

生产人员专业基础培训适用

电气设备运行 技术基础

周武仲 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

生产人员专业基

TM

电气设备运行 技术基础

周武仲 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从电厂和变电站电气运行和管理人员应掌握的基础知识和电气设备的运行技术出发,介绍了交直流电路的分析计算,电力系统的短路计算和倒闸操作,电力系统的运行、调整和稳定,继电保护和自动装置,变压器、发电机、电动机、高压断路器等电气设备的运行,发电厂和变电站的自动化,发电厂和电力系统事故处理等,内容上力求实用性和先进性。

本书可供电力系统中电气运行和管理人员培训用,也可供相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备运行技术基础/周武仲编著. —北京: 中国电力出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5123-8535-1

I. ①电… II. ①周… III. ①电气设备-运行
IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 269824 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 4 月第一版 2016 年 4 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 16 开本 12.125 印张 317 千字

印数 0001—2000 册 定价 36.00 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

随着我国电力事业的飞速发展，电力系统正向大机组、高参数、大电网、高电压、高度自动化方向发展。而现代化电力系统安全可靠地运行，是国民经济发展的重要保证。正确地掌握电气设备运行的基本知识是从事现代化电力系统运行人员应具备的必要能力。它包括运行人员对运维技能的熟练程度，掌握新技术、新设备、新工艺的能力，综合和管理能力，适应和协作能力等。本书针对当前新的电气设备的大量采用和电力系统网络的扩大和复杂化，从电气运行的基本知识出发，讲述交直流电路的分析计算，短路电流的分析计算，电力系统的运行、调整和稳定，中性点运行方式，倒闸操作技术，继电保护和自动装置，变压器、发电机、电动机、高压变配电设备的运行，发电站和变电站的自动化等内容，并介绍了发电厂和电力系统的事故处理。编者力求本书内容翔实、逻辑性强、实用性强。

由于编者的水平有限，书中的疏漏和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2015年11月

目 录



前言

第一章 直流电路的分析计算	1
第一节 欧姆定律和基尔霍夫定律	1
第二节 复杂直流电路的分析计算	5
第三节 非线性电阻和电路	14
第二章 交流电路的分析计算	16
第一节 正弦交流电路的分析方法	16
第二节 交流电路的基尔霍夫定律与叠加原理	19
第三节 单相交流电路的分析计算	20
第四节 三相交流电路的分析计算	27
第五节 交流铁芯线圈	37
第六节 交流电的集肤效应	41
第三章 电力系统的短路计算	43
第一节 电力系统短路的一般概念	43
第二节 电力系统短路电流的计算	47
第三节 短路电流计算例	54
第四节 短路电流的电动力及发热计算	58
第五节 短路电流的限制	63
第四章 电力系统的运行、调整 and 稳定	66
第一节 电力系统简介	66
第二节 电力系统的运行和调整	70

第三节	电力系统的稳定	75
第五章	电力系统中性点运行方式	81
第一节	中性点不接地三相系统	81
第二节	中性点经消弧线圈接地系统	84
第三节	中性点直接接地系统	86
第四节	中性点经阻抗接地系统	88
第六章	电力系统的倒闸操作	90
第一节	概述	90
第二节	隔离开关和断路器的倒闸操作	93
第三节	母线的倒闸操作	95
第四节	电力线路的倒闸操作	96
第五节	变压器的倒闸操作	97
第六节	环形网络的并、解列操作	99
第七节	电源的并、解列操作	102
第七章	继电保护	104
第一节	输电线路的电流保护	104
第二节	输电线路的接地保护	107
第三节	输电线路的距离保护	112
第四节	输电线路的全线速动保护	119
第五节	变压器保护	130
第六节	发电机保护	142
第七节	母线保护和断路器失灵保护	156
第八章	自动装置	163
第一节	同步发电机并列装置	163
第二节	自动低频减载装置	166
第三节	发电机自动调节励磁装置	170
第四节	输电线路的综合重合闸装置	175
第五节	备用电源自动投入装置	179

第六节	远动装置	185
第九章	变压器的运行	189
第一节	变压器的基本原理	189
第二节	变压器的分类和结构	191
第三节	变压器的运行状态	192
第四节	变压器的负荷能力	194
第五节	变压器的并列运行	195
第六节	变压器的经济运行	198
第七节	变压器的异常运行及事故处理	200
第十章	同步发电机的运行	206
第一节	同步发电机的基本知识	206
第二节	同步发电机的运行特性	210
第三节	同步发电机的启动和停机	213
第四节	同步发电机的异常运行和事故处理	226
第十一章	异步电动机的运行	234
第一节	异步电动机的原理和运行特性	234
第二节	异步电动机的分类和结构	236
第三节	异步电动机的运行参数	238
第四节	异步电动机的启动	241
第五节	异步电动机的异常运行	243
第六节	异步电动机的自启动	246
第十二章	直流电机的运行	247
第一节	直流电机的分类、结构和特性	247
第二节	直流电机运行中的检查	251
第三节	运行中对电刷的维护	254
第四节	对换向的维护	255
第十三章	高压断路器的运行	259
第一节	交流电弧的产生和熄灭原理	259

第二节	高压断路器的分类和结构	263
第三节	高压断路器的运行和维护	265
第四节	高压断路器的异常运行和事故处理	270
第十四章	高压隔离开关的运行	274
第一节	高压隔离开关的分类、结构和参数	274
第二节	高压隔离开关的运行维护	276
第三节	高压隔离开关的常见故障和事故处理	276
第十五章	高低压熔断器的运行	279
第一节	熔断器的功能和特性	279
第二节	熔断器的分类和结构	280
第三节	熔断器的运行和维护	283
第十六章	高压负荷开关的运行	284
第一节	高压负荷开关的功能和特性	284
第二节	高压负荷开关的分类和结构	284
第三节	高压负荷开关的运行和维护	287
第十七章	重合器和分段器的运行	288
第一节	重合器的分类和结构	288
第二节	分段器的分类和结构	291
第三节	重合器和分段器的运行和维护	294
第十八章	电力互感器的运行	295
第一节	电流互感器的运行	296
第二节	电压互感器的运行	302
第三节	电子式互感器的运行	307
第十九章	电力电容器的运行	312
第一节	电力电容器的种类和结构	312
第二节	电力电容器的运行和维护	315
第二十章	直流系统的运行	318
第一节	直流系统的典型接线及运行方式	318

第二节	直流系统的电源装置	325
第三节	直流系统的充电装置	327
第四节	直流电源的监控系统	331
第五节	直流系统的运行监视	334
第二十一章	发电厂和变电站的自动化	336
第一节	发电厂自动化系统	337
第二节	变电站综合自动化系统	342
第三节	数字化和智能变电站	350
第四节	电力系统管理的微机化	356
第二十二章	发电厂和电力系统的事故处理	360
第一节	概述	360
第二节	电力系统频率降低的物理过程及事故处理	360
第三节	电力系统电压降低的物理过程及事故处理	363
第四节	发电厂与系统解列的事故处理	366
第五节	热力系统故障引起的电气事故处理	368
第六节	发电厂全厂停电的事故处理	369
第七节	电力系统非同期振荡的事故处理	372

第一章



直流电路的分析计算

在直流电路中，大多数是已知电路中的电动势和各个电阻，要求计算各支路中的电流、负荷上的电压、各部分的功率；也有些是已知电流和电压，要求计算电阻和电动势。

电路可分为无分支电路和分支电路两种，许多情况下分支电路可以简化为无分支电路，这一类电路统称为简单电路；而不能用串、并联方法简化为无分支电路的电路，称为复杂电路。

计算电路的基本定律是欧姆定律和基尔霍夫定律；计算电路的方法有支路电流法、回路电流法、等效电源法和叠加法等。下面将分别加以说明。

第一节 欧姆定律和基尔霍夫定律

一、欧姆定律

电阻元件是一种对电流呈现阻力的元件，电流要流过电阻就必然要消耗能量。因此，沿电流流动方向必然会出现电压降。如果电阻元件的电阻值为 R ，则电阻元件与通过其中的电流的关系应为

$$U = RI \quad (1-1)$$

式中 R ——电阻， Ω ；

I ——流过该电阻的电流， A ；

U ——该电阻元件两端的电压， V 。

上述关系称为欧姆定律。它表明了电阻元件的特性，即电流流过电阻，就会沿着电流的方向出现电压降，其值为电流与电阻

的乘积。需要注意的是，电流和电压降的真实方向总是一致的，因此，只有在关联的参考方向前提下（见图 1-1）才可运用式 (1-1)。如果电压降与电流的参考方向相反，则

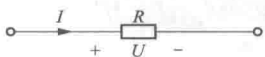


图 1-1 电阻元件的符号

$$U = -RI$$

电压与电流是电路的变量，电阻 R 是一种电路参数，也可以用另一个参数——电导来表征，电导用符号 G 表示，其定义为

$$G = 1/R$$

电导的单位为西门子，简称西 (S)。用电导表征电阻元件时，欧姆定律为

$$U = I/G \quad \text{或} \quad I = GU$$

电阻的功率为

$$P = I^2R = I^2/G$$

及

$$P = U^2/R = U^2G$$

式中 P ——电阻上消耗的有功功率，W 或 kW。

二、直流电阻的串并联计算

直流电阻的串联可以用图 1-2 进行计算。

由于流经各串联电阻的电流相等，端电压等于各串联电阻的电压之和。由图 1-2 (a) 得

$$U = U_1 + U_2$$

推广到 n 个电阻串联，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

由欧姆定律

$$U_1 = R_1 I \quad U_2 = R_2 I$$

$$U = U_1 + U_2 = (R_1 + R_2) I \quad \text{(a) 电路图; (b) 串联电阻的等效电路图}$$

则

$$R = U/I = R_1 + R_2$$

如图 1-2 (b) 所示， R 称为串联电阻的等效电阻，而等效电阻等于各串联电阻之和，即

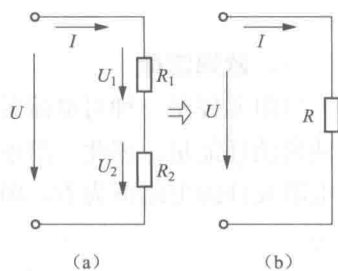


图 1-2 电阻的串联

$$U = RI$$

推广到 n 个电阻串联, 即

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

直流电阻的并联可以用图 1-3 进行计算。

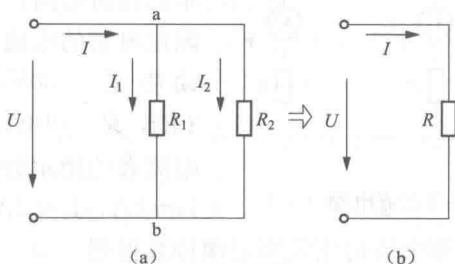


图 1-3 电阻的并联

(a) 电路图; (b) 并联电阻的等效电路图

由图 1-3 可得

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1 = G_1 U \quad I_2 = G_2 U$$

则
$$I = I_1 + I_2 = (G_1 + G_2)U = GU$$

$$G = G_1 + G_2$$

推广到 n 个电阻并联, 即

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n$$

$$G = 1/R \quad G_1 = 1/R_1 \quad \cdots \quad G_n = 1/R_n$$

则
$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \cdots + 1/R_n$$

即等效电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和。

三、基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律也称为基尔霍夫电流定律, 是研究各支路电流之间关系的定律, 即流入节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。用公式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-2)$$

式中符号“ Σ ”是“和”的意思。式 (1-2) 可叙述为: 在

电路的任一节点上，流入（或流出）节点电流的代数和恒等于零。“代数和”即相加的各项之中有正数也有负数，正和负是按规定的电流方向而定的。

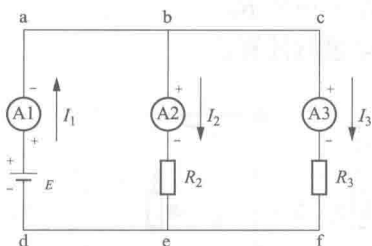


图 1-4 简单直流电路 (一)

例如，图 1-4 表示一个简单的直流电路，在各支路接有测量电流的电流表，电源的电动势 $E = 30\text{V}$ ，电阻 $R_2 = 30\Omega$ ， $R_3 = 10\Omega$ 。此时，三块电流表的指示分别为 $I_1 = 4\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_3 = 3\text{A}$ 。

上述各支路电流可用欧姆定律计算得到，即

$$I_2 = E/R_2 = 30/30 = 1(\text{A})$$

$$I_3 = E/R_3 = 30/10 = 3(\text{A})$$

$$G = 1/R = 1/R_2 + 1/R_3 = (1/30) + (1/10) = 4/30(\text{S})$$

$$R = 7.5\Omega$$

$$I_1 = E/R = 30/7.5 = 4(\text{A})$$

$$I_2 + I_3 = 1 + 3 = 4(\text{A})$$

四、基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律也称为基尔霍夫电压定律，是研究回路中各部分电压之间关系的定律，即在任何一个闭合回路内，各段电压的代数和等于零。用公式表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 说明，从回路任何一点出发，沿回路循行一周，电位升的和应等于电位降的和。

例如，图 1-5 中，电源电动势 $E_1 = 24\text{V}$ ， $E_2 = 40\text{V}$ ， $R_1 = 6\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 10\text{k}\Omega$ 。由实验可测得电流为 1mA ，各部分电压为 $U_1 = 6\text{V}$ ， $U_2 = 10\text{V}$ ， $U_3 = 24\text{V}$ ， $U_4 = 40\text{V}$ 。对图 1-5 的电路来说，即

$$U_4 = U_3 + U_1 + U_2$$

或
$$E_2 = E_1 + IR_1 + IR_2$$

$$E_2 - E_1 = IR_1 + IR_2 \quad (1-4)$$

$$\sum E = \sum IR$$

即回路中电动势（电位升）的代数和等于电阻上电压降（电位降）的代数和，两者相加为零，即 $\sum U=0$ 。

将测得的数据代入式（1-4）可得

$$40 - 24 = 1 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^3 + 1 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 \text{ (V)}$$

$$\text{则} \quad 16 = 6 + 10 \text{ (V)}$$

应该指出的是，在应用基尔霍夫第二定律时，首先要选择一个回路方向，作为判断电压、电动势正负的标准。回路方向可以任意选择，可用顺时针或逆时针的箭头表示，也可用回路各点的顺序符号表示，在图 1-5 中顺时针方向可用“abcda”表示。

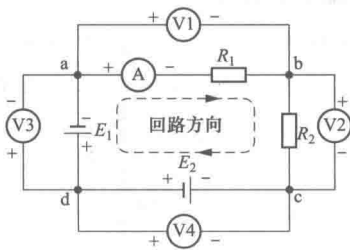


图 1-5 简单直流电路（二）

第二节 复杂直流电路的分析计算

对于简单的直流电路，可用串、并联的方法进行简化。但对于复杂的直流电路，靠解简单电路的方法分析和计算复杂电路是困难甚至是不可能的，这就需要用新的方法进行分析计算。下面介绍分析和计算复杂电路的几种方法。

一、支路电流法

支路电流法是以支路电流作为未知量，应用基尔霍夫定律，对复杂电路的节点和回路列出所需要的方程，然后联立求解方程，求出未知数。其计算的一般步骤如下：

(1) 任意选定各支路（ b 个）电流的正方向，标在电路图中。

(2) 按基尔霍夫第一定律，列一组（ $n-1$ ）个独立节点的节点电流方程式（ n 为电路节点数）。

(3) 按基尔霍夫第二定律, 列一组 $m=b-(n-1)$ 个独立回路的回路电压方程式。

(4) 联立求解所列 $(n-1)+m=b$ 个方程式。

(5) 把计算结果代入原方程组验算。

【例 1-1】 图 1-6 是一个蓄电池组的充电电路。充电机的电动势 $E_1=260\text{V}$, 蓄电池组的电动势 $E_2=234\text{V}$, 充电机的内阻 $r_{01}=2\Omega$, 蓄电池组的内阻 $r_{02}=1.2\Omega$, 电阻 $R=48\Omega$, 求各支路电流 I_1 、 I_2 和 I 。

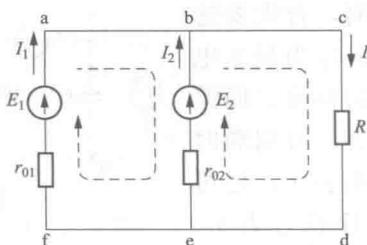


图 1-6 蓄电池组充电电路

解: (1) 对于节点 b , 用基尔霍夫第一定律列出节点的电流方程式 (假设电流流入节点为正, 流出节点为负), 即

$$I_1 + I_2 - I = 0$$

对于节点 e 可以列出节点电流方程式, 即

$$-I_1 - I_2 + I = 0$$

(2) 对于回路 $abefa$, 用基尔霍夫第二定律列出方程式 (取回路方向为图 1-5 所示的顺时针方向), 即

$$E_1 - E_2 = I_1 r_{01} - I_2 r_{02} \quad (1-5)$$

对于回路 $abcdefa$, 可列出方程式

$$E_1 = IR + I_1 r_{01}$$

对于回路 $bcdeb$, 可列出方程式

$$E_2 = IR + I_2 r_{02} \quad (1-6)$$

将式 (1-5) 和式 (1-6) 相加可得

$$E_1 - E_2 + E_2 = I_1 r_{01} - I_2 r_{02} + IR + I_2 r_{02}$$

整理后可得

$$E_1 = IR + I_1 r_{01}$$

将上述各独立的方程联立为

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I = 0 \\ E_1 - E_2 - I_1 r_{01} + I_2 r_{02} = 0 \\ E_2 - IR - I_2 r_{02} = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

式(1-7)中有三个未知数 I_1 、 I_2 和 I ，联立可解得

$$I_1 = 10\text{A} \quad I_2 = -5\text{A} \quad I = 5\text{A}$$

I_2 为负值，说明其实际方向与所标出的方向相反，即蓄电池组不能送出电流，而是处于充电状态， I_2 为充电电流。充电机同时向蓄电池组和直流负载供电。

二、回路电流法

为了减少方程式的个数，可采用回路电流法，用回路电流代替支路电流，把支路电流看成是几个回路电流的叠加。

其解题的一般步骤如下：

(1) 选择独立回路组，一般可按网孔选择，同时选定各回路电流的正方向。

(2) 列出这组独立回路的电压方程式。

(3) 联立求解所列方程式，求出各回路电流。

(4) 由回路电流求出各支路电流。

【例 1-2】 在图 1-7 中，选择一组独立回路 abda、adca、bdcb，并选定各回路的正方向，设各回路电流为 I_I 、 I_{II} 、 I_{III} 。按基尔霍夫第二定律列出这组独立回路的电压方程式。

对回路 abda

$$I_I r_1 + I_I r_5 + I_{II} r_5 + I_I r_4 - I_{III} r_4 = E_1 - E_4$$

对回路 bdcb

$$I_I r_5 + I_{II} r_5 + I_{II} r_6 + I_{III} r_6 + I_{II} r_2 = E_2$$

对回路 adca

$$I_{III} r_4 - I_I r_4 + I_{II} r_6 + I_{III} r_6 + I_{III} r_3 = E_3 + E_4$$

将上面三个方程式联立求解，得出 I_I 、 I_{II} 、 I_{III} 。再选定各

支路电流的正方向，如图 1-7 所示，最后求出

$$I_1 = I_I, I_2 = I_{II}, I_3 = I_{III}$$

$$I_4 = I_{III} - I_I, I_5 = I_I + I_{II}, I_6 = I_{II} + I_{III}$$

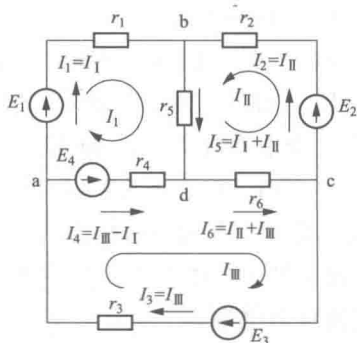


图 1-7 多回路电路的求解

三、等效电源法

等效电源法用于只需要计算复杂电路中某一支路的电流时，如果用前面求解电路的方法计算，就必然引出一些不需要计算的电流，使计算过程变得很麻烦。在图 1-8 中，表示了一个复杂电路用一个等效电源代替的转换过程。等效电源的电动势为 E' ，内阻为 r_0' ，如图 1-8 (c) 所示，则待求支路电流为

$$I = E' / (r_0' + R)$$

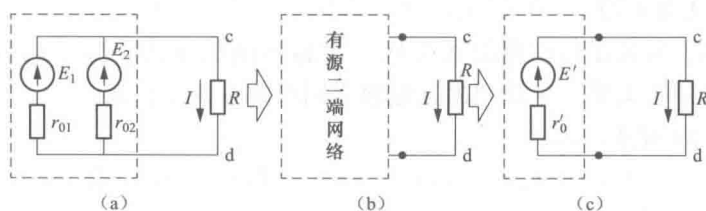


图 1-8 复杂电路转换为等效电源的过程

(a) 电路图；(b) 示意图；(c) 等效图

下面说明等效电源的电动势和内阻的求法。

等效电源的电动势 E' 是复杂电路二端网络的开路电压。在