

电气设备运行技术

(试用本)

火电生产类中级工培训教材

山西省电力工业局编



水利电力出版社

火电生产类中级工培训教材

电气设备运行技术

(试用本)

山西省电力工业局编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

北京市大郊亭印刷厂印刷

*

787 × 1092毫米 32开本 16.5 印张 355 千字

1985年7月第一版 1985年7月北京第一次印刷

印数 60001册—63000册 定价 3.50 元

书号15145·5777

内 容 提 要

本书是火电生产类中级工培训教材之一。主要从火力发电厂电气运行工人应掌握的基础知识和电气设备的运行技术出发,讲述交、直流电路分析计算,短路电流的分析计算,继电保护和自动装置,电力系统运行,变压器、发电机、高压断路器、消弧线圈的运行和操作技术,与此同时介绍了电气设备常见故障和发电厂的事故处理。内容上理论联系实际,力争体现工人技术培训教材的特点,并注意与学徒工初级工培训教材相衔接。

本书适合发电厂完成初级工培训的新工人和中级工学习使用,也可作为技工学校、中等专业学校中电专业师生的教学参考书。

前 言

为了提高火力发电厂中级工的技术水平,使技术培训工作逐步走上正轨,继《火电生产类学徒工初级工培训教材》编写出版之后,1984年10月22日水利电力部又以(84)水电教字第76号文向我局下达编写《火电生产类中级工培训教材》的任务。

根据国家有关加强职工培训通知的精神,在完成“双补”任务的基础上,各单位应适时地转入大力开展中级工人(4~6级工)的技术业务培训工作,要求到1990年工人中实际水平达到中级技术等级的比例逐步提高到50%左右。火电生产类中级工培训教材就是根据这一精神而编写的。

本教材是按照水利电力部1979年颁发的《工人技术等级标准》中4~6级工人“应知”的要求,分工种编写的。教材的内容以200MW以上的机组为重点,努力反映新技术、新设备、新工艺、新材料和新经验,以适应火电生产发展的需要。整个教材的编写力求体现工人技术培训的特点,本着理论联系实际的原则,努力做到内容准确、文字精练、插图简明、通俗易懂,并注意同学徒工初级工培训教材相衔接。

《火电生产类中级工培训教材》共十四本,适用于二十二个工种。为了保证这套教材的质量和使之适应在全国范围使用,我局除承担了部分教材编写任务外,还邀请了清河、陡河、大港、望亭、马头、闵行等发电厂,水利电力部西安热工研究所、华东电业管理局、华北电业管理局和山东省电

力试验研究所等单位及有关同志参加编写和审稿工作。在此，特向上述单位和有关同志表示衷心感谢。

本书第一、二、三、四、九章由太原第二热电厂李冀先同志编写；第五、八、十、十一章由太原第一热电厂程逢科同志编写；第六、七章由山西省电力工业局中心调度所李养善同志编写；第十二章第一、二、三节由望亭发电厂沈剑青同志编写；第十二章第四节由望亭发电厂吕国强同志编写；第十二章第五、六节由望亭发电厂李大彤同志编写。李冀先同志任主编。全书由山西省电力工业局沈忠民同志主审。

由于编写的时间仓促，又缺乏经验，培训教材中难免存在错误和不妥之处，恳请使用单位和广大读者提出宝贵意见。本培训教材现以试用本出版，准备根据各方面意见在再版时进行修改，以进一步提高质量。

山西省电力工业局

一九八四年十二月

目 录

前 言

第一篇 基础知识

第一章 直流电路的分析计算 (1)

第一节 克希荷夫定律 (1)

第二节 复杂直流电路的分析计算 (5)

第三节 非线性串联电路的图解法 (28)

复习思考题 (33)

第二章 交流电路分析与交流铁芯线圈 (34)

第一节 交流电路的克希荷夫定律与叠加原理 (34)

第二节 电阻、电感和电容串、并联的交流电路 (36)

第三节 三相电路的分析计算 (57)

第四节 交流铁芯线圈 (65)

第五节 交流电的趋表效应 (71)

复习思考题 (74)

第二篇 专业基础知识

第三章 电力系统短路故障分析与计算 (76)

第一节 电力系统短路的一般概念 (76)

第二节 电力系统的短路计算 (80)

第三节 短路电流的电动力及发热计算 (107)

第四节 短路电流的限制 (115)

复习思考题 (117)

第四章 电力系统简介 (118)

第一节 概述 (118)

第二节 电力系统的运行调整.....	(125)
第三节 电力系统的静态和动态稳定.....	(146)
复习思考题.....	(152)
第五章 发电厂及电力系统的倒闸操作基础	(154)
第一节 概述.....	(154)
第二节 隔离开关和断路器的操作.....	(157)
第三节 母线的操作.....	(162)
第四节 电力线路的操作.....	(166)
第五节 变压器的操作.....	(167)
第六节 环形网络的并、解列操作.....	(169)
第七节 电源的并、解列操作.....	(173)
复习思考题.....	(179)
第六章 继电保护	(180)
第一节 输电线路的接地保护.....	(180)
第二节 输电线路的距离保护.....	(196)
第三节 输电线路的高频保护.....	(211)
第四节 变压器保护.....	(224)
第五节 发电机保护.....	(252)
第六节 母线保护.....	(279)
第七节 断路器失灵保护.....	(282)
复习思考题.....	(284)
第七章 自动装置	(285)
第一节 同步发电机并列装置.....	(285)
第二节 自动低频减载装置.....	(294)
第三节 发电机自动调节励磁装置.....	(298)
第四节 输电线路的综合重合闸装置.....	(312)
第五节 远动装置.....	(329)
复习思考题.....	(345)

第三篇 电气设备运行技术

第八章 变压器的运行	(346)
第一节 变压器运行状态分析	(346)
第二节 自耦变压器	(356)
第三节 变压器合闸时的励磁涌流	(366)
第四节 变压器的负荷能力	(368)
第五节 变压器的并联运行	(373)
第六节 变压器的经济运行	(377)
第七节 变压器的异常运行及事故处理	(380)
复习思考题	(392)
第九章 同步发电机的运行	(394)
第一节 同步发电机的基本知识	(394)
第二节 同步发电机的运行特性	(399)
第三节 同步发电机负荷的接带与调整	(403)
第四节 同步发电机的非正常运行	(412)
第五节 同步发电机的事故处理	(432)
复习思考题	(443)
第十章 高压断路器的运行	(444)
第一节 交流电弧的产生和熄弧原理	(444)
第二节 高压断路器的运行和维护	(451)
第三节 高压断路器的异常运行及事故处理	(458)
复习思考题	(462)
第十一章 消弧线圈的运行	(464)
第一节 中性点不接地系统单相接地时的运行分析	(464)
第二节 消弧线圈的作用原理及补偿方式	(466)
第三节 消弧线圈的整定原则、容量及连接方式	(469)
第四节 消弧线圈的运行	(471)

第五节 装设消弧线圈的系统中接地故障点的寻找

..... (476)

复习思考题..... (476)

第十二章 发电厂和电力系统的事故处理..... (478)

第一节 概述..... (478)

第二节 频率和电压降低的事故处理..... (481)

第三节 发电厂与系统解列的事故处理..... (491)

第四节 热力系统故障引起的电气事故处理..... (495)

第五节 全厂停电的事故处理..... (503)

第六节 电力系统非同期振荡的事故处理..... (507)

复习思考题..... (517)

参考文献..... (518)

第一篇 基础知识

第一章 直流电路的分析计算

通过《电工基础知识》的学习，对电和电路的基本知识有了一定的了解。

我们在生产实践中所碰到的电路问题，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，有时候还要计算各部分的功率，也有些问题是已知电流和电压，要求计算电阻和电功势。例如分析电气设备的工作状态、扩大测量仪表的量程、设计输电和供电线路等等。这时，只用欧姆定律等就可能很不方便、或者无法进行分析和计算。

电路按结构可分为无分支电路（就是单一的闭合电路）和分支电路两种。在许多情况下分支电路可以简化为无分支电路，这一类电路我们统称为简单电路。但实际中，更多的电路不能用简单串、并联方法简化为无分支的电路，就叫做复杂电路。

现在，已经总结出很多种计算电路的方法。这些计算方法的依据仍是电路的两条基本定律——欧姆定律和克希荷夫定律。

第一节 克希荷夫定律

一、克希荷夫第一定律

如图 1-1 是由一个电源和两个负荷组成的电路。在这个电路里，ad、be、cf 三段没有分支的电路叫做支路。b点和c点是三条支路相汇合的交点，叫做节点。克希荷夫第一定律说明了连接在同一节点上的几条支路中电流间的关系。

假若按图 1-1 所示的电路做一个试验，在各支路中分别接入安培表，各安培表的极性（就是它的“+”、“-”端）如图中所示。如果电源的电动势 $E = 30\text{V}$ ，负荷电阻 $R_2 = 30\Omega$ ， $R_3 = 10\Omega$ 。那么，

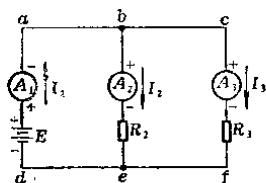


图 1-1 分析节点上电流关系的电路

三块安培表的指示分别为 $I_1 = 4\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_3 = 3\text{A}$ 。由

于直流安培表的指针只有在电流从“+”端流入、从“-”端流出时才能向右偏转，指出读数，所以根据安培表的极性可以判断各支路电流的实际方向，并将它们标在图 1-1 中。

根据各支路电流的实际方向可以看出，电流 I_1 是流入节点b的，而电流 I_2 和 I_3 是从节点b流出的。从所测得的数据可以看出：

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

从这里我们可以得到一个结论：流入节点的电流等于该节点流出的电流。这就是克希荷夫第一定律。

从物理意义上比较容易理解，因为节点本身不可能吸收或释电流，所以必定是流出等于流入。

根据图 1-1 所写出的 (1-1) 式加以变换，则可以得到

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (1-2)$$

这个式子说明，如果把流入节点b的电流 I_1 看做是正的（在 I_1 前面加正号），那末从节点b流出的电流 I_2 和 I_3 就应该是负的（在 I_2 和 I_3 前面加负号）。这样就可以把克希荷夫第一定律用一个普通的公式表达出来，把它叙述为：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。用公式表示即是

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

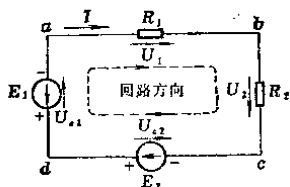
式中符号“ Σ ”是“和”的意思，“代数和”就是说相加的各项之中有正数也有负数。正或负是按规定的电流方向。

二、克希荷夫第二定律

在电路图上，任何一个闭合的电路都叫做回路。图1-2所示是一个由两个电源和两个负荷组成的回路。克希荷夫第二定律是说明回路中各部分电压之间相互关系的一条基本定律。

为了说明克希荷夫第二定律，我们按图1-3所示的电路做一个实验。电路中 $E_1 = 12V$ 、 $E_2 = 20V$ 、 $R_1 = 3k\Omega$ 、 $R_2 = 5k\Omega$ 。

我们知道，伏特表的



“+”端应该和高电位点 图1-2 电路中的闭合电路叫回路

（譬如电源的正极）相接，“-”端应该和低电位点（譬如电源的负极）相接，这时伏特表的指针才能向右偏转。因此，我们可以利用伏特表的极性来判断电路中各点电位的高低。

实验测得电流是 1mA ，各部分电压是： $U_1 = 3V$ 、 $U_2 = 5V$ 、 $U_{e2} = 20V$ 、 $U_{e1} = 12V$ 。根据安培表和伏特表的极性，

我们按顺时针方向来看这个回路中各点的电位，从a点出发，b点比a点的电位低8V，c点比b点的电位低5V，d点比c点的电位高20V，a点比d点的电位低12V。我们从a点出发，绕了一圈又回到了a点，由于a点的电位值是一定的，所以我们可以得出这样的结论：从回路任何一点出发，沿回路循环一周，电位升的和应该等于电位降的和，这就是克希荷夫第二定律。对于图1-3这个电路来说，就是

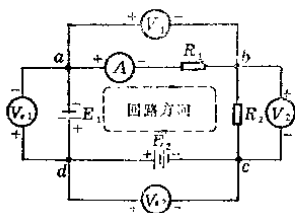


图 1-3 分析回路中电压关系的电路图

$$U_{e2} = U_{e1} + U_1 + U_2 \quad (1-4)$$

图1-3所示的电路接线，伏特表 V_{e1} 和 V_{e2} 的读数，代表 E_1 和 E_2 的大小，即 $U_{e1} = E_1$ 、 $U_{e2} = E_2$ ；伏特表 V_1 、 V_2 的读数代表电阻 R_1 、 R_2 上的电压降，即 $U_1 = IR_1$ ， $U_2 = IR_2$ 。所以(1-4)式可以写为

$$E_2 = E_1 + IR_1 + IR_2$$

移项后得到

$$E_2 - E_1 = IR_1 + IR_2 \quad (1-5)$$

或

$$\Sigma E = \Sigma IR \quad (1-6)$$

即回路中电动势（电位升）的代数和等于电阻上的电压降（电位降）的代数和。这是克希荷夫第二定律的另一种表达方式。

在根据(1-6)式写方程式时，电动势列在方程式的一边，电压降列在方程式的另一边，并且首先要选择一个回路方向。例如在图1-2中，选择顺时针方向为回路方向。

拿这个回路方向作标准，当电动势的方向与回路方向一致时，电动势取正号，方向相反时则取负号；当电流（或电压）的方向与回路方向一致时，电压降取正号，方向相反时，则取负号。根据这个规定，（1-5）式中的 E_2 、 IR_1 和 IR_2 都取正号， E_1 是负号。

应该注意的是，在应用克希荷夫第二定律分析或计算电路时，首先一定要选一个回路方向，作为判断电压、电动势正负的标准。回路方向可以任意选择，并不影响计算结果。回路方向可以用顺时针或逆时针的箭头表示，也可以用回路中各点的顺序符号表示。例如图 1-2 中，顺时针方向也可以用“abcda”表示。

第二节 复杂直流电路的分析计算

在实际中，我们所遇到的电路有时往往不能用电阻串、并联的方法加以简化。例如，发电厂的充电机在给蓄电池充电的同时，还要供电给其它直流负荷，如图 1-4 (a) 所示。母线所连接的 K_1 开关经常闭合，供给经常性的直流负荷； K_2 通往断路器的跳闸或合闸回路，只当断路器动作时闭合。这个电路可画成图 1-4 (b) 所示的电路进行分析。其中 E_1 、 r_{01} 代表充电机的电势和内阻， E_2 、 r_{02} 代表蓄电池组的电势和内阻。两个节点就相当于正、负母线。 R_1 代表送往直流负荷的经常性负荷， R_2 代表断路器的线圈。 R_1 和 R_2 可以用总负荷电阻 R 来代表，如图 1-4 (c) 所示。

这个电路看起来似乎很简单，但是电路中的各电阻既没有通过同一电流，也没有承受同一电压，它们之间不可能用串、并联简化，因为不是串、并联关系。同时也使我们看出，是复杂电路还是简单电路。取决于电路的连接方式，而

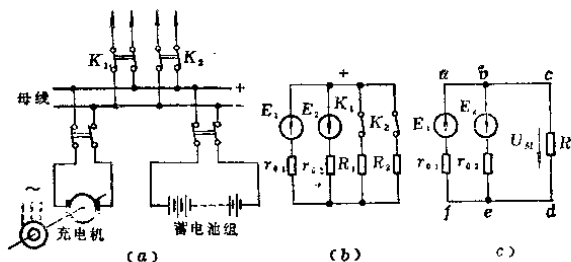


图 1-4 蓄电池组充电电路

(a) 充电和负荷回路；(b) 充电机组和蓄电池是两个电源的复杂电路；

(c) 用 R 代替 R_1 和 R_2 仍是复杂电路

不取决于元件数目的多少。

此外，在很多精密测量仪器中常用到电桥电路，如图 1-5 所示。图中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 代表桥臂的四个电阻， r_g 代表检流计内阻。这个电路虽然只有一个电源，但是各电阻之间也不是串、并联关系。

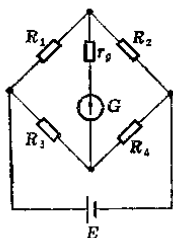


图 1-5 电桥电路也是复杂电路

对于简单电路，根据电源电势的方向，不经计算，就可以肯定电路中各电流的方向。对于复杂电路，不经计算，有些支路电流的方向是不能肯定的。显然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。这就使了解和掌握复杂电路的分析、计算方法成为必要。

一、支路电流法

在计算复杂电路的各种方法中，支路电流法是最基本的

方法。这种方法是以前支路电流作为未知量，应用克希荷夫两条定律，对于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，求出各未知数。让我们用实际例子来说明这种计算方法。

图 1-6 是蓄电池组的充电电路。已知充电机的电势 $E_1 = 130\text{V}$ ，蓄电池组的电势 $E_2 = 117\text{V}$ ，充电机的内阻 $r_{01} = 1\Omega$ ，蓄电池的内阻 $r_{02} = 0.6\Omega$ ，负荷电阻 $R = 24\Omega$ ，求各支路电流 I_1 、 I_2 和 I 。由于电路中有三个支路电流为未知量，所以要列出三个方程式。

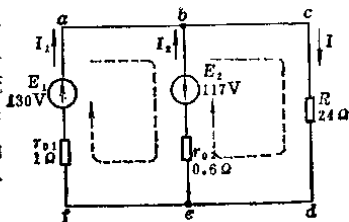


图 1-6 用支路电流法
计算复杂电路

首先，根据电路中标出的各支路电流的方向，对于节点 b 应用克希荷夫第一定律写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）

$$I_1 + I_2 - I = 0 \quad (1-7)$$

对于节点 e 也可以写出节点电流方程式

$$-I_1 - I_2 + I = 0 \quad (1-8)$$

把 (1-7) 式加 (1-8) 式为

$$0 = 0$$

可见方程式 (1-7) 和 (1-8) 只能是其中一个为独立方程，另一个可以通过其中的一个求得，所以只能取其中的一个方程，另一个没有存在的必要了。可以证明，对于电路中

各节点所能列出的独立方程式，应该比节点数少一个，例如节点数是8，那么独立节点方程只有两个。

应用克希荷夫第二定律，对于abefa回路（取回路方向为图1-6所示的顺时针方向）可写出

$$E_1 - E_2 = I_1 r_{01} - I_2 r_{02} \quad (1-9)$$

对于bedeb回路（也按顺时针方向）可以写出

$$E_2 = IR + I_2 r_{02} \quad (1-10)$$

对于 abcdefa 回路（取回路方向仍是顺时针方向）也可以写出

$$E_1 = IR + I_1 r_{01} \quad (1-11)$$

但是，我们若将方程式（1-9）与（1-10）相加即可以得到

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

整理后可得

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

显然就是方程（1-11）式。可见方程（1-9）和（1-10）为两个独立的方程，而当取了（1-9）式和（1-10）式以后，

（1-11）式已是不能再取的非独立方程，它对计算是没有作用的。因此，要想使所写的回路方程式是独立的，就要求在选取回路时，每一次必须使回路中包含一个在已写出的方程式中尚未包括的新支路。例如写方程式（1-9）时，af、be两条支路都是新支路；写方程式（1-10）时，cd支路是新支路；写方程式（1-11）时，af、cd两支路都已用过，所以方程式（1-11）就不是独立方程式。

应用克希荷夫两定律对于一个电路所能列出的独立方程的数目，恰恰等于待求的支路电流个数。

在上面的例子中，将已知的 E_1 、 E_2 、 r_{01} 、 r_{02} 和 R 的值代入（1-7）式、（1-9）式、（1-10）式中，即可得到一组