

实验快堆系列丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 快堆电气系统与设备

徐 銖 主编

唐基本 马建明 等编著

中国原子能出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国实验快堆系列丛书

# 快堆电气系统与设备

徐 铎 主编

唐基本 马建明 等编著

中国原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

快堆电气系统与设备 / 唐基本, 马建明等编著. —北京: 中国原子能出版社, 2011. 3

(中国实验快堆系列丛书 / 徐铎主编)

ISBN 978-7-5022-5189-5

I. ①快… II. ①唐…②马… III. ①快堆—电气系统②快堆—电气设备 IV. ①TL43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037067 号

## 内 容 简 介

本书是根据《中国实验快堆基础理论培训教材》中的电气系统与设备教材大纲编写的, 在介绍通用电气系统和设备的基本原理的基础上, 增加了压水堆和快堆电气系统和设备的特点, 便于读者理解和掌握二者之间的区别。在内容的选择和安排上, 尽量避开理论知识偏多、偏难、偏深的倾向, 对基本理论和概念的介绍力求做到实用、够用, 使读者对核电站的电气系统与设备有较全面的了解和认识。

本书既可作为快堆核电站非电气专业的运行、维护及管理培训教材, 也可作为电气相关专业的参考书。

## 快堆电气系统与设备

---

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 王 青

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 13.25 字 数 328 千字

版 次 2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5189-5 定 价 55.00 元

---

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

# 总 序

为了裂变核能的可持续应用,我国的基本战略是压水堆—快堆的匹配发展。快中子堆(简称快堆)是主要以平均中子能量比压水堆的热中子高百万倍的  $0.08\sim 0.1$  MeV 的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是,快堆核电站运行时,新产生的易裂变核燃料钚多于消耗掉的钚,即增殖比大于 1,易裂变核燃料得到增殖,因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变且天然丰度占 99.2% 以上的铀-238。快堆的乏燃料经后处理,钚返回堆内再烧,多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并无限次循环则对铀资源的利用率可从单单发展压水堆的 1% 左右提高到 60%~70%。由于利用率的提高,更贫的铀矿也值得开采,这样世界可采铀资源将增千倍。

在热中子反应堆运行时,会产生长寿命次量锕系核素(MA),其产量约为所产工业钚的 1/10。锕系核素需要衰变三四百万年才能将其放射性毒性降到天然铀的水平。但这些核素在快中子场中可以裂变成一般裂变产物,因此,可用快中子焚烧堆将它们裂变掉,获得裂变能,达到变害为利,减少地质贮存的环境风险。

世界上快堆技术的发展已超过半个世纪,发展增殖快堆最适合的冷却剂是液态金属钠,这是所有快堆国家审慎选择的结果。

钠冷快堆是当前唯一现实的增殖堆,在闭式核燃料循环的支持下,可使我国核能实现长期可持续地安全供应。

钠冷快堆在我国是全新的核电工程。前核工业部 20 世纪 60 年代中后期开始组织钠冷快堆技术的基础研究,1986 年快堆技术发展纳入国家“八六三”高技术计划后,1988—1993 年进行了以实验快堆为目标的应用基础研究,1992 年 3 月国务院批准了建造 65 MW 热功率 20 MW 电功率实验快堆的目标,该堆于 2000 年开始建造。

在核工业研究生部的组织下,我们聘请了从事中国实验快堆设计及有丰富专业知识和经验的各专业专家编写了这部中国实验快堆系列丛书,包括如下 14 篇:

- 1 快堆概论
- 2 快堆物理基础
- 3 快堆热工流体力学

- 4 快堆本体及燃料操作系统
- 5 快堆主热传输系统及辅助系统
- 6 钠工艺基础
- 7 快堆蒸汽动力转换系统
- 8 快堆控制与保护
- 9 快堆电气系统与设备
- 10 快堆辐射防护
- 11 快堆材料
- 12 快堆通用机械设备
- 13 快堆安全分析
- 14 快堆运行

各篇编者多从本专业物理原理、尤其是从钠冷快堆独有的特征出发,结合中国实验快堆的设计成果深入浅出地编写成册,因此既适于大学本科毕业的主控室操纵人员培训也适于快堆高级管理人员学习快堆知识,也可供一般操作人员培训参考。

我国快堆工程分三步发展,各阶段目标具有主要技术选择的一致性。本丛书针对性强,因此对新参与我国后续的示范快堆和大型高增殖快堆的设计者们也是一种实用的入门教材。

这是我国钠冷快堆首部运行操作人员的培训丛书,由于经验不足,疏漏和错误在所难免,敬请各位专家、使用者们不吝指正。

徐 纯

2011年1月3日

# 前 言

本书介绍了快堆电气系统与设备技术基础。

本书主要分为电气系统和设备两大部分,共 11 章。第 1 章介绍了电气基础知识,概括的介绍介绍了电路和磁路的基本物理量和基本定律,以及如何识别电气接线图。第 2 章介绍了电气系统主接线,叙述了电气主接线的基本概念、要求和类型。第 3 章结合大亚湾核电站厂用电系统和快堆厂用电系统详细地分析了核电厂厂用电系统功能、设计准则及接线。第 4 章主要讲述了开关电器的原理、性能及配电装置的组成。第 5、6 章主要讲述了直流系统和不间断电源的原理、作用及组成。第 7 章主要叙述了变压器的主要结构部件性能、原理及运行特性。第 8、9 章详细地介绍了发电机及其励磁系统的原理、结构、功能及特点。第 10 章主要介绍了交直流电动机的原理及工作特性。第 11 章主要介绍了发电厂电气设备继电保护的原理、功能及保护配置。

本书的编写尽量避开理论知识偏多、偏难、偏深的倾向,对基本理论和概念的介绍力求做到实用、够用。本书在各章内容安排上,首先介绍通用的电气基础内容,然后结合大亚湾核电站的有关资料,介绍大亚湾核电站的电气系统与设备,最后结合快堆电气系统的具体实际设计,讲解快堆电气系统是如何满足工艺要求和反应堆的安全要求。在这里还要强调的是,本书中有关核电厂和快堆的篇幅并不是很多,但它却很重要。

本书具体编写分工为:唐基本编写第 1 章、第 5 章、第 6 章;马建明编写第 2 章、第 3 章、第 9 章;马建明、陈建东编写第 4 章、第 7 章;谢海昕编写第 8 章;董升国编写第 10 章;吕宁编写第 11 章;王新宇提供了电加热系统相关资料。全书由唐基本主审,马建明统稿。由于编写人员水平有限,书中难免存在一些不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月

# 目 录

|                        |        |
|------------------------|--------|
| <b>第 1 章 电气基础知识</b>    | ( 1 )  |
| 1.1 电路的基本概念            | ( 1 )  |
| 1.1.1 电路的基本组成          | ( 1 )  |
| 1.1.2 关于电路的物理量         | ( 1 )  |
| 1.1.3 关于正弦交流电的基本概念     | ( 2 )  |
| 1.2 电路的基本定律            | ( 7 )  |
| 1.2.1 基尔霍夫电流定律(节点电流定律) | ( 8 )  |
| 1.2.2 基尔霍夫电压定律(回路电压定律) | ( 8 )  |
| 1.3 磁路的主要物理量           | ( 9 )  |
| 1.4 磁路的基本定律            | ( 10 ) |
| 1.4.1 安培力定律            | ( 10 ) |
| 1.4.2 楞次定律             | ( 10 ) |
| 1.4.3 电磁感应定律           | ( 11 ) |
| 1.5 电气接线图的识别           | ( 11 ) |
| 1.5.1 一、二次回路及设备        | ( 11 ) |
| 1.5.2 电气一次接线图          | ( 12 ) |
| 1.5.3 电气二次接线图          | ( 13 ) |
| 1.5.4 看二次接线图的方法        | ( 15 ) |
| <b>第 2 章 电气系统主接线</b>   | ( 17 ) |
| 2.1 电气主接线概述            | ( 17 ) |
| 2.1.1 电气主接线图的有关概念      | ( 17 ) |
| 2.1.2 电气主接线的基本要求       | ( 18 ) |
| 2.2 电气主接线的基本接线形式       | ( 18 ) |
| 2.2.1 电气主接线的基本类型       | ( 18 ) |
| 2.2.2 电气主接线中开关电器的配置原则  | ( 19 ) |
| 2.2.3 有母线的电气主接线        | ( 19 ) |
| 2.3 核电厂电气系统主接线         | ( 27 ) |
| 2.3.1 400/500 kV 输变电系统 | ( 27 ) |
| 2.3.2 220 kV 辅助电源系统    | ( 28 ) |
| 2.4 中国实验快堆电气系统主接线      | ( 29 ) |
| <b>第 3 章 厂用电系统</b>     | ( 31 ) |
| 3.1 厂用电系统基本概念          | ( 31 ) |
| 3.1.1 厂用电率             | ( 31 ) |
| 3.1.2 厂用负荷分类           | ( 31 ) |

|                                            |        |
|--------------------------------------------|--------|
| 3.1.3 厂用电接线的基本要求 .....                     | ( 32 ) |
| 3.2 厂用电接线的设计原则和接线形式 .....                  | ( 32 ) |
| 3.2.1 厂用电供电电压等级的确定 .....                   | ( 32 ) |
| 3.2.2 厂用电供电电源及其引接方式 .....                  | ( 33 ) |
| 3.3 核电厂厂用电系统 .....                         | ( 34 ) |
| 3.3.1 厂用电系统功能 .....                        | ( 34 ) |
| 3.3.2 厂用电系统设计准则 .....                      | ( 34 ) |
| 3.3.3 厂用电设备分类 .....                        | ( 34 ) |
| 3.3.4 厂用电电压等级 .....                        | ( 34 ) |
| 3.3.5 厂用电供电电源 .....                        | ( 35 ) |
| 3.3.6 厂用电系统接线 .....                        | ( 35 ) |
| 3.3.7 厂用电系统运行 .....                        | ( 37 ) |
| 3.4 中国实验快堆厂用电系统 .....                      | ( 37 ) |
| 3.4.1 厂用电系统 .....                          | ( 37 ) |
| 3.4.2 厂用电系统设计准则 .....                      | ( 37 ) |
| 3.4.3 厂用电设备分类 .....                        | ( 38 ) |
| 3.4.4 厂用电电压等级 .....                        | ( 38 ) |
| 3.4.5 厂用电供电电源 .....                        | ( 38 ) |
| 3.4.6 厂用电系统接线 .....                        | ( 39 ) |
| 3.4.7 厂用电系统运行 .....                        | ( 41 ) |
| 3.4.8 核岛电加热系统 .....                        | ( 42 ) |
| <b>第 4 章 开关电器</b> .....                    | ( 45 ) |
| 4.1 开关电器的用途和分类 .....                       | ( 45 ) |
| 4.2 电弧的基本知识 .....                          | ( 45 ) |
| 4.2.1 电弧的形成 .....                          | ( 45 ) |
| 4.2.2 电弧的熄灭 .....                          | ( 46 ) |
| 4.3 高压断路器的基本知识 .....                       | ( 46 ) |
| 4.3.1 高压断路器的类型 .....                       | ( 47 ) |
| 4.3.2 高压断路器的基本结构 .....                     | ( 47 ) |
| 4.3.3 高压断路器的技术参数 .....                     | ( 47 ) |
| 4.3.4 高压断路器的型号含义 .....                     | ( 48 ) |
| 4.4 SF <sub>6</sub> 断路器 .....              | ( 49 ) |
| 4.4.1 SF <sub>6</sub> 气体的性能 .....          | ( 49 ) |
| 4.4.2 SF <sub>6</sub> 断路器的灭弧室结构及灭弧原理 ..... | ( 49 ) |
| 4.4.3 SF <sub>6</sub> 断路器的特点 .....         | ( 50 ) |
| 4.5 真空断路器 .....                            | ( 50 ) |
| 4.5.1 真空气体特性 .....                         | ( 50 ) |
| 4.5.2 真空断路器的灭弧室结构及灭弧原理 .....               | ( 51 ) |
| 4.5.3 真空断路器的操动机构 .....                     | ( 52 ) |

|              |                             |               |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| 4.6          | 高压隔离开关 .....                | ( 53 )        |
| 4.6.1        | 高压隔离开关的用途 .....             | ( 53 )        |
| 4.6.2        | 隔离开关基本要求 .....              | ( 53 )        |
| 4.6.3        | 高压隔离开关的种类和型式 .....          | ( 53 )        |
| 4.7          | 中国实验快堆高压电器 .....            | ( 55 )        |
| 4.7.1        | SF <sub>6</sub> 高压断路器 ..... | ( 55 )        |
| 4.7.2        | 真空断路器 .....                 | ( 56 )        |
| 4.7.3        | 隔离开关 .....                  | ( 56 )        |
| 4.8          | 低压开关电器 .....                | ( 56 )        |
| 4.8.1        | 低压断路器 .....                 | ( 56 )        |
| 4.8.2        | 接触器 .....                   | ( 57 )        |
| 4.8.3        | 热继电器 .....                  | ( 58 )        |
| 4.9          | 中国实验快堆低压开关电器 .....          | ( 59 )        |
| 4.9.1        | Masterpact MT .....         | ( 59 )        |
| 4.9.2        | Compact NS .....            | ( 59 )        |
| 4.10         | 高低压成套电器设备 .....             | ( 61 )        |
| 4.10.1       | 成套电器的特点 .....               | ( 61 )        |
| 4.10.2       | 低压开关柜 .....                 | ( 61 )        |
| 4.10.3       | 高压开关柜 .....                 | ( 62 )        |
| 4.10.4       | 中国实验快堆用高压开关柜 .....          | ( 63 )        |
| 4.11         | 可编程控制器(PLC) .....           | ( 65 )        |
| 4.11.1       | 可编程控制器的特点 .....             | ( 65 )        |
| 4.11.2       | 可编程控制器的基本结构 .....           | ( 65 )        |
| 4.11.3       | 可编程控制器的原理及技术性能 .....        | ( 65 )        |
| 4.11.4       | PLC 的分类及功能 .....            | ( 67 )        |
| 4.11.5       | PLC 的编程语言 .....             | ( 67 )        |
| 4.11.6       | 实验快堆 PLC 的编程举例 .....        | ( 69 )        |
| <b>第 5 章</b> | <b>直流电源系统 .....</b>         | <b>( 73 )</b> |
| 5.1          | 电厂的直流电源系统的作用及组成 .....       | ( 73 )        |
| 5.1.1        | 电厂的直流电源系统的作用 .....          | ( 73 )        |
| 5.1.2        | 电厂的直流电源系统的组成 .....          | ( 73 )        |
| 5.2          | 整流器的原理 .....                | ( 73 )        |
| 5.3          | 蓄电池的原理及运行方式 .....           | ( 75 )        |
| 5.3.1        | 蓄电池的原理 .....                | ( 75 )        |
| 5.3.2        | 固定式铅酸蓄电池的结构 .....           | ( 76 )        |
| 5.3.3        | 固定式铅酸蓄电池的特性参数 .....         | ( 77 )        |
| 5.3.4        | 铅酸蓄电池运行方式 .....             | ( 77 )        |
| 5.4          | 核电厂直流配电系统 .....             | ( 78 )        |
| 5.5          | 中国实验快堆的直流电源系统 .....         | ( 80 )        |

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| <b>第 6 章 交流不间断电源系统</b>  | ( 81 ) |
| 6.1 UPS 作用和用途           | ( 81 ) |
| 6.2 UPS 组成元件及原理接线       | ( 81 ) |
| 6.3 UPS 的分类和运行          | ( 82 ) |
| 6.3.1 UPS 分类            | ( 82 ) |
| 6.3.2 后备式 UPS           | ( 82 ) |
| 6.3.3 在线式 UPS           | ( 83 ) |
| 6.3.4 在线互动式 UPS         | ( 83 ) |
| 6.4 UPS 基本原理和主要参数       | ( 84 ) |
| 6.4.1 UPS 基本原理          | ( 84 ) |
| 6.4.2 UPS 主要技术参数        | ( 84 ) |
| 6.5 中国实验快堆的不间断的交流电力系统   | ( 84 ) |
| <b>第 7 章 变压器</b>        | ( 87 ) |
| 7.1 变压器的应用、分类和结构        | ( 87 ) |
| 7.1.1 变压器的分类            | ( 87 ) |
| 7.1.2 变压器的基本结构          | ( 87 ) |
| 7.2 变压器的型号、额定参数及相关计算    | ( 90 ) |
| 7.2.1 型号表示方法            | ( 90 ) |
| 7.2.2 额定参数              | ( 91 ) |
| 7.3 变压器原理、空载和负载运行       | ( 91 ) |
| 7.3.1 变压器工作原理           | ( 91 ) |
| 7.3.2 变压器空载运行           | ( 92 ) |
| 7.3.3 变压器负载运行           | ( 92 ) |
| 7.4 变压器的等效电路、计算方法       | ( 93 ) |
| 7.4.1 变压器的折算法           | ( 93 ) |
| 7.4.2 等效电路              | ( 93 ) |
| 7.5 变压器的空载和短路试验         | ( 94 ) |
| 7.5.1 空载试验              | ( 94 ) |
| 7.5.2 短路试验              | ( 94 ) |
| 7.6 变压器的运行特性            | ( 95 ) |
| 7.6.1 电压调整率和外特性         | ( 95 ) |
| 7.6.2 效率特性              | ( 95 ) |
| 7.7 三相变压器               | ( 96 ) |
| 7.7.1 三相变压器绕组的联结        | ( 96 ) |
| 7.7.2 三相变压器的磁路系统        | ( 97 ) |
| 7.7.3 联结法和磁路系统对电动势波形的影响 | ( 98 ) |
| 7.8 变压器并联运行的条件与分析       | ( 99 ) |
| 7.8.1 变压器理想并联运行的条件      | ( 99 ) |
| 7.8.2 对并联运行条件分析         | ( 99 ) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 7.9 自耦变压器、三绕组变压器、分裂变压器 .....          | (100) |
| 7.9.1 自耦变压器 .....                     | (100) |
| 7.9.2 三绕组变压器 .....                    | (101) |
| 7.9.3 分裂变压器 .....                     | (101) |
| 7.10 中国实验快堆用变压器介绍 .....               | (102) |
| 7.10.1 主变压器 .....                     | (102) |
| 7.10.2 干式变压器 .....                    | (102) |
| <b>第8章 同步发电机</b> .....                | (104) |
| 8.1 同步电机的结构、工作原理和运行状态 .....           | (104) |
| 8.1.1 同步电机的结构 .....                   | (104) |
| 8.1.2 同步电机的工作原理 .....                 | (106) |
| 8.1.3 同步电机的运行状态 .....                 | (107) |
| 8.2 同步发电机的空载和负载运行 .....               | (108) |
| 8.2.1 空载运行 .....                      | (108) |
| 8.2.2 负载运行 .....                      | (109) |
| 8.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路 .....       | (111) |
| 8.3.1 不考虑磁饱和 .....                    | (111) |
| 8.3.2 考虑磁饱和 .....                     | (113) |
| 8.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图 .....            | (114) |
| 8.4.1 双反应理论 .....                     | (114) |
| 8.4.2 凸极同步发电机的电压方程和相量图 .....          | (114) |
| 8.5 同步发电机的功率和转矩方程 .....               | (115) |
| 8.5.1 功率方程和电磁功率 .....                 | (115) |
| 8.5.2 转矩方程 .....                      | (116) |
| 8.6 同步电机参数的测定 .....                   | (117) |
| 8.6.1 直轴同步电抗 $X_d$ 的测定 .....          | (117) |
| 8.6.2 转差法测定 $X_d$ 和 $X_q$ .....       | (118) |
| 8.6.3 由零功率因数和空载特性确定定子漏抗和电枢反应磁动势 ..... | (119) |
| 8.7 同步发电机的运行特性 .....                  | (120) |
| 8.7.1 外特性 .....                       | (120) |
| 8.7.2 调整特性 .....                      | (121) |
| 8.7.3 效率特性 .....                      | (121) |
| 8.8 同步发电机与电网的并联运行 .....               | (122) |
| 8.8.1 投入并联的条件 .....                   | (122) |
| 8.8.2 投入并联的方法 .....                   | (122) |
| 8.8.3 功角特性 .....                      | (125) |
| 8.8.4 有功功率的调节和静态稳定 .....              | (125) |
| 8.8.5 无功功率的调节 .....                   | (126) |
| 8.9 大亚湾核电站同步发电机介绍 .....               | (127) |
| 8.9.1 发电机简介 .....                     | (127) |

|             |                              |              |
|-------------|------------------------------|--------------|
| 8.9.2       | 发电机结构 .....                  | (128)        |
| 8.9.3       | 发电机的辅助系统 .....               | (130)        |
| 8.10        | 中国实验快堆主发电机介绍 .....           | (130)        |
| 8.10.1      | 主发电机简介 .....                 | (130)        |
| 8.10.2      | 主发电机结构 .....                 | (132)        |
| 8.10.3      | 发电机组的运行 .....                | (134)        |
| 8.11        | 中国实验快堆柴油发电机介绍 .....          | (135)        |
| 8.11.1      | 柴油发电机简介 .....                | (135)        |
| 8.11.2      | 柴油发电机结构及工作原理 .....           | (136)        |
| 8.11.3      | 柴油发电机的辅助系统 .....             | (136)        |
| 8.11.4      | 柴油发电机的运行 .....               | (137)        |
| <b>第9章</b>  | <b>同步发电机的励磁系统 .....</b>      | <b>(138)</b> |
| 9.1         | 发电机励磁系统的作用和要求 .....          | (138)        |
| 9.1.1       | 励磁系统的主要作用 .....              | (138)        |
| 9.1.2       | 励磁系统的暂态性能指标 .....            | (138)        |
| 9.1.3       | 励磁系统的基本要求 .....              | (138)        |
| 9.2         | 发电机励磁系统的构成和基本原理 .....        | (139)        |
| 9.2.1       | 发电机励磁系统的构成 .....             | (139)        |
| 9.2.2       | 发电机励磁系统的基本原理 .....           | (139)        |
| 9.3         | 发电机的调压特性和机组间无功功率分配 .....     | (140)        |
| 9.3.1       | 发电机的调压特性 .....               | (140)        |
| 9.3.2       | 机端并联运行机组间无功功率的分配 .....       | (140)        |
| 9.3.3       | 发电机经升压变压器后并联工作时的无功功率分配 ..... | (141)        |
| 9.4         | 大亚湾核电站同步发电机励磁系统介绍 .....      | (141)        |
| 9.4.1       | 励磁系统的构成和运行特点 .....           | (141)        |
| 9.4.2       | 励磁系统的主要部件简述 .....            | (142)        |
| 9.5         | 实验快堆同步发电机励磁系统介绍 .....        | (143)        |
| 9.5.1       | 励磁系统的构成和基本原理 .....           | (143)        |
| 9.5.2       | 励磁系统的主要部件 .....              | (145)        |
| 9.5.3       | 励磁系统的主要技术参数 .....            | (149)        |
| <b>第10章</b> | <b>电动机 .....</b>             | <b>(150)</b> |
| 10.1        | 直流电动机的用途、基本结构 .....          | (150)        |
| 10.1.1      | 直流电动机的用途 .....               | (150)        |
| 10.1.2      | 直流电动机的基本结构 .....             | (150)        |
| 10.2        | 直流电动机的分类、技术参数 .....          | (151)        |
| 10.2.1      | 直流电机的分类 .....                | (151)        |
| 10.2.2      | 技术参数 .....                   | (151)        |
| 10.3        | 直流电机的工作原理 .....              | (151)        |
| 10.4        | 直流电机的励磁方式 .....              | (153)        |

|               |                      |       |
|---------------|----------------------|-------|
| 10.4.1        | 他励直流电机               | (153) |
| 10.4.2        | 并励直流电机               | (153) |
| 10.4.3        | 串励直流电机               | (153) |
| 10.4.4        | 复励直流电机               | (153) |
| 10.5          | 直流电机的基本理论            | (154) |
| 10.6          | 直流电动机的调速             | (155) |
| 10.7          | 直流电动机的制动             | (155) |
| 10.8          | 直流电动机的换向             | (156) |
| 10.9          | 异步电动机的用途、工作原理和结构     | (157) |
| 10.9.1        | 异步电动机的用途             | (157) |
| 10.9.2        | 异步电动机的工作原理           | (157) |
| 10.9.3        | 异步电动机的结构             | (157) |
| 10.10         | 异步电动机的型号、额定数据和计算     | (159) |
| 10.10.1       | 异步电动机的型号             | (159) |
| 10.10.2       | 异步电动机的额定数据           | (159) |
| 10.11         | 三相异步电动机的运行分析         | (160) |
| 10.12         | 三相异步电动机的磁动势和磁场及基本方程式 | (161) |
| 10.12.1       | 异步电动机的磁动势及磁场         | (161) |
| 10.12.2       | 异步电动机的基本方程式          | (162) |
| 10.13         | 三相异步电动机的工作特性         | (162) |
| 10.14         | 三相异步电动机的机械特性         | (163) |
| 10.14.1       | 固有机械特性               | (163) |
| 10.14.2       | 人为机械特性               | (164) |
| 10.15         | 三相异步电动机的运行状态         | (164) |
| 10.15.1       | 电动运行                 | (165) |
| 10.15.2       | 能耗制动                 | (165) |
| 10.16         | 三相异步电动机的启动           | (165) |
| 10.16.1       | 直接启动                 | (165) |
| 10.16.2       | 降压启动                 | (165) |
| 10.17         | 三相异步电动机的调速           | (167) |
| 10.17.1       | 变极调速                 | (167) |
| 10.17.2       | 变频调速                 | (167) |
| 10.17.3       | 改变转差率调速              | (167) |
| 10.18         | 电磁泵的原理与控制            | (168) |
| 10.18.1       | 电磁泵的原理               | (168) |
| 10.18.2       | 电磁泵的控制               | (168) |
| <b>第 11 章</b> | <b>继电保护</b>          | (170) |
| 11.1          | 继电保护的基础知识            | (170) |
| 11.1.1        | 继电保护的定义与作用           | (170) |

|             |                      |       |
|-------------|----------------------|-------|
| 11.1.2      | 对继电保护装置的基本要求         | (171) |
| 11.1.3      | 继电保护的基本原理与保护装置的组成    | (173) |
| 11.1.4      | 互感器的特性及其在继电保护中的应用    | (175) |
| 11.2        | 发电机和变压器故障            | (177) |
| 11.2.1      | 发电机故障                | (177) |
| 11.2.2      | 变压器故障                | (179) |
| 11.3        | 常见的继电保护装置工作原理        | (182) |
| 11.3.1      | 过电流保护                | (182) |
| 11.3.2      | 二次谐波制动的变压器纵差保护       | (182) |
| 11.3.3      | 变压器瓦斯保护              | (184) |
| 11.3.4      | 发电机纵差保护              | (184) |
| 11.4        | 大亚湾核电站发电机和变压器的继电保护   | (185) |
| 11.4.1      | 发电机-变压器组继电保护系统       | (185) |
| 11.4.2      | 发电机继电保护配置和性能         | (186) |
| 11.4.3      | 变压器继电保护配置和性能         | (188) |
| 11.5        | 中国实验快堆发电机和变压器的继电保护   | (189) |
| 11.5.1      | 微机继电保护组成及工作原理        | (189) |
| 11.5.2      | 中国实验快堆继电保护配置         | (190) |
| 11.5.3      | 发电机和变压器保护装置的选择       | (192) |
| 11.5.4      | 德威特 DVP600 系列装置的主要特点 | (193) |
| 11.5.5      | 德威特 DVP600 系列装置的工作原理 | (195) |
| <b>参考文献</b> |                      | (197) |

# 第1章 电气基础知识

## 1.1 电路的基本概念

### 1.1.1 电路的基本组成

#### 1. 电路的基本概念

电路是由各种电器元器件(或电工设备)按照一定的电气功能要求连接起来的总体。它为电流的流通提供了一个路径。图 1-1 所示为简单的直流电路。

#### 2. 电路的基本组成

电路的基本组成包括以下四个部分:

(1) 电源(供能元件):为电路提供电能的设备和器件(如电池、发电机等)。

(2) 负载(耗能元件):使用(消耗)电能的设备和器件(如灯泡等用电器)。

(3) 控制器件:控制电路工作状态的器件或设备(如开关等)。

(4) 连接导线:将电器设备和元器件按一定方式连接起来(如各种铜、铝电缆线等)。

其中(3)、(4)是中间环节,起着传递、分配和控制电能的作用。

#### 3. 电路的状态

电路的状态有以下几种情况:

(1) 通路(闭路):电源与负载接通,电路中有电流通过,电气设备或元器件获得一定的电压和电功率,进行能量转换。

(2) 开路(断路):电路中没有电流通过,又称为空载状态。

(3) 短路:电源两端的导线直接相连接,输出电流过大对电源来说属于严重过载,如没有保护措施,电源或电器会被烧毁或发生火灾,所以通常要在电路或电气设备中安装熔断器、断路器等保护装置,以避免发生短路时出现不良后果。

#### 4. 电路的作用

电路的作用有两个:

(1) 在强电领域中,实现电能的传输、分配与转换;

(2) 在弱电领域中,实现信号的传递与处理。

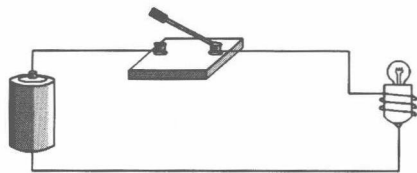


图 1-1 简单的直流电路

### 1.1.2 关于电路的物理量

#### 1. 电流的基本概念

电路中电荷沿着导体的定向运动形成电流,电路中正电荷流动的方向规定为电流的方向(或负电荷流动的反方向)。在以后的电路计算中,我们可以任意指定一个方向作为电流

的参考方向,进行计算。计算的结果为正,则表示电流的参考方向与电流的实际方向一致;计算的结果为负,则表示电流的参考方向与电流的实际方向相反。电流大小等于在单位时间内通过导体横截面的电量,称为电流强度(简称电流),用符号  $I$  或  $i(t)$  表示。电流  $i(t)$  的国际单位制为安培(A)。常用的电流单位还有毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ )、千安(kA)等。

电流有两种类型:一种是电流的大小及方向都不随时间变化,即在单位时间内通过导体横截面的电量相等,则称为稳恒电流或恒定电流,简称为直流,记为 DC 或 dc,直流电流要用大写字母  $I$  表示;另一种是电流的大小及方向均随时间变化,则称为变动电流。对电路分析来说,一种最为重要的变动电流是正弦交流电流,其大小及方向均随时间按正弦规律作周期性变化,简称为交流,记为 AC 或 ac,交流电流的瞬时值要用小写字母  $i$  或  $i(t)$  表示。

## 2. 电压的基本概念

电压是指电路中两点 A、B 之间的电位差(简称为电压),其大小等于单位正电荷因受电场力作用从 A 点移动到 B 点所做的功,电压的方向规定为从高电位指向低电位的方向。在以后的电路计算中,我们可以任意指定一个方向作为电压的参考方向,进行计算。计算的结果为正,则表示电压的参考方向与电压的实际方向一致;计算的结果为负,则表示电压的参考方向与电压的实际方向相反。电压的国际单位制为伏特(V),常用的单位还有毫伏(mV)、微伏( $\mu\text{V}$ )、千伏(kV)等。

电压有两种类型:一种是电压的大小及方向都不随时间变化,则称为稳恒电压或恒定电压,简称为直流电压,用大写字母  $U$  表示;另一种是电压的大小及方向随时间变化,则称为变动电压。对电路分析来说,一种最为重要的变动电压是正弦交流电压(简称交流电压),其大小及方向均随时间按正弦规律作周期性变化。交流电压的瞬时值要用小写字母  $u$  或  $u(t)$  表示。

## 3. 电功率

电功率(简称功率)所表示的物理意义是电路元件或设备在单位时间内吸收或发出的电能。两端电压为  $U$ 、通过电流为  $I$  的任意二端元件(可推广到一般二端网络)的功率大小为

$$P = UI$$

功率的国际单位制单位为瓦特(W),常用的单位还有毫瓦(mW)、千瓦(kW)。

## 4. 电动势

衡量电源的电源力大小及其方向的物理量叫做电源的电动势。

电动势通常用符号  $E$  或  $e(t)$  表示, $E$  表示大小与方向都恒定的电动势(直流电源的电动势), $e(t)$  表示大小和方向随时间变化的电动势,也可简记为  $e$ 。电动势的国际单位制为伏特,记做 V。

电动势的大小等于电源力把单位正电荷从电源的负极,经过电源内部移到电源正极所做的功。电动势的方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的正极。

# 1.1.3 关于正弦交流电的基本概念

## 1. 正弦交流电

大小和方向均随时间做周期性变化的电压或电流称为交流电,而大小和方向均随时间按正弦规律做周期性变化的电流、电压、电动势称为正弦交流电流、电压、电动势。正弦量随时间按正弦规律变化,对应各个时刻的数值称为瞬时值,瞬时值是用正弦解析式(三角函数

式)来表示,即

$$\begin{aligned}i(t) &= I_m \sin(\omega t + \varphi_{i0}) \\u(t) &= U_m \sin(\omega t + \varphi_{u0}) \\e(t) &= E_m \sin(\omega t + \varphi_{e0})\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中,  $I_m$ 、 $U_m$ 、 $E_m$  分别叫做交流电流、电压、电动势的振幅(也叫做峰值或最大值),  $\omega$  叫做交流电的角频率,单位为弧度/秒(rad/s),它表征正弦交流电流每秒内变化的电角度; $\varphi_{i0}$ 、 $\varphi_{u0}$ 、 $\varphi_{e0}$  分别叫做电流、电压、电动势的初相位或初相,单位为弧度(rad)或度( $^\circ$ ),它表示初始时刻( $t=0$  时)正弦交流电所处的电角度。

振幅、角频率、初相这三个参数叫做正弦交流电的三要素。任何正弦量都具备三要素。

## 2. 表征正弦交流电的物理量

### (1) 周期

正弦交流电完成一次循环变化所用的时间叫做周期,用字母  $T$  表示,单位为秒(s)。显然正弦交流电流或电压相邻的两个最大值(或相邻的两个最小值)之间的时间间隔即为周期,由三角函数知识可知

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

### (2) 频率

正弦交流电一秒钟内经历的循环数称为频率,(用符号  $f$  表示),即

$$f = \frac{1}{T}$$

它表示正弦交流电流在单位时间内作周期性循环变化的次数,即表征交流电交替变化的速率(快慢)。频率的国际单位制是赫兹(Hz)。角频率与频率之间的关系为

$$\omega = 2\pi f$$

周期、频率、角频率三者是从不同的角度反映的同一个问题,正弦量随时间变化的快慢程度。

### (3) 有效值

在电工技术中,有时并不需要知道交流电的瞬时值,而规定一个能够表征其大小的特定值——有效值,其依据是交流电流和直流电流通过电阻时,电阻都要消耗电能(热效应)。

设正弦交流电流  $i(t)$  在一个周期  $T$  时间内,使一电阻  $R$  消耗的电能为  $Q_R$ ,另有一相应的直流电流  $I$  在时间  $T$  内也使该电阻  $R$  消耗相同的电能,即  $Q_R = I^2 RT$ 。就其对电阻做功的能力来说,这两个电流( $i$  与  $I$ )是相同的,于是我们把做功能力相等的直流电的数值  $I$  定义为相应交流电  $i$  的有效值。有效值可确切地反映正弦交流电的大小。有效值是根据热效应相同的直流电数值而得,因此引用直流电的符号,即有效值用  $U$  或  $I$  表示。

理论与实验都可以证明,正弦交流电  $i(t)$  的振幅(最大值)  $I_m$  与其有效值之间具有特定的数值关系,即

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

正弦交流电压的有效值为