



单元机组集控值班员系列教材

DANYUAN JIZU  
DIANQI YUNXING

# 单元机组电气运行

林文孚 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



中国电力出版社

# 单元机组电气运行

第二版

中国电力出版社  
北京

参 考 文 献



# 单元机组集控值班员系列教材

本系列教材共分五册，分别为：单元机组集控值班员系列教材（一）单元机组运行、单元机组检修、单元机组事故处理、单元机组运行值班员、单元机组集控值班员。本系列教材可作为电力行业职业技能鉴定培训教材，也可作为电力行业从业人员自学教材。

# 单元机组电气运行

第 二 版 (2007) 目 录 页 数 插 图

编 者：林文孚 编 著

林文孚 编著

ISBN 7-5082-2828-7 2007年3月第1版

ISBN 7-5082-2828-7 2007年3月第1版

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第143268号

单元机组集控值班员系列教材	各	册
单元机组运行	各	册
单元机组检修	各	册
单元机组事故处理	各	册
单元机组运行值班员	各	册
单元机组集控值班员	各	册
中国水利出版社编辑部	各	册
北京市兴林印刷厂	各	册
787mm×1092mm 16开本 32.75印张 412字	各	册
2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷	各	册
0001—3000册	各	册



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

水利部直属·教育部主管

## 内 容 提 要

本书分三篇共十四章。第一篇以电气运行的实际需要为原则,介绍了电路基本定律、电磁感应、单相交流电路、三相对称及非对称电路、中性点接地方式、整流滤波电路等电气运行必备的基础知识;第二篇以电气设备为主线,逐一介绍了变压器、电动机、发电机、高压和低压开关等设备的原理、运行、保护与事故处理;第三篇以电气一次系统为线索,系统地介绍了典型机组电气主接线、厂用电接线的结构特点、运行方式,发电机—变压器组和高、低压厂用电系统的测量、控制、保护与信号回路,单元机组的电气倒闸操作。

本书可供从事单元机组集控运行的热动、集控专业运行人员查阅、使用,是集控值班员的培训教材,也可供大中专院校集控专业学生学习、参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

单元机组电气运行/林文孚编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

(单元机组集控值班员系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5084 - 4275 - 4

I. 单... II. 林... III. 火电厂—单元机组—电力系统运行—教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 145268 号

书 名	单元机组集控值班员系列教材 <b>单元机组电气运行</b>
作 者	林文孚 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (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
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 35.75 印张 848 千字
版 次	2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	<b>68.00 元</b>

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

随着电力工业的技术进步和电力企业内部改革的深化，火电厂单元机组炉、机、电岗位运行模式逐渐被全能（集控）值班员模式所取代，已成为不可逆转的趋势。做一个合格的全能值班员，这无论是对发电厂集控运行专业的学生，还是对已在岗的单元机组运行人员，都是极大的挑战。培养能适应机、炉、电集控运行的全能值班员是当前电力职业技术职前教育和职后技术培训的重要课题。作为一名电力职业技术教育工作者，多年来的集控值班员培训实践使作者认识到：动力类专业运行人员要掌握好集控岗位必需的电气运行知识，必须“经济”地学电。这意味着要有别于电气检修和变电运行，要根据集控运行岗位对电气运行的基本知识与技能的要求，以“够用”为原则，经过精心挑选和设计，有选择地学习本岗位必需的电专业基础知识与专业知识。然而，在电专业各类教材“浩瀚”的知识海洋里，“寻找”集控运行必需的电的知识，对机炉运行人员来说，也是一个难题。于是，作者萌发了写这本书的念头。本书是为从事单元机组集控运行的热动、集控专业运行人员和正在集控专业学习的学生编写的。

本书分三篇共十四章。第一篇以电气运行的实际需要为原则，介绍了电路基本定律、电磁感应、单相交流电路、三相对称及非对称电路、中性点接地方式、整流滤波电路等电气运行必备的基础知识；第二篇以电气设备为主线，逐一介绍了变压器、电动机、发电机、高低压开关等设备的原理、运行、保护和事故处理；第三篇以电气一次系统为线索，系统介绍了典型机组电气主接线、厂用电接线的结构特点、运行方式，发电机—变压器组和高低压厂用电系统的测量、控制、保护与信号回路，单元机组的电气倒闸操作。本书具有如下特点：

(1) 根据单元机组电气运行的实际需要，以“够用”为原则，对电专业的基础课程、专业课程和培训教材的内容进行精选，不仅从电工、电子基础、电机学、电气设备及运行到继电保护，比较系统、完整地介绍了单元机组电气运行基本内容，还以典型机组为背景，结合实际工程图，系统地介绍了发电机—变压器组与厂用电的测量、控制、保护与信号回路。为读者系统地学习和掌握单元机组电气运行知识提供了极大方便。

(2) 打破现有的教材体系，将电机学的基本理论和电气运行在教材体系中结合起来，力求用电机学的基本理论分析、解释电气运行的实际问题，突出物理概念，密切联系电气运行实际，简化数学推导，重点突出、难点分散、深入浅出、循序渐进，概念清楚，易于自学。

(3) 利用独特的“联系信号”，清楚标明二次图测量、控制、保护、信号之间的传递关系，解决了初学者看二次图找触点难的难题，能帮助读者从系统的、整体的角度完整地把握保护与控制回路、局部回路与整个系统的作用与相互关系。

(4) 用运行人员的视野看待电气运行的基础知识，尽可能早地将电工等基础知识与电气运行结合起来，在基础知识的介绍中“看到”它在“电气运行”中应用的“影子”，在运行分析中又不忘知识点在“基础”中的位置，前后呼应，便于阅读。

(5) 控制与保护取材于典型机组的工程图纸，具有很强的针对性和适用性。

下面简要介绍各章的主要内容、重点和难点，读者在阅读各章之前和之后，请务必阅读下面的说明，如果读者对下列有关章节的说明一看就明白，就可以越过该章读后面的内容。

**第一章直流电路** 复习了电流、电压和电势的基本概念和欧姆定律，电路的开路、短路与负载等三种状态，以及电阻串、并联电路的计算。介绍了基尔霍夫定律，引进了电压源、电流源，电压、电流的参考方向等重要的基本概念，并在此基础上讨论支路电流法和节点电压法等电路的基本分析方法，以及叠加原理、戴维南定理等线性电路的基本定理。直流电路是交流电路分析的基础，本章介绍的基本概念和分析方法，后续章节会经常用到。

**第二章磁场与电磁感应** 主要介绍了磁场、磁力线、导磁系数、磁感应强度、磁路和电磁感应、自感、互感、同名端等基本概念。磁场是电流产生的，变动的磁场要引起感应电势。动电可以生磁，动磁也可以生电，电与磁是电磁场这个矛盾统一体的两个方面。磁路、磁阻与磁饱和、楞次定律与感应电势、电流及其正方向、同名端等基本概念贯穿于整个电机与电气设备原理与运行之中，内容不难，但非常重要。读者应对上述概念有比较清晰的认识。

在线圈中放入铁心，可极大地提高励磁电流的“效率”，使用高导磁率的铁心，可以减小电机的尺寸、提高电机的效率，这使得磁路与电路在电机中密不可分，加之铁心导磁率的非线性，使电机理论较为复杂。从电气运行的



角度，只需利用其线性特性将磁路转化成电路，进行分析计算，并能理解其非线性特性对电磁过程的影响即可。磁铁的导磁性能越好，磁路磁阻越小，建立一定磁感应强度的磁场需要的励磁电流越小，反映在电路上，就是线圈的电感越大。这些，可在后续电机内容的学习过程中，反复认识、反复体会。

**第三章单相正弦交流电路** 主要内容有正弦量的三要素即频率、振幅、初相角；正弦量的有效值；正弦量的相量表示法；电阻、电感、电容及其电流、电压关系；阻抗、阻抗角、阻抗三角形及有功功率、无功功率、功率因数；电路谐振的条件与特点；以及电路暂态过程的基本概念。上述基本概念是交流电路分析的基础，相位及相位差、电压三角形、阻抗三角形、功率三角形的表示与相互关系以及电路的感性、容性、谐振三种性质，尤为重要；相量图是交流电路分析的重要方法，是电气运行分析的基本工具，只有同频率的正弦量才能利用相量进行运算；暂态过程的概念，特别是 $R$ 、 $L$ 电流与正弦交流电源接通时的过渡过程为电机暂态和故障分析奠定了必要的基础（因为电机的绕组都是由具有一定电阻的线圈组成的），这部分内容是本章的难点，应以理解微分方程解的物理意义为主。

**第四章三相交流电路** 主要内容有对称三相电路在星形和三角形接法下线电压、线电流与相电压、相电流之间的关系；对称三相电路的分析计算及三相功率；不对称三相电路的概念，不对称电路的基本分析方法—对称分量法的基本概念和中性点直接接地系统单相接地、两相接地、相间短路故障分析的基本方法；电力系统中性点运行方式及其特点；对称三相电路的高次谐波。对称三相电路的分析计算是电气运行分析的基本方法，是第三章内容的延伸和扩充，是本章的重点；对称分量法是电力系统故障分析的基本方法，是本章的难点、也是本书的重点之一。通过短路计算过程分析，应着重理解正序分量、负序分量和零序分量的基本概念和特点，及故障类型与各序电流之间的关系，不对称短路必然存在负序分量、接地短路就有零序分量，重点在于理解这些概念而非短路计算本身。应在理解中线作用的基础上，认识中性点不接地系统的特点、单相接地时相电压、相对地电压与线电压之间的关系，理解消弧线圈的补偿作用。非正弦周期量可用与它同频率的基波分量和高次谐波的组合来表示，特别要注意三次谐波的零序性质，以及三次谐波电压、电流在三相电路中的分布特点。学习本章后几节的内容，有一个循序渐进、多次反复的过程，读者可在初步掌握基本概念的基础上，学习第二篇，并在第二篇的学习过程中，结合相关内容反过来重复学习这部分内容，以逐步加深理解和认识。

**第五章电子电路初步** 主要介绍了基本的模拟电子电路和数字电子电路元件，晶体管放大、整流滤波电路的基本原理。本章的重点是理解二极管及可控硅整流滤波电路的工作原理，以作为学习发电机励磁系统和有关保护原理的基础。

**第六章发电厂电气设备概述** 主要介绍了本篇涉及的发电厂一、二次设备的作用及其图形符号，并简要介绍了继电保护的作用、基本原理与要求，为以后各章的介绍作必要的准备。

**第七章变压器** 主要讨论了变压器的工作原理，包括变压器的基本方程、等值电路和相量图、短路阻抗；三相变压器绕组的连接方式及其影响，连接组别；变压器并联运行的条件，变压器的空载投入和突然短路，变压器的允许温度与允许温升、变压器的过负荷与不对称运行；变压器的差动保护、过流保护和接地保护；变压器运行监视、操作和常见故障的处理。变压器的工作原理是本章的重点，是学习电动机、发电机的基础。对漏阻抗、激磁阻抗、短路阻抗的概念应有较明确的认识，尤其是简化等值电路及其相量图，它是变压器运行特性、变压器并联运行和暂态分析的基础。三相变压器特别要注意绕组的极性、连接组别在变压器运行中的重要性。变压器的突然短路分析应熟悉短路的特点与危害性，而空载合闸的励磁涌流是变压器差动保护必须考虑的因素。三相变压器差动保护的原理，主要是理解连接组别对电流相位的影响，对变压器主保护和后备保护的基本原理和保护范围，要有明确的认识。变压器的各种异常和故障，共同特点是故障部件的发热和变压器油的劣化，并可能伴随有声音的变化，所以变压器油温、油位和声音是变压器运行监视的重点。变压器事故处理的重点是准确判断故障的部位，实现故障点与系统的隔离（以便正常部分继续运行），同时尽可能减少停电范围，如投入备用变压器，并保证厂用电的正常运行。

**第八章异步电机** 主要讨论了异步电动机的工作原理与工作特性，电动机的启动、运行，电动机保护与事故处理。对称三相电流在对称三相绕组中产生同步旋转磁场，不仅是电动机原理分析中的重要概念，也是研究同步发电机运行原理的重要基础。对旋转磁场的转速、转向与定子电流的频率、相序之间的关系，应有清晰的认识。对电动机工作原理的理解要比较电动机与变压器的异同，对电动机工作特性的认识要明确电动机的启动特点与要求，了解电动机非正常运行、特别是断相运行的危害，并熟悉电动机事故处理的一般方法。

**第九章同步发电机** 内容可分为三个部分。第一部分（一～三节）介绍



典型断路器的灭弧原理与结构特点、互感器的接线及其运行是本章的重点。从电气运行的角度，主要是弄清控制回路、操动机构与断路器分、合闸的关系，以便于查找开关误动、拒动的电气和机械方面的原因。互感器是一、二次设备之间的桥梁，是控制系统和运行人员的“眼睛”。断路器、互感器故障及其对系统运行的影响，应予以重视。有关内容，在学习了第三篇中的“二次回路”后，再回头看看，会更明白。

由于兆欧表在电气运行中使用较多，故作为本篇附录，介绍了其测量原理和使用方法。

**第十一章电气设备控制基础** 主要介绍了单元机组电气主接线及厂用电接线的形式和特点、断路器控制回路、机组声光信号回路、操作电源、直流系统监察等。本章为介绍机组电气设备控制作了必要的准备。以下几章将以本章介绍的电气主接线和厂用电系统为对象，讨论电气设备与系统的测量、控制、保护与信号回路。

**第十二章厂用电系统控制与保护** 主要介绍高、低压厂用电系统的测量、控制、保护与信号回路，包括6kV、380V工作、备用电源的控制，电压互感器控制回路，工作电源与备用电源的切换，以及厂用电动机的控制。

**第十三章发电机—变压器组控制与保护** 主要介绍发电机自动同期、发电机—变压器组出口断路器与隔离开关的控制，主变冷却器控制回路；发电机励磁系统冷却风机控制，磁场开关和灭磁开关控制；发电机—变压器组的保护配置、保护范围、保护出口方式与出口逻辑，以及单元机组连所等。

分析二次回路的原理，首先要熟悉二次回路控制的对象以及它的测量元件、保护配置，再从交流回路到直流回路，逐步弄清其控制原理。在分析过程中要特别注意各开关触点的状态、注意交流回路与直流回路、保护回路与控制回路以及相关图纸之间的联系信号。这部分重点要弄清的内容有：380V系统工作电源的保护与控制、备用电源的自动投入；6kV系统工作电源和备用电源的控制与切换；电压互感器的控制与马达低电压保护；发变组与励磁系统控制、发变组保护的功能、保护范围与出口方式，以及发变组保护与控制之间的信号传递关系。要特别注意系统间的联系，力求形成整体概念。

**第十四章发电机组电气设备倒闸操作** 主要介绍发电机组的并、解列操作与厂用电系统主要倒闸操作。对电气设备进行有效的维护、在正常和事故状态正确地进行电气设备的倒闸操作，是单元机组运行人员的基本职责，也是讨论电气运行的落脚点。故本章内容是对电气运行知识的综合运用。本章还介绍了误操作实例，是对正常倒闸操作的补充，意在开阔运行人员的视野，

同步发电机的原理。主要内容有：隐极式同步发电机的基本结构、电枢反应、基本方程、等值电路和相量图；同步发电机的运行特性、功角特性和有功功率、无功功率调节等。电枢反应和相量图是这部分内容的难点，电枢反应、等值电路及其相量图、功角特性和功率调节是这部分内容的重点。转子电流的磁场在空间旋转，切割定子绕组而形成定子三相对称电势和电流；定子三相电流又在空间形成与转子磁场同步旋转的电枢磁场，切割定子绕组而产生电枢反应电势（注意正常运行时定子电枢磁场因同步而不切割转子绕组）。由同步电抗和负载阻抗决定的电枢反应的性质决定了同步发电机的运行特性。从电路的观点看，空载电势  $E_0$  是在转子励磁电流作用下的开路电势，电枢反应电势  $E_a$  是发电机内阻抗压降。简化等值电路和相量图是发电机运行分析的基本工具，由此导出的功角特性是发电机静态稳定和暂态稳定分析的基础，而无功特性和 V 形曲线为发电机励磁调节提供了理论依据。

第二部分（四～六节）介绍同步发电机正常运行控制与调节。主要内容有：发电机励磁系统的组成与作用、灭磁与过电压保护、自动励磁调节、同期控制与并列操作、发电机启动与正常运行等。励磁系统的调差特性与自动励磁调节的基本原理、同步仪表与同期控制是这部分内容的重点。正调差特性的实质是用无功电流去限制无功功率输出，以实现并列运行机组无功功率的稳定分配；理想的同期就是使发电机电压相量和系统电压相量完全重合（大小、频率、相位均相等），并列时在发电机出口断路器两端之间无电压差；发电机安全极限和正常运行方式都是第一部分发电机基本原理的应用。

第三部分（七～八节）介绍同步发电机的非正常运行与事故处理。主要内容有：发电机的非对称短路（稳态）、突然短路（暂态）过程及其影响，发电机差动、匝间短路、定子接地等保护的基本原理与发电机事故处理。稳态和暂态是相对的，当定子磁势和转子磁势在空间相对静止时，发电机处于稳态；当定子磁势或转子磁势的幅值发生变化、定子磁势和转子磁势在空间有相对运动时，发电机处于暂态。由于暂态过程中定子磁场切割转子绕组，相当于变压器二次侧短路，故会产生很大的电流。突然短路是本章的难点之一，认识突然短路，关键是要理解定子电流的突变导致电枢反应磁场与转子绕组的相对运动。发电机保护是本章的重点，应理解各保护的基本原理和保护范围，发电机典型事故的现象、原因及处理原则也是应理解和掌握的。

**第十章发电厂电气设备** 主要介绍了绝缘子、母线、隔离开关、高、低压开关、互感器等电气设备的基本结构、原理与运行的知识；母线差动保护与断路器失灵保护；本章还介绍了过电压保护与接地装置的基本知识。几种

读者可从实例中进一步认识误操作与事故产生的原因及危害，思考防止误操作与事故的措施。

在多年的培训教学过程中，作者十分关注电气运行类的各种图书，也看过一些实用性、针对性很强的电气运行技术问答。这类书籍中对一些问题的解答，对动力类专业读者来说，往往可能是一知半解，只好强记结论，因此很容易忘记，更难于综合运用。作者认为，这主要是因读者缺乏必要的基础知识，难于融会贯通。所以，希望成为“内行”的读者，还是要下一番苦功，读一点基础。本书中隐含有两条线：一是“原理—运行的基本概念线”；二是“设备—系统线”。第二篇以基本概念线为主，电机基本方程式、等值电路和相量图是这条线的核心，应着力弄清其表达的物理意义，并能指导运行分析。有些数学分析过程，是为了说明概念的需要而引入的，便于读者了解某些结论的由来，读者学习的重点是理解这些结论，学会用这些结论来分析电气运行的有关问题。第三篇以设备—系统线为主，应着重理解运行人员与一、二次设备之间的关系，各系统测量、保护与控制信号之间的关系以及系统间的联系。

本书由武汉电力职业技术学院副教授、高级工程师林文孚编著。武汉电力职业技术学院高级工程师廖自强任主审，他对本书稿进行了深入细致的审查，提出了许多宝贵的修改意见，作者对廖自强同志的辛勤劳动表示最真挚的感谢。荆门热电厂运行技师舒忠虎、汉川电厂运行技师胡亚军、荆门热电厂600MW机组运行值班员阎德志、郑志清、张启平、陈绍龙等同志，认真阅读了本书稿，并提出了宝贵意见，本书稿也同时得到了武汉电力职业技术学院仿真中心全体同仁的热情支持和帮助，作者在此一并对他们表示衷心感谢。

由于作者学识水平有限，书中缺点和谬误在所难免，恳请读者批评指正（E-mail: lwf\_hbfz@163.com）。

作者

2007.1

# 目 录

前言

## 第一篇 电气运行的基础知识

<b>第一章 直流电路</b> .....	1
第一节 电路.....	1
第二节 欧姆定律与电路的工作特性.....	4
第三节 串、并联电路.....	9
第四节 基尔霍夫定律.....	12
第五节 复杂电路的分析方法.....	16
习题与思考题.....	24
<b>第二章 磁场与电磁感应</b> .....	26
第一节 磁场.....	26
第二节 电磁感应.....	34
习题与思考题.....	44
<b>第三章 单相正弦交流电路</b> .....	46
第一节 单相正弦交流电的概念.....	46
第二节 交流电的相量表示法.....	52
第三节 纯电阻、电感、电容电路.....	56
第四节 电阻、电感、电容串联电路.....	65
第五节 电路的谐振.....	72
第六节 功率因数的提高.....	76
第七节 一阶电路的暂态过程.....	78
习题与思考题.....	84
<b>第四章 三相交流电路</b> .....	86
第一节 三相交流电路.....	86
第二节 三相电路的分析计算.....	94
第三节 对称分量法及其应用.....	103
第四节 电力系统中性点接地运行方式.....	116
第五节 三相电路中的高次谐波.....	121
习题与思考题.....	125

<b>第五章 电子电路初步</b> .....	126
第一节 基本电子器件.....	126
第二节 基本电子电路.....	133
习题与思考题.....	146

## 第二篇 电气设备及运行

<b>第六章 发电厂电气设备概述</b> .....	147
第一节 电气设备的作用与分类.....	147
第二节 继电保护概述.....	150
习题与思考题.....	155
<b>第七章 变压器</b> .....	156
第一节 变压器的基本知识.....	156
第二节 变压器的运行原理.....	160
第三节 三相变压器.....	178
第四节 变压器的运行.....	188
第五节 变压器的操作与事故处理.....	200
习题与思考题.....	215
<b>第八章 异步电机</b> .....	216
第一节 异步电动机的基本工作原理和结构.....	216
第二节 三相异步电动机的运行原理及工作特性.....	220
第三节 三相异步电动机的运行与事故处理.....	233
习题与思考题.....	243
<b>第九章 同步发电机</b> .....	244
第一节 汽轮发电机的基本结构.....	244
第二节 同步发电机的运行原理.....	247
第三节 同步发电机的功率调节.....	260
第四节 同步发电机的励磁系统.....	277
第五节 发电机组的同期并列.....	298
第六节 同步发电机的正常运行.....	310
第七节 同步发电机的非正常运行.....	319
第八节 同步发电机保护与事故处理.....	329
习题与思考题.....	346
<b>第十章 发电厂电气设备</b> .....	348
第一节 绝缘子、隔离开关和母线.....	348
第二节 高压断路器.....	358

第三节	低压电器	378
第四节	互感器	384
第五节	过电压保护设备与接地装置	396
附录:	兆欧表的原理与使用	402
	习题与思考题	404

### 第三篇 发电机组控制

<b>第十一章</b>	<b>电气设备控制基础</b>	406
第一节	电气主接线	406
第二节	厂用电系统接线	409
第三节	发电机组电气设备控制与信号回路	414
第四节	操作电源	422
	习题与思考题	431
<b>第十二章</b>	<b>厂用电系统控制与保护</b>	433
第一节	380V 厂用电系统控制与保护	433
第二节	6kV 厂用电系统控制与保护	454
第三节	厂用电电动机的控制与保护	475
	习题与思考题	486
<b>第十三章</b>	<b>发电机—变压器组控制与保护</b>	487
第一节	发变组的自动同期控制	487
第二节	发电机变压器组测量与控制回路	495
第三节	发电机变压器组保护	516
	习题与思考题	534
<b>第十四章</b>	<b>发电机组电气设备倒闸操作</b>	536
第一节	倒闸操作的一般要求	536
第二节	发变组并、解列操作	541
第三节	厂用电系统操作	546
	习题与思考题	556
<b>参考文献</b>		557

# 第一篇 电气运行的基础知识

## 第一章 直流电路

在工农业生产和日常生活中遇到的各种用电设备，都是靠电流的作用而工作的。电流是在电路中产生的。直流电路通常是比较简单的电路，也是研究各种复杂电路的基础。直流电流的有关概念同样适用于交流电路，简单电路的分析方法也可以推广到复杂电路，这是我们学习直流电路的主要目的。此外，电气设备的操作回路也大多采用直流电路。

### 第一节 电 路

#### 一、电路的组成

电路是电流的通路，图 1-1 是一个简单电路，它由以下四部分组成：

(1) 电源  $E$ 。电源是供给电能的。电源的能量是由其他形式的能量转换而来的，例如，电池中的电能是由化学能转换来的，火力发电厂输出的电能是由机械能转换来的，而机械能则是由燃料的化学能转换来的。

(2) 负载  $R$ 。负载指各种用电设备，也称为用电器，如电灯、电炉、电动机等。电源供给的电能通过负载转换为其他形式的能。例如，在灯泡中电能转换为光能和热能；在电炉中电能转换为热能；在电动机中电能转换为机械能。

(3) 导线  $l$ 。导线用来将电源和负载连成通路，达到传导电流的目的。常用导线一般由铜或铝制成。

(4) 开关  $S$ 。根据负载需要，对电路进行控制，如合闸接通电路，分闸断开电路。

电路的形式是多种多样的，电力系统是最典型的例子。发电机是电源，它把热能、水能或核能转换成电能。分布于家庭、企事业单位的各种电灯、电机（电器）是负载。通过电力网将各种电源的电能汇集起来，分配、输送到千家万户，所形成的电路就是电力系统。

#### 二、电流

用导线将电源、负载连接起来，再合上开关使电路闭合，电路里就有电流通过。电流是电荷有规则的运动。在电源中具有一种推动电荷运动的原动力，称为电源力。对于电池来说，这种电源力就是化学力；对于发电机来说就是电磁力。在电源的内部，电源力把正电荷由负极推向正极。同时，由于两极正负电荷的聚集，在两极间建立了电场。当电路闭

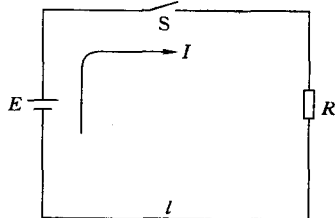


图 1-1 电路的组成



合起来时，在外电路也建立了电场，在电场力的作用下，正电荷由电源的正极经过负载流向电源的负极。这种电荷有规则的运动，就形成了电流。

电路中电流的大小可以用电流强度来表示。电流强度是以单位时间通过电路某一截面的电量来衡量的，即

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

式中： $I$ 为电流强度，单位为安[培](A)； $q$ 为电量，单位为库[仑](C)，1库仑相当 $6.24 \times 10^{18}$ 个电子带的电量； $t$ 为时间，单位为秒(s)，因此

$$1\text{A} = 1\text{C/s}$$

电流强度的单位还有：1千安(kA) =  $10^3$ 安(A)；1毫安(mA) =  $10^{-3}$ 安(A)。

在电路中，规定正电荷流动的方向作为电流的方向，它与电场力的方向是一致的。而电源力在电源内部，是由负极指向正极的。但应当指出，在金属导体里导电的是自由电子，它带负电，因此它的移动方向正好与规定的电流方向相反。

### 三、电动势、电压和电位

#### (一) 电动势

电源力推动电荷运动的过程，也就是电源力做功的过程。电源力把单位正电荷由负极推向正极所做的功，表明了电源推动电荷运动的本领，称为电源的电动势，简称为电势，用字符  $E$  表示，则

$$E = \frac{A}{q} \quad (1-2)$$

如果功  $A$  的单位为焦[耳](J)，电荷  $q$  的单位为库仑(C)，则电势的单位为伏[特](V)，即

$$1\text{V} = 1\text{J/C}$$

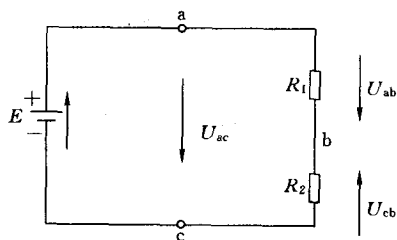


图 1-2 电势与电压的方向

电势的方向与电源力的方向一致，即由电源负极指向电源正极，如图 1-2 中电源  $E$  右侧的箭头所示。

#### (二) 电压和电位

由于电源正、负极集聚着正、负电荷，因此它不仅在电源内部建立电场，当外电路接通时，也在外电路中建立电场。从能量的角度来讲，电场力推动电路中电荷移动的过程就是电场力做功的过程。把电场力将单位正电荷沿电路由  $a$  点推向  $b$  点所做的功称为  $a$ 、 $b$  两点间的电压。推动单位正电荷做的功越多， $a$ 、 $b$  两点间的电压就越高；反之，做的功越小，电压越低。由此可见，电路中的电压表明了电场力推动电荷的能力。 $a$ 、 $b$  两点间的电压用符号  $U_{ab}$  表示

$$U_{ab} = \frac{A}{q} \quad (\text{V}) \quad (1-3)$$

电压的单位为 V。如果电场力在两点之间推动 1C 的电荷做的功为 1J 的话，则这两点间的电压就是 1V。电压较大的单位有千伏(kV)，较小的单位有毫伏(mV)。

1 千伏 (kV) =  $10^3$  伏 (V); 1 毫伏 (mV) =  $10^{-3}$  伏 (V)

物体在空间每一点都有一定的位能, 在空间某一点位能的高低是相对的, 与所取的参考点有关。电荷  $q$  在电路中某点的电位能高低也是相对的, 与所取的电位能零点 (称为参考点) 有关。用  $\varphi_a$  表示单位正电荷在电路中 a 点具有的电位能, 称位电位, 其值等于 a 点与参考点之间的电压。用  $\varphi_b$  表示单位正电荷在电路中 b 点具有的电位能, 其值等于 b 点与参考点之间的电压。那么, 电路中 a、b 两点间的电压就是这两点的电位差, 如图 1-2 所示, 即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-4)$$

电压  $U_{ab}$  是电路中 a、b 两点的电位差。如果选 b 点为参考点, 则

$$\varphi_b = 0, U_{ab} = \varphi_a$$

故电位实际上也是电压, 是对参考点的电压。所以, 电位的单位就是电压的单位, 即 V。

如前所述, 电势的方向就是电源力的方向, 是由负极指向正极的, 如图 1-2 所示, 可见, 电势的方向是从低电位到高电位的。电路中电压的方向与电场力方向一致, 即与外电路中电流的方向一致, 是从高电位到低电位的。所以, 电源电势的方向与其两端电压的方向正好相反。如图 1-2 所示, 电势  $E$  的方向与电压  $U_{ac}$  的大小相等, 方向相反。

**【例 1-1】** 在电路 (图 1-2) 中 a、b、c 三点的电位分别为  $\varphi_a = 6\text{V}$ ,  $\varphi_b = 3\text{V}$ ,  $\varphi_c = 0\text{V}$ , 求电压  $U_{ab}$ ,  $U_{cb}$ ,  $U_{ac}$ 。

解:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 6 - 3 = 3 \text{ (V)}$$

$$U_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = 0 - 3 = -3 \text{ (V)}$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 6 - 0 = 6 \text{ (V)}$$

由此可见, 电压  $U_{ab}$  的方向是由高电位到低电位的, 其值为正; 电压  $U_{cb}$  是由低电位到高电位的方向, 其值为负。而  $U_{ac} = \varphi_a$ , 即某点与零电位点间的电压就是这一点的电位。在参考点明确的情况下, 可以将电压符号的下标省略。如图 1-2 中  $U_{ac}$  指整个电路的电压, 也可将  $U_{ac}$  简记为  $U$ 。

#### 四、导体的电阻

一般物质按导电性能可分为导体、半导体和绝缘体。导体的导电具有两重性, 它既有导电的一面, 也有阻碍电流的一面。拿金属导体来说, 之所以导电, 是因为其中有自由电子; 之所以对电流有阻碍, 是因为自由电子在移动的过程中要同金属的原子 (或分子) 发生碰撞, 使电子移动受到阻碍, 导体就表现出一定的电阻。

##### (一) 导体的电阻

由于导体存在电阻, 电流通过它就要受到一定限制。作为传导电流的导线, 要求它的电阻要小一些, 但是对于一些用电设备, 例如电灯、电烙铁、电炉等, 又要使它具有一定的电阻, 这样才能达到用电的目的。在实际工作中还会遇到用来限制或调节电流而特意做的电阻元件和可变电阻器。

电阻的单位是欧 [姆] ( $\Omega$ )。有时在计量较大的电阻时还会用到千欧 ( $k\Omega$ ) 和兆欧 ( $M\Omega$ )。