感器..... 58

    思考题..... 62

第五单元 断路器与隔离开关..... 63

    课题一 断路器..... 63

    课题二 隔离开关..... 74

思考题 .....	78
<b>第六单元 电抗器与并联电容器 .....</b>	<b>79</b>
课题一 电抗器 .....	79
课题二 并联电容器 .....	83
思考题 .....	85
<b>第七单元 防雷与接地装置 .....</b>	<b>86</b>
课题一 防雷装置 .....	86
课题二 接地装置 .....	90
思考题 .....	92
<b>第八单元 组合电器 .....</b>	<b>93</b>
课题一 SF <sub>6</sub> 全封闭组合电器的分类及基本结构 .....	93
课题二 GIS 中 SF <sub>6</sub> 气体监控、运行维护 .....	95
思考题 .....	96
<b>模块三 二次设备与回路</b>	
<b>第九单元 电气仪表 .....</b>	<b>97</b>
课题一 电气测量 .....	97
课题二 常用仪表的使用 .....	103
思考题 .....	107
<b>第十单元 二次回路 .....</b>	<b>108</b>
课题一 二次回路标号 .....	108
课题二 变电站的信号回路 .....	123
课题三 断路器的控制回路 .....	127
课题四 变电站的同期回路 .....	132
思考题 .....	135
<b>第十一单元 直流系统 .....</b>	<b>136</b>
课题一 直流电源 .....	136
课题二 直流回路 .....	145
思考题 .....	148
<b>第十二单元 继电保护与自动装置 .....</b>	<b>149</b>
课题一 继电保护装置概述 .....	149
课题二 线路保护 .....	153
课题三 电力变压器保护 .....	160
课题四 母线及断路器失灵保护 .....	165
课题五 并联电容器组、并联电抗器和同步调相机的保护 .....	171
课题六 微机保护 .....	175

课题七	自动重合闸	178
课题八	按频率自动减负荷装置	179
课题九	备用电源自动投入装置	181
课题十	故障录波器	183
思考题		184

## 模块四 设备的巡视检查与验收

<b>第十三单元</b>	<b>设备巡视</b>	186
课题一	正常巡视	186
课题二	设备的特殊巡视	197
思考题		203
<b>第十四单元</b>	<b>设备验收</b>	204
课题一	一次设备的验收	204
课题二	二次设备的验收	209
思考题		212

## 模块五 设备倒闸操作

<b>第十五单元</b>	<b>倒闸操作的基本知识</b>	213
课题一	倒闸操作的基本步骤及注意事项	213
课题二	倒闸操作票	215
思考题		217
<b>第十六单元</b>	<b>单项操作</b>	218
课题一	断路器的操作	218
课题二	隔离开关的操作	220
课题三	验电操作	224
课题四	接地线(接地开关)的操作	225
课题五	分接开关的操作	226
课题六	熔断器的操作	228
课题七	保护装置的操作	230
课题八	低压电气的操作	233
课题九	防误闭锁装置	234
思考题		236
<b>第十七单元</b>	<b>综合操作</b>	237
课题一	线路的倒闸操作	237
课题二	母线的倒闸操作	243
课题三	变压器的倒闸操作	250





# 模块一 基础知识

## 第一单元 电工基础

### 课题一 直流电路

电路就是电流所流过的路径，它分实际电路和电路模型两种。图 1-1 (a) 是用两节干电池经刀开关向灯泡供电的实际电路。组成实际电路的器件通常可分为四类：

- (1) 电源。它是指供给电能的设备。
- (2) 负荷。它是指用电设备。
- (3) 控制电器。控制电器是指在电路中起控制和保护作用的开关电器。
- (4) 导线。它的作用是将电源、负荷和控制电器连接起来。

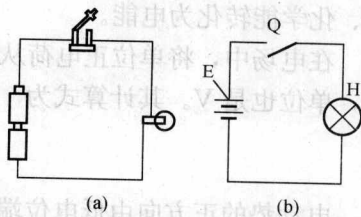


图 1-1 简单电路

(a) 实际电路图 (电路模型)；

(b) 电气回路图

E—电池；Q—刀开关；H—灯泡

将电路中的实际器件用理想元件表示后，就得到与实际电路相对应的电路模型，称为电气回路图，简称电路图，如图 1-1 (b) 所示。在电路图中的灯泡应视为理想电阻元件，干电池视为理想电压源。方向和大小都不随时间而改变的电流、电压、电动势叫做稳恒直流，通常简称直流。所构成的回路叫直流电路。

#### 一、基本物理量

##### 1. 电流

导体内的自由电子在电场力的作用下作有规则的定向运动，就形成了电流。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

单位时间内流过导体截面的电荷量叫做电流强度，简称电流，用  $I$  表示，其表达式为

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

式中  $Q$ ——通过导体截面的电荷量，C；

$t$ ——通过电荷量  $Q$  所用的时间，s。

电流的单位为安培，简称安，用 A 表示。电流的实用单位除 A 外，还有 kA、mA 等。其换算关系如下

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}; 1\text{A} = 10^3\text{mA}; 1\text{A} = 10^6\text{MA}$$

##### 2. 电位与电压

电路中某点的电位，在数值上等于单位正电荷沿任意路径从该点移至无限远的过程中，电场力所做的功。其单位为伏特，简称伏，用 V 表示。a 点处的电位，用  $\varphi_a$  表示，即

$$\varphi_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-2)$$

式中  $Q$ ——电荷的电荷量，C；

$W_a$ ——在 a 点电荷  $Q$  所具有的电位能，J。

在电路中电位等于零的点叫做参考点，凡电位高于零电位的点为正电位，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。

电路中任意两点之间的电位差,称为电压。用  $U$  表示。电压的单位也是  $V$ ,其实用单位还有  $kV$ 、 $mV$  和  $MV$ 。其换算关系为

$$1kV = 10^3V; 1V = 10^3mV; 1V = 10^{-6}MV$$

电路中各点的电位,随着参考点的改变而改变,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。

### 3. 电源和电动势

能将其他形式的能量转化为电能的设备称为电源。如发电机、蓄电池,分别可将机械能、化学能转化为电能。

在电场中,将单位正电荷从低电位移动到高电位所做的功,叫电源的电动势,用  $E$  表示,单位也是  $V$ 。其计算式为

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

电动势的正方向由低电位端指向高电位端,即电位升的方向。

### 4. 电阻、导体和绝缘体

容易通过电流的物体叫导体。电流流过导电物体所受到的阻力称为导体的电阻,用  $R$  表示,导体电阻的大小由下式决定

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-4)$$

式中  $\rho$ ——电阻率,其大小与导体材料性质有关,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;

$L$ ——导体长度,  $\text{m}$ ;

$S$ ——导体横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

导体的电阻还与导体的温度有关。一般金属材料的电阻随温度的升高而增加,电解液导体的电阻随温度的升高而降低。考虑温度影响时金属导体的电阻,应为

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-5)$$

式中  $\alpha$ ——导体的电阻温度系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$R_1$ ——温度为  $t_1$  时的电阻值,  $\Omega$ ;

$R_2$ ——温度为  $t_2$  时的电阻值,  $\Omega$ 。

常用金属材料的电阻率和电阻温度系数,见表 1-1。

表 1-1 常用金属材料的电阻率和电阻温度系数

金属材料名称	电阻率 ( $20^\circ\text{C}$ , $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	电阻温度系数 ( $10^{-3}1/^\circ\text{C}$ )
银	0.0162	3.80
铜	0.0172	3.93
铝	0.0282	3.90
铁	0.100	5.00
镍铬合金	1.09	0.07

电阻的常用单位是欧姆,简称欧,用  $\Omega$  表示,实用单位还有  $k\Omega$  和  $M\Omega$ 。其换算关系为

$$1M\Omega = 10^3k\Omega = 10^6\Omega$$

(8) 各种导体都有一定的导电能力。这种能力称为电导，以  $G$  表示，它与电阻都是说明导体的导电能力大小。电导与电阻的关系为  $G = \frac{1}{R}$ 。电导的单位是西门子，简称西，用  $S$  表示。

## 二、欧姆定律

欧姆定律是表示电压（或电动势）、电流和电阻三者关系的基本定律。实验证明，流过电阻的电流，与电阻两端的电压成正比，与电阻值成反比，称为部分电路欧姆定律，如图 1-2 (a) 所示。该定律用公式表示为

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

欧姆定律也适用于如图 1-2 (b) 所示的全电路。在这样的闭合电路中，电路中的电流与电源的电动势成正比，与电路中负载电阻及电源内阻之和成反比，称为全电路欧姆定律，即

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-7)$$

式中  $E$ ——电源电动势，V；

$R$ 、 $R_0$ ——分别为负载电阻和电源内阻， $\Omega$ ；

$I$ ——电路中流过的电流，A。

式 (1-7) 又可变换成

$$E = I(R + R_0) = IR + IR_0 = IR_0 + U$$

$$U = E - IR_0$$

式中  $U$ ——外电路电阻  $R$  两端的电压，即电源端电压。

**【例 1-1】** 在图 1-2 (b) 中，若  $E = 12\text{V}$ ， $R_0 = 0.1\Omega$ ， $R = 3.9\Omega$ ，求电路中的电流  $I$ 、电源内阻  $R_0$  上的电压降  $U_0$  及电源端电压  $U$ 。

解：

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{12}{3.9 + 0.1} = 3(\text{A})$$

$$U_0 = IR_0 = 3 \times 0.1 = 0.3(\text{V})$$

$$U = E - U_0 = 12 - 0.3 = 11.7(\text{V})$$

## 三、电路连接

### 1. 电阻串联

几个电阻头尾依次相接，使电流只有一条通路的接法叫做电阻的串联，如图 1-3 (a) 所示。

该串联电路有以下特点：

(1) 电路各电阻上流过的是同一个电流，即

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

(2) 各个电阻上电压降之和等于总电压，即

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = U_1 + U_2 + U_3$$

(3) 总电阻等于各电阻之和，即总电阻为

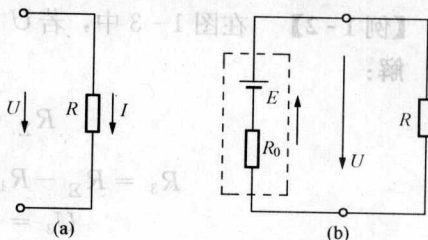


图 1-2 欧姆定律的图例

(a) 部分电路；(b) 全电路

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (1-8)$$

(4) 各电阻上电压降之比等于其电阻比, 即

$$U_1/U_2 = R_1/R_2 \quad U_1/U_3 = R_1/R_3$$

串联电路的总电阻通常也叫等效电阻。图 1-3 (b) 是图 1-3 (a) 的等效电路图。

**【例 1-2】** 在图 1-3 中, 若  $U = 140\text{V}$ ,  $I = 4\text{A}$ ,  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 15\Omega$ , 求  $R_3$  和  $U_3$ 。

解:

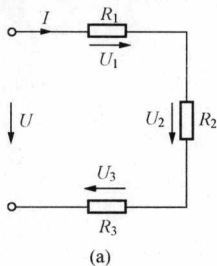
$$R_{\Sigma} = \frac{U}{I} = \frac{140}{4} = 35(\Omega)$$

$$R_3 = R_{\Sigma} - R_1 - R_2 = 35 - 10 - 15 = 10(\Omega)$$

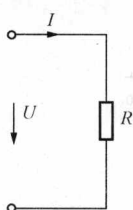
$$U_3 = IR_3 = 4 \times 10 = 40(\text{V})$$

## 2. 电阻并联

将几个电阻的头与头接在一起、尾与尾接在一起的连接方式叫做电阻的并联, 如图 1-4 (a) 所示。



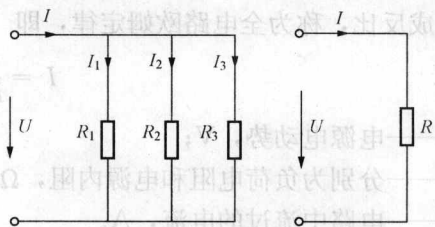
(a)



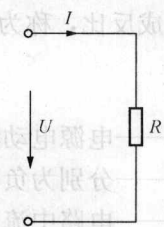
(b)

图 1-3 电阻的串联

(a) 原电路; (b) 等效电路



(a)



(b)

图 1-4 电阻的并联

(a) 原电路; (b) 等效电路

并联电路有以下特点:

(1) 各并联电阻两端的电压相等。

(2) 电路中的总电流等于各电阻支路电流之和, 即

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3$$

(3) 并联电路等效电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots \quad (1-9)$$

(4) 通过各支路电流与其电阻成反比, 即

$$I_1/I_2 = R_2/R_1$$

**【例 1-3】** 在图 1-4 中, 若  $R_1 = 20\Omega$ ,  $R_2 = 30\Omega$ ,  $R_3 = 60\Omega$ , 求电路的总电阻  $R_{\Sigma}$ 。

解:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60} = \frac{1}{10}$$

$$R_{\Sigma} = 10(\Omega)$$

## 3. 电阻混联

既有电阻串联, 又有电阻并联的电路称为电阻的混联电路, 如图 1-5 (a) 所示。

分析计算混联的电路的方法如下:



- (1) 应用电阻的串联、并联逐步简化电路，求出电路的等效电阻。
- (2) 根据欧姆定律，由电路的等效电阻和总电压求电路的总电流。
- (3) 根据欧姆定律以及分压、分流规律，由总电流求各支路的电流和电压。

在分析和计算混联电路时，首先将电路中的串、并联关系搞清楚。当电路图中这些关系不易辨认时，可将电路图改画，使其美观、清楚。图 1-5 (b) 就是图 1-5 (a) 的改画图。

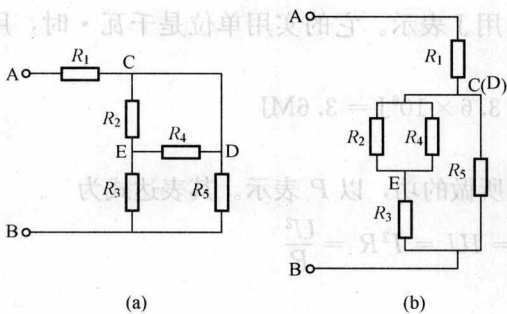


图 1-5 电阻的混联

(a) 混联电路；(b) 改画的混联电路图

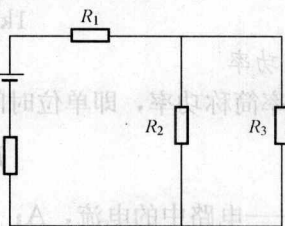


图 1-6 电路图

**【例 1-4】** 在图 1-6 中，若  $E = 120\text{V}$ 、 $R_0 = 1\Omega$ 、 $R_1 = 19\Omega$ 、 $R_2 = 30\Omega$ 、 $R_3 = 60\Omega$ ，求内阻  $R_0$  上的电压降  $U_{R_0}$  和流过  $R_2$  的电流  $I_{R_2}$ 。

解：

$$R_{2,3} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{60}} = 20(\Omega)$$

$$R_{\Sigma} = R_0 + R_1 + R_{2,3} = 1 + 19 + 20 = 40(\Omega)$$

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = 120/40 = 3(\text{A})$$

$$U_{R_0} = IR_0 = 3 \times 1 = 3(\text{V})$$

$$I_{R_2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot I = \frac{60}{30 + 60} \times 3 = 2(\text{A})$$

#### 4. 电源的串、并联

与电阻的串、并联相似，电源也可以经串联、并联后使用。

电源串联时，等效电动势为各电源电动势的代数和，其等效内阻为各电源内阻之和，而在各电源上流过的电流相同。电源串联的效果是提高电路的总电动势；但使用时应注意：①电源的正负极必须是首尾相连防止接反而使电动势互相抵消；②各电源的内阻应尽量接近，以免工作时内阻高的电源压降过大而发热。

电动势和内阻相同的电源并联时，其等效电动势仍为单个电动势值，等效总内阻按各电源内阻并联关系算得，而总电流为六个电源的电流之和。电源并联的效果是提高电路的总电流；但使用时应注意：①应将电源的所有正极和所有负极分别连在一起，不能接反；②各电源的电动势和内阻应尽量相等，以免造成各电动势之间的环流及电流分配不均。

### 四、电功、电功率及电流热效应

#### 1. 电功

电流所做的功叫做电功，又叫电能，用  $W$  表示。其表达式为

$$W = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t \quad (1-10)$$

式中  $I$ ——电路中的电流, A;

$U$ ——电路两端的电压, V;

$R$ ——电路的电阻,  $\Omega$ ;

$t$ ——通电时间, s。

电功及电能的单位是焦耳, 简称焦, 用 J 表示。它的实用单位是千瓦·时, 用  $\text{kW} \cdot \text{h}$  表示。J 与  $\text{kW} \cdot \text{h}$  间的换算关系为

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

## 2. 电功率

电功率简称功率, 即单位时间内电流所做的功, 以  $P$  表示。其表达式为

$$P = \frac{W}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R} \quad (1-11)$$

式中  $I$ ——电路中的电流, A;

$U$ ——电阻端电压, V;

$R$ ——电阻,  $\Omega$ 。

电功率的单位是瓦特, 简称瓦, 用 W 表示, 常用单位还有 kW、MW。其换算关系是

$$1\text{kW} = 10^3 \text{W} = 10^{-3} \text{MW}$$

## 3. 电流热效应

电流通过电阻时, 由于自由电子的碰撞, 电能不断地转换成热能, 因而使电阻发热。这种电流通过电阻会产生热的现象, 称为电流的热效应。

电流热效应产生的热量, 用  $Q$  表示, 其表达式为

$$Q = I^2Rt = IUt = \frac{U^2}{R}t \quad (1-12)$$

式中,  $I$ 、 $U$ 、 $R$ 、 $t$  的意义及单位同前, 热量  $Q$  的单位为焦耳, 用 J 表示。

## 五、直流复杂电路的计算

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。

### 1. 基尔霍夫定律

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。

(1) 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

$$\sum I = 0$$

(2) 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, 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, 其公式为

$$\sum E = \sum U \quad (1-13)$$

或

$$\sum E = \sum IR \quad (1-14)$$

应用式(1-14)时应注意: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

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

## 2. 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  $m$  个支路,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。

**【例 1-5】** 设图 1-7 中,  $E_1 = 20\text{V}$ 、 $E_2 = 10\text{V}$ 、 $R_1 = 5\Omega$ 、 $R_2 = 10\Omega$ 、 $R_3 = 20\Omega$ 。

分别求出三个支路中的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

在图 1-7 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(1-16);根据 KVL,列出  $m-n+1=3-2+1=2$  个电压方程,即式(1-17)和式(1-18),对这三个方程式联立可计算出三个未知数  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

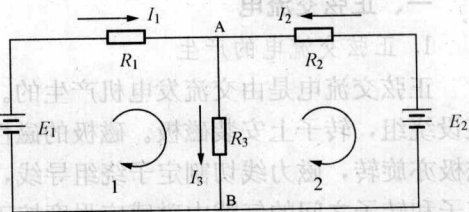


图 1-7 [例 1-5] 图

解: 根据 KCL 和 KVL 列出方程式

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 & (1-16) \\ E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 & (1-17) \\ -E_2 = -I_3 R_3 - I_2 R_2 & (1-18) \end{cases}$$

式(1-17)与式(1-18)相加,并代入数字得

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

$$I_1 = \frac{10 + 10I_2}{5} = 2 + 2I_2 \quad (1-19)$$

将式(1-19)代入式(1-16)得

$$\begin{aligned} 2 + 2I_2 + I_2 - I_3 &= 0 \\ 3I_2 - I_3 &= -2 \\ I_3 &= 3I_2 + 2 \end{aligned} \quad (1-20)$$

将式(1-20)代入式(1-18),并代入数据得

$$\begin{aligned} -10 &= -(3I_2 + 2) \times 20 - I_2 \times 10 \\ -10 &= -60I_2 - 40 - 10I_2 \end{aligned}$$

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

将  $I_2$  值代入式 (1-20) 得

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

将  $I_2$ 、 $I_3$  值代入式 (1-16) 得

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

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

由于  $I_2$  为负值, 因此, 其实际电流方向与图 1-7 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箭头方向相同。

因此,  $I_1 = 1\frac{1}{7} \text{A}$ 、 $I_2 = -\frac{3}{7} \text{A}$ 、 $I_3 = \frac{5}{7} \text{A}$ , 电流方向为  $I_1$ 、 $I_3$  与图 1-3 中箭头 1 所标方向相同,  $I_2$  的电流方向与图 1-3 中箭头 2 所标方向相反。

## 课题二 单相正弦交流电路

交流电是指电动势、电压或电流的大小和方向都随时间而变化的。按正弦规律变化的交流电, 称为正弦交流电, 简称交流电。

### 一、正弦交流电

#### 1. 正弦交流电的产生

正弦交流电是由交流发电机产生的。实际使用的大型交流发电机有定子和转子, 定子上装设绕组, 转子上安装磁极。磁极的磁性是由直流产生的。转子由原动机带动, 转子旋转, 磁极亦旋转, 磁力线切割定子绕组导线, 定子绕组感应出交流电动势。发电机在制造时, 使定子和转子之间的气隙中磁感应强度按正弦规律分布, 因此发电机发出的电动势为正弦交流电动势。

#### 2. 正弦交流电的三要素

交流电的表达式为

$$e = E_m \sin \alpha \quad (1-21)$$

式中  $e$ ——电动势的瞬时值, V;

$E_m$ ——电动势的最大值 (幅值), V;

$\sin \alpha$ ——角度为  $\alpha$  的正弦值。

如果发电机的转子在原动机的带动下在时间  $T$  内以  $\omega$  的角速度旋转, 则转过的角速度  $\alpha = \omega t$ , 因此, 正弦交流电动势可表达为

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-22)$$

由式 (1-21)、式 (1-22) 比较可知  $\alpha = \omega t$ 。当  $\omega t = 0$ , 则  $\alpha = 0$ 。如果研究问题开始的一瞬间, 即  $t = 0$  的瞬间, 角度不等于零, 而是等于  $\varphi$ 。则式 (1-22) 应改写为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-23)$$

式中  $\omega$ ——角频率;

$\varphi$ ——初相角。

正弦交流电的最大值、角频率 (即角速度)、初相角称为正弦交流电的三要素。



(1) 正弦交流电的最大值、有效值和平均值。交流电的某一瞬时的数值是随时间变化的，因此，不能用作测量的依据。为了解决交流电的测量问题，在工程上采用将交流电流的发热量与直流电流的发热量等效的方法，从而引出有效值的概念。

1) 有效值。有一交流电流  $i$  通过某一电阻  $R$ ，在一个周期的时间内产生的热量  $Q_A$ ，与一个恒定直流电流  $I$  通过同一电阻，在相同的时间内产生的热量  $Q_0$  相等，我们把这个直流电流的量值  $I$  称为交流电流  $i$  的有效值。简言之，交流电流的有效值就是与其热效应相等的直流电流的量值。

正弦交流电的有效值与最大值的关系是

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}}U_m = 0.707U_m \text{ 或 } U_m = \sqrt{2}U = 1.414U$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}}I_m = 0.707I_m \text{ 或 } I_m = \sqrt{2}I = 1.414I$$

式中  $I$ 、 $U$ ——分别为电流、电压有效值；

$I_m$ 、 $U_m$ ——分别为电流、电压最大值。

在实际工作中，有效值用得最多，通常所说的交流电的数值、交流机电产品铭牌上的额定值及测量表计的读数都是指有效值。如果不加说明，则一般所说的电流、电压值都是指有效值。

2) 平均值。由于正弦交流电在一个周期内的平均值为零，因此这里所说的平均值是正弦交流电在半个周期内的平均值。

交流电流在半周期内通过电路横截面的电荷量，与直流电流在相同的时间内通过的电荷量相等时，这个等效直流电流值叫做交流电流在半周期内的平均值。用  $I_{av}$  表示。

正弦交流电的平均值与最大值的关系是



$$I_{av} = \frac{2}{\pi}I_m \quad (1-24)$$

因为  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ，则可以证明

$$I_{av} = 0.9I \quad (1-25)$$

电压有效值、平均值和最大值三者之间也有同样的规律。

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, U_{av} = \frac{2}{\pi} \times U_m, U_{av} = 0.9U$$

(2) 角频率、频率和周期。交流电每秒钟所变化的电角弧度值，称为交流电的角频率（角速度），其单位 rad/s。角频率、频率和周期都是反映交流电重复变化快慢的物理量，它们之间的关系为

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (1-26)$$

式中  $T$ ——周期，是交流电每交变一次所需要的时间，s；

$f$ ——频率，是交流 1s（单位时间）内交变的周期数，Hz。

周期和频率是互为倒数关系，即

$$T = \frac{1}{f} \text{ 或 } f = \frac{1}{T} \quad (1-27)$$