

河南省职业教育教学成果奖

附件材料

成果名称 双碳战略背景下“风光储充放”五位一体新型电力技术人才培养模式创新与实践

第一完成单位 郑州电力职业技术学院

主要完成人 华红艳、马银安、张红丽、李响、张之枫、王文豪、王春红、范莉、孙爱芬、魏继红、李杰虎、马锐

推荐序号 □□□□

附件目录：

八、教材成果

八、教材成果

| 序号 | 教材名称 | 出版社 | 出版时间 | 印刷册数 | 对象(填写主持人/成员) | 作者位次 |
|----|-----------------|-------------|------------|------|--------------|------|
| 1 | 变配电设备运行与维护技术 | 上海交通大学出版社 | 2025-09-01 | 3000 | 成员(3) | 1 |
| 2 | 电工测试技术 | 机械工业出版社 | 2022-06-01 | 3000 | 成员(3) | 1 |
| 3 | 电工技术基础项目教程 | 机械工业出版社 | 2023-06-01 | 3000 | 成员(3) | 2 |
| 4 | 电气工程基础及自动化与节能技术 | 中国科学文化音像出版社 | 2024-06-01 | 2000 | 成员(9) | 10 |
| 5 | 混合直流输电技术 | 中国原子能出版社 | 2019-03-01 | 6000 | 成员(4) | 4 |

1. 《变配电设备运行与维护技术》河南省职业教育和继续教育精品在线开放课程配套教材



河南省职业教育和继续教育精品在线开放课程配套教材

变配电设备运行 与维护技术

主审 吴 靛

主编 张红丽 刘小彩 许昭一



 上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书根据教育部职业教育教学改革有关要求和高等职业院校的教学特色编写。全书共有 11 个项目，分别为变压器、断路器、隔离开关、互感器、电容器、高压开关柜、GIS 组合电器、母线、避雷器、接地、倒闸操作。

本书结构完整、内容实用，注重培养学生的综合技能，可作为高等职业院校能源动力与材料类相关专业学生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

变配电设备运行与维护技术 / 张红丽, 刘小彩, 许昭一主编. — 上海: 上海交通大学出版社, 2025. 9.

ISBN 978-7-313-33282-0

I. ① TM63; TM642

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20257DT232 号

变配电设备运行与维护技术

BIANPIEDIAN SHEBEI YUNXING YU WEIHU JISHU

主 编: 张红丽 刘小彩 许昭一

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 三河市龙大印装有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 373 千字

版 次: 2025 年 9 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-33282-0

定 价: 49.80 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15.75

印 次: 2025 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与发行部联系

联系电话: 0316-5165436

本书编委会

主 审 吴 靓

主 编 张红丽 刘小彩 许昭一

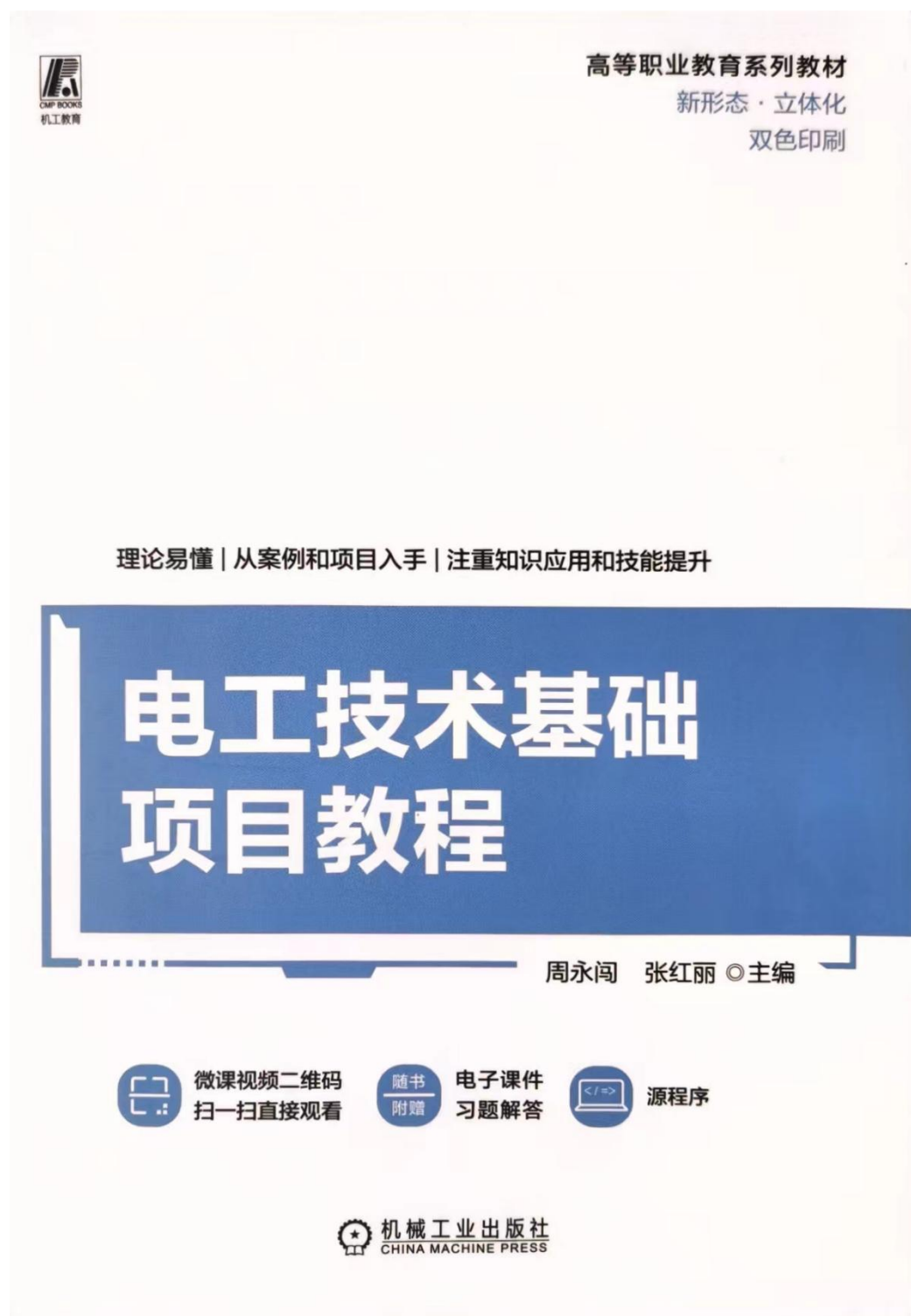
副主编 梁卫玲 车 鹏 马银安

秦福祥 郭漫玉

参 编 陈 鹏 杨 森 陈 浩

王 金 李 芳

2. 《电工技术基础项目教程》立体化教材



高等职业教育系列教材

电工技术基础项目教程

主 编 周永闯 张红丽
副主编 班 晴 何玉婷 周晓利 魏继红
参 编 周俊玲 闪晨曦 李 超 杜 一
主 审 苏海滨



机械工业出版社

www.cmpbook.com.cn ; 机械工业出版社

本书内容充分考虑高职高专学生目前的知识层次、学习能力和应用能力的实际情况，以基础知识掌握为前提，附加知识的延伸与拓展，方便学有余力的学生对知识有较全面的理解和掌握。本书采用项目式教学形式，全面、系统、深入地讲述了电工技术的基本知识和基本技能。具体内容包括：直流电路的测试分析、正弦交流电路的测试分析、一阶动态电路的测试分析、磁路测试和分析及安全用电技术。

本书具有内容新、理论深度适当、实用性及实践性强等特点，注重基本概念、基本原理和基本分析方法的阐述，注重联系工程实际，突出理论知识的实用性和适度性，可作为高职高专院校电气与电子类各专业电路分析课程的教材，同时也可以作为电学爱好者和相关专业工程技术人员的参考书。

本书配套电子资源包括二维码形式的微课视频、电子课件、习题解答、源程序和参考资料等，需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册，审核通过后下载，或联系编辑索取（微信：13261377872；电话：010-88379739）。

图书在版编目（CIP）数据

电工技术基础项目教程 / 周永闯，张红丽主编. —北京：机械工业出版社，2023.6

高等职业教育系列教材

ISBN 978-7-111-73105-4

I. ①电… II. ①周… ②张… III. ①电工技术-高等职业教育-教材 IV. ①TM

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 076137 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：李文轶

责任编辑：李文轶 周海越

责任校对：郑 婕 赵小花

责任印制：刘 媛

北京中科印刷有限公司印刷

2023 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.5 印张·325 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-73105-4

定价：55.00 元

电话服务

网络服务

客服电话：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

010-88379833

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-68326294


金书网：www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网：www.cmpedu.com

目 录 Contents

前言

| | | |
|---|------------------------|----------|
|  | 直流电路的测试分析 | 1 |
| 任务 1 双电源供电电路基本物理量 测量分析 | | 1 |
| 1.1 电路及其基本物理量 | | 4 |
| 1.1.1 电路和电路模型 | | 4 |
| 1.1.2 电路的基本物理量 | | 6 |
| 1.1.3 电路的工作状态 | | 11 |
| 1.1.4 电气设备的额定值 | | 12 |
| [知识拓展] 用电能表测量家电功耗的 简易方法 | | 12 |
| [练习与思考] | | 13 |
| 任务 2 惠斯通电桥电路测量分析 | | 14 |
| 1.2 电路基本元件及连接方式 | | 17 |
| 1.2.1 欧姆定律 | | 17 |
| 1.2.2 电路基本元件 | | 17 |
| 1.2.3 元件串并联与混联电路 | | 25 |
| [知识拓展] 常见的电阻、电容与电感 | | 30 |
| [练习与思考] | | 31 |
| 任务 3 双电源供电电路基尔霍夫 定律的测试分析 | | 32 |
| 1.3 基尔霍夫定律及支路电流法 | | 34 |
| 1.3.1 基尔霍夫定律 | | 34 |
| 1.3.2 支路电流法 | | 37 |
| [知识拓展] 电阻的主要参数与电阻值的 表示方法 | | 38 |
| [练习与思考] | | 40 |
| 任务 4 双电源供电电路等效电路分析 | | 41 |
| 1.4 戴维南、诺顿定理及电源等效 变换 | | 43 |
| 1.4.1 戴维南定理 | | 43 |
| 1.4.2 诺顿定理 | | 45 |
| 1.4.3 电压源与电流源的等效变换 | | 45 |
| [知识拓展] 最大功率输出问题 | | 49 |
| [练习与思考] | | 50 |
| 任务 5 双电源供电电路综合应用 分析 | | 52 |
| 1.5 网孔电流法、节点电压法及叠加 定理 | | 54 |
| 1.5.1 网孔电流法 | | 54 |
| 1.5.2 节点电压法 | | 55 |
| 1.5.3 叠加定理 | | 57 |
| [知识拓展] 非线性电阻电路的分析 方法 | | 58 |
| [练习与思考] | | 59 |

6.1 正弦交流电路的测试分析 62

| | |
|--|--------------------------------|
| 任务1 白炽灯电路元件参数的测试分析 62 | [练习与思考] 96 |
| 2.1 交流电基本概念与交流电的运算 64 | 任务3 荧光灯电路功率因数提高测试分析 97 |
| 2.1.1 正弦交流电路基本概念 64 | 2.3 正弦交流电路功率及功率因数的提高 98 |
| 2.1.2 正弦量相量表示法 68 | 2.3.1 正弦交流电路功率 99 |
| 2.1.3 单一参数的交流电路 71 | 2.3.2 正弦交流电路功率因数的提高 101 |
| [知识拓展] 中国电力“一特四大”战略和“三华”特高压同步电网 78 | [知识拓展] 荧光灯的工作原理及维修方法 103 |
| [练习与思考] 78 | [练习与思考] 105 |
| 任务2 三相异步电动机单相空载运行电路分析 81 | 任务4 三相交流电路的测量分析 106 |
| 2.2 交流电串联、并联及混联电路分析 84 | 2.4 三相交流电路 109 |
| 2.2.1 RLC 串联交流电路 84 | 2.4.1 三相电源 110 |
| 2.2.2 GLC 并联交流电路 88 | 2.4.2 三相负载 113 |
| 2.2.3 正弦交流混联电路分析 90 | 2.4.3 三相功率 115 |
| 2.2.4 电路中的谐振 92 | [知识拓展] 家庭用电线路安装与设计简介 117 |
| [知识拓展] 全球能源态势 95 | [练习与思考] 119 |

6.2 一阶动态电路的测试分析 122

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| 任务1 闪光灯电路分析 122 | 任务2 汽车电子点火电路分析 135 |
| 3.1 动态电路的描述与一阶 RC 电路的分析 124 | 3.2 一阶 RL 电路的分析与三要素法 137 |
| 3.1.1 动态电路的描述 124 | 3.2.1 一阶 RL 电路的分析 138 |
| 3.1.2 一阶 RC 电路的分析 128 | 3.2.2 一阶电路的三要素法 142 |
| [知识拓展] 储能技术发展方向 133 | [知识拓展] 电源技术发展方向 143 |
| [练习与思考] 134 | [练习与思考] 144 |

4.3 磁路测试和分析145

| | | | |
|---------------------------|-----|--------------------|-----|
| 任务1 磁性材料与磁路应用..... | 145 | [练习与思考]..... | 162 |
| 4.1 磁路..... | 147 | 任务2 单相变压器磁路分析..... | 165 |
| 4.1.1 磁场的几个基本物理量..... | 148 | 4.2 变压器..... | 167 |
| 4.1.2 常用铁磁材料及其特性..... | 151 | 4.2.1 变压器基本概念..... | 168 |
| 4.1.3 磁路基本定律..... | 155 | 4.2.2 特殊用途变压器..... | 172 |
| 4.1.4 电磁感应定律..... | 159 | [知识拓展] 霍尔元件简介..... | 173 |
| [知识拓展] 电磁储能与干簧式继电器简介..... | 161 | [练习与思考]..... | 174 |

5.1 安全用电技术177

| | | | |
|-----------------------------------|-----|------------------------|-----|
| 任务1 预防触电的安全措施训练..... | 177 | 任务2 触电急救与电气火灾处理..... | 186 |
| 5.1 电工安全基础知识..... | 178 | 5.2 触电急救与电气火灾..... | 187 |
| 5.1.1 预防触电的基本知识..... | 178 | 5.2.1 触电急救..... | 187 |
| 5.1.2 触电事故断电操作方法..... | 183 | 5.2.2 电气火灾..... | 188 |
| [知识拓展] 国家电网组织总体架构与 各层功能定位..... | 185 | [知识拓展] 两个替代与全球能源观..... | 190 |
| [练习与思考]..... | 185 | [练习与思考]..... | 193 |

5.2194

项目 2 正弦交流电路的测试分析

教学导航

本项目介绍正弦交流电路的稳态分析。正弦信号是一种基本信号，广泛应用于工农业生产和日常生活中，故对正弦稳态电路的分析在电路分析中占有十分重要的地位。另外，从信号分析的角度看，任何复杂的信号都可以分解为按正弦规律变化的分量，因此在掌握了正弦稳态电路的分析方法后，就可以研究复杂信号作用下的电路响应，利用叠加定理分别研究每一个正弦分量信号作用下的电路响应，再叠加得到总的响应。

所有电压、电流为同一频率的正弦函数的电路称为正弦交流电路。本项目先介绍正弦交流电路的三要素、正弦量的相量表示，再介绍正弦交流电路的分析方法和功率，最后介绍三相交流电路电源和负载的特点、连接方式和分析方法，包含三相交流电路的功率测量及计算方法。

任务 1 白炽灯电路元件参数的测试分析

【任务导入】

蜘蛛依靠什么来判断网的振动是由昆虫引起的而不是由风引起的？人能听到蜜蜂扇动翅膀的“嗡嗡”声，为什么蝴蝶扇动翅膀的声音人们听不到？家庭电路中的白炽灯使用交流电，交流电大小、方向时刻在变化，为什么白炽灯看起来不会忽明忽暗？衡量交流电好坏的主要指标有哪些？交流电大小和方向是按照什么样的规律进行变化的？这些时刻变化的电流和电压如何用一个恒定不变的值去描述它们？更进一步地讲，这些时刻变化的量之间该如何进行运算呢？完成任务 1 的学习后这些问题将得到很好的解答。

【学习目标】

- 1) 理解正弦交流电的概念。
- 2) 掌握使用交流电压表、交流电流表、功率表测量交流电路及分析交流电路。
- 3) 能够分析电阻、电容、电感等元件在交流电路中的阻抗性质。
- 4) 学会分析、计算元件参数。

【工作任务】

图 2-1-1 为白炽灯实验电路，使用示波器分析工频交流电频率、周期、最大值，使用示波器测量分析 3 个并联支路中各元件电

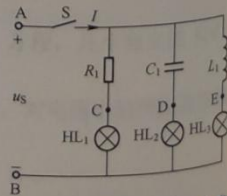


图 2-1-1 白炽灯实验电路

[任务仿真]

教师使用 Multisim 软件按照图 2-1-1 连接白炽灯实验电路，用直流电和交流电分别进行仿真实验。对图 2-1-1 中元件选用不同参数，使用示波器进行电路基本物理量测量，让学生分析电阻、电容、电感支路特点。



[任务实施]

1. 交流白炽灯直流电源电路测试分析

1) 按照图 2-1-1 连接电路， u_S 为直流 220V 电源、 R_1 为 220V/2k Ω 电阻、 C_1 为 450V/20 μ F 电容、 L_1 为 3A/2H 线绕电感、HL₁、HL₂、HL₃ 为 220V/25W 白炽灯，闭合开关 S 后观察 3 个灯的情况，并测量各元件两端电压。

2) 将观察的情况及测量数据填入表 2-1-1 中。

表 2-1-1 交流白炽灯直流电源电路测试数据

| HL ₁ | HL ₂ | HL ₃ | U_{AB}/V | U_{AC}/V | U_{CB}/V | U_{AD}/V | U_{DB}/V | U_{AE}/V | U_{EB}/V |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | | | | | | |

2. 交流白炽灯交流电源电路测试分析

1) 按照图 2-1-1 连接电路， u_S 为工频 220V 交流电源，其他元件不变，闭合开关 S 后观察 3 个灯的情况，并测量各元件两端电压。

2) 将观察的情况及测量数据填入表 2-1-2 中。

表 2-1-2 交流白炽灯交流电源电路测试数据

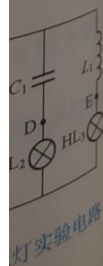
| HL ₁ | HL ₂ | HL ₃ | U_{AB}/V | U_{AC}/V | U_{CB}/V | U_{AD}/V | U_{DB}/V | U_{AE}/V | U_{EB}/V |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | | | | | | |

3) 保持开关 S 闭合，使用数字示波器一个通道测量 A 点和 B 点间波形，观察工频电的周期、频率和最大值，使用两个通道同时测量 A、C 和 C、B 两点间波形，比较观察波形变化趋势是否一致，使用两个通道同时测量 A、D 和 D、B 两点间波形，比较观察波形变化趋势是否一致，使用两个通道同时测量 A、E 和 E、B 两点间波形，比较观察波形变化趋势是否一致。让学生尝试使用不同的电路参数继续验证结论的普遍性。

[总结与提升]

周期、频率和振幅是正弦交流电的三要素，在直流电作用下电容的容抗为无穷大，电感的感抗为零，在交流电作用下电容的容抗和频率成反比，电感的感抗和频率成正比。

在交流电路中，纯电感两端的电压相位超前流过电感的电流相位 90°，纯电容两端的电压相位滞后流过电容的电流相位 90°，分析研究交流电路要时刻关注相位变化对交流电路的影响。



白炽灯实验电路

应用于工农的地位。分量，因此位，利用叠立。自先介绍正和功率，最充电路的功

峰扇动翅膀交流电，交的主要指标和电压如何进行运算呢？

2.1 交流电基本概念与交流电的运算

不忘初心，才能有始有终，大学生应该坚定自己的理想信念。

2.1.1 正弦交流电路基本概念

1. 正弦量概念

大小和方向都不随时间变化的电流、电压统称为稳恒直流电 (DC)，一般用大写字母表示，例如 I 、 U ；大小和方向均随时间做周期性变化，且在一个周期内平均值为零的电流（电压、电动势）称为交流电，一般用小写字母表示，例如 i 、 u 等。交流电的变化形式是多种多样的，如图 2-1-2 所示。随时间按正弦规律变化的电流、电压、电动势等统称为正弦量，或称为正弦交流电，可简称为交流电 (AC)。



2-1-2
正弦交流电基本
概念

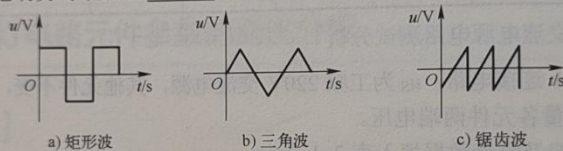


图 2-1-2 常见交流电波形

正弦交流量的大小和方向随时间按正弦规律周而复始变化。在分析正弦交流电路时，首先需要写出正弦交流量的数学表达式，画出它的波形图。为此，必须像直流电路一样，预先设定交流量的参考方向。图 2-1-3a 所示的电路流过的正弦电流 i ，其参考方向如实线箭头所示。当 i 的实际方向与参考方向一致时，是正值，对应波形图的正半周；当 i 的实际方向与参考方向相反时，是负值，对应波形图的负半周。与直流电路相同，分析交流电路时，一般习惯将电压和电流选取为关联参考方向。正弦电流 i 的波形如图 2-1-3b 所示，在交流电的波形图中，横坐标既可以用时间 t (单位 s) 表示，也可以用电角度 ωt (单位 rad) 来表示。与波形图相应的正弦电流的数学表达式为

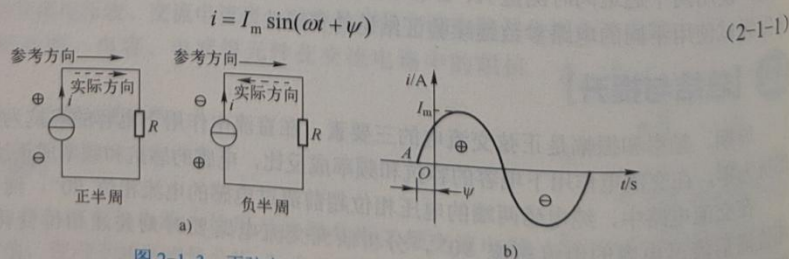


图 2-1-3 正弦交流电流的参考方向和波形

式 (2-1-1) 称为正弦电流的瞬时值表达式。正弦量在任意瞬间的值称为瞬时值，用小写字母

3. 《电工测试技术》活页式教材



高等职业教育系列教材

电工测试技术

(含实训任务单)

主 编 张红丽 马艳丽
参 编 马小莉 杨春暖 李明峰
主 审 章玉政



机械工业出版社

高等职业教育系列教材

电工测试技术

(含实训任务单)

主 编 张红丽 马艳丽
参 编 马小莉 杨春暖 李明峰
主 审 章玉政



机械工业出版社

CONTENTS

目 录

前 言

二维码资源清单

| | |
|-----------------------------|----|
| 项目 1 电压表的使用与误差表示 | 1 |
| 任务 1.1 了解电工测量的基本常识 | 2 |
| 知识目标 | 2 |
| 素养目标 | 2 |
| 知识课堂 | 2 |
| 1.1.1 电工测量概述 | 2 |
| 1.1.2 测量方式和测量方法的分类 | 3 |
| 1.1.3 电工指示仪表的基本原理及组成 | 4 |
| 1.1.4 电工指示仪表的分类、标志和型号 | 4 |
| 任务 1.2 认知电压表 | 6 |
| 知识目标 | 6 |
| 素养目标 | 6 |
| 知识课堂 | 6 |
| 1.2.1 电压表的分类 | 6 |
| 1.2.2 电压表的使用 | 7 |
| 任务 1.3 了解测量误差计算原理 | 8 |
| 知识目标 | 8 |
| 素养目标 | 8 |
| 知识课堂 | 8 |
| 1.3.1 测量误差的分类 | 8 |
| 1.3.2 测量误差的消除 | 9 |
| 1.3.3 测量误差的表示 | 10 |
| 思考与练习 1 | 10 |
| 项目 2 电压互感器配合电压表的使用 | 13 |
| 任务 2.1 认知电压互感器 | 14 |
| 知识目标 | 14 |
| 素养目标 | 14 |

► 电工测试技术(含实训任务单) ◯

| | |
|------------------------------|-----------|
| 知识课堂 | 14 |
| 2.1.1 电压互感器的构造与原理 | 14 |
| 2.1.2 电压互感器的主要参数 | 15 |
| 2.1.3 电压互感器的分类 | 16 |
| 任务2.2 电压互感器配合电压表的操作 | 16 |
| 知识目标 | 16 |
| 素养目标 | 16 |
| 知识课堂 | 17 |
| 2.2.1 电压互感器的使用原则 | 17 |
| 2.2.2 电压互感器的接线方法 | 17 |
| 2.2.3 JDG4-0.5型单相电压互感器的接线 | 19 |
| 2.2.4 电压互感器测量电压的读数方法 | 20 |
| 思考与练习2 | 21 |
| 项目3 电流互感器配合电流表的使用 | 23 |
| 任务3.1 认知电流互感器 | 24 |
| 知识目标 | 24 |
| 素养目标 | 24 |
| 知识课堂 | 24 |
| 3.1.1 电流互感器的结构与原理 | 24 |
| 3.1.2 电流互感器的主要参数 | 25 |
| 3.1.3 电流互感器的分类 | 26 |
| 任务3.2 认知电流表 | 26 |
| 知识目标 | 26 |
| 素养目标 | 26 |
| 知识课堂 | 27 |
| 3.2.1 电流表的分类 | 27 |
| 3.2.2 电流表的使用 | 27 |
| 任务3.3 电流互感器配合电流表的操作 | 28 |
| 知识目标 | 28 |
| 素养目标 | 28 |
| 知识课堂 | 28 |
| 3.3.1 电流互感器的使用原则 | 28 |
| 3.3.2 电流互感器常见的两种测量方法 | 29 |
| 3.3.3 电流互感器的接线 | 30 |
| 3.3.4 电流互感器配合电流表测量单相负载电流电路原理 | 32 |
| 3.3.5 电流互感器测量电流的读数方法 | 32 |
| 思考与练习3 | 32 |
| 项目4 功率表和功率因数表的使用 | 35 |
| 任务4.1 认知功率表和功率因数表 | 36 |
| 知识目标 | 36 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 素养目标 | 36 |
| 知识课堂 | 36 |
| 4.1.1 功率表概述 | 36 |
| 4.1.2 功率表的结构和原理 | 36 |
| 4.1.3 功率因数表概述 | 37 |
| 4.1.4 功率因数表的结构和原理 | 38 |
| 任务 4.2 功率表和功率因数表的操作 | 39 |
| 知识目标 | 39 |
| 素养目标 | 39 |
| 知识课堂 | 39 |
| 4.2.1 功率表使用原则 | 39 |
| 4.2.2 功率表接线 | 40 |
| 4.2.3 功率因数表使用原则 | 42 |
| 4.2.4 功率因数表接线 | 42 |
| 思考与练习 4 | 44 |
| 项目 5 万用表的使用 | 45 |
| 任务 5.1 认知万用表 | 46 |
| 知识目标 | 46 |
| 素养目标 | 46 |
| 知识课堂 | 46 |
| 5.1.1 万用表的概述 | 46 |
| 5.1.2 万用表的结构与功能 | 46 |
| 任务 5.2 万用表的操作 | 49 |
| 知识目标 | 49 |
| 素养目标 | 49 |
| 知识课堂 | 49 |
| 5.2.1 指针式万用表的使用 | 49 |
| 5.2.2 数字式万用表的使用 | 53 |
| 思考与练习 5 | 54 |
| 项目 6 钳形电流表及频率表的使用 | 55 |
| 任务 6.1 认知钳形电流表 | 56 |
| 知识目标 | 56 |
| 素养目标 | 56 |
| 知识课堂 | 56 |
| 6.1.1 钳形电流表概述 | 56 |
| 6.1.2 指针式钳形电流表的基本结构与工作原理 | 56 |
| 6.1.3 数字式钳形电流表的基本结构与工作原理 | 57 |
| 任务 6.2 钳形电流表的使用 | 58 |
| 知识目标 | 58 |
| 素养目标 | 58 |

电工测试技术(含实训任务单)

| | |
|-----------------------|-----------|
| 知识课堂 | 59 |
| 6.2.1 钳形电流表选型 | 59 |
| 6.2.2 钳形电流表的操作 | 59 |
| 6.2.3 钳形电流表使用注意事项 | 61 |
| 任务6.3 认知频率表 | 62 |
| 知识目标 | 62 |
| 素养目标 | 62 |
| 知识课堂 | 62 |
| 6.3.1 频率表概述 | 62 |
| 6.3.2 频率表的基本结构和工作原理 | 62 |
| 任务6.4 频率表的使用 | 63 |
| 知识目标 | 63 |
| 素养目标 | 64 |
| 知识课堂 | 64 |
| 6.4.1 指针式频率表的使用 | 64 |
| 6.4.2 数字式频率表的使用 | 64 |
| 思考与练习6 | 65 |
| 项目7 绝缘电阻表的使用 | 67 |
| 任务7.1 认知绝缘电阻表 | 68 |
| 知识目标 | 68 |
| 素养目标 | 68 |
| 知识课堂 | 68 |
| 7.1.1 绝缘电阻表概述 | 68 |
| 7.1.2 绝缘电阻表分类 | 68 |
| 7.1.3 绝缘电阻表的基本结构和工作原理 | 69 |
| 任务7.2 绝缘电阻表的操作 | 71 |
| 知识目标 | 71 |
| 素养目标 | 71 |
| 知识课堂 | 71 |
| 7.2.1 绝缘电阻表选型 | 71 |
| 7.2.2 测量前准备 | 72 |
| 7.2.3 接线原则 | 73 |
| 7.2.4 绝缘电阻表的测量 | 73 |
| 7.2.5 测量时的注意事项 | 74 |
| 7.2.6 常用电气设备的绝缘电阻合格值 | 75 |
| 思考与练习7 | 76 |
| 项目8 接地电阻测量仪的使用 | 77 |
| 任务8.1 认知接地电阻测量仪 | 78 |
| 知识目标 | 78 |
| 素养目标 | 78 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 知识课堂 | 78 |
| 8.1.1 接地电阻概述 | 78 |
| 8.1.2 接地电阻的测量原理 | 78 |
| 8.1.3 接地电阻测量仪的分类及工作原理 | 79 |
| 任务 8.2 接地电阻测量仪的操作 | 81 |
| 知识目标 | 81 |
| 素养目标 | 81 |
| 知识课堂 | 82 |
| 8.2.1 准备工作 | 82 |
| 8.2.2 测量前检查 | 82 |
| 8.2.3 测量步骤 | 82 |
| 8.2.4 测量措施及安全注意事项 | 83 |
| 8.2.5 接地电阻值合格标准 | 84 |
| 思考与练习 8 | 84 |
| 项目 9 直流电桥的使用 | 87 |
| 任务 9.1 认知直流电桥 | 88 |
| 知识目标 | 88 |
| 素养目标 | 88 |
| 知识课堂 | 88 |
| 9.1.1 直流电桥概述 | 88 |
| 9.1.2 直流单臂电桥 | 88 |
| 9.1.3 直流双臂电桥 | 91 |
| 任务 9.2 直流电桥的操作 | 94 |
| 知识目标 | 94 |
| 素养目标 | 94 |
| 知识课堂 | 94 |
| 9.2.1 直流单臂电桥的使用 | 94 |
| 9.2.2 直流双臂电桥的使用 | 97 |
| 思考与练习 9 | 99 |
| 项目 10 示波器的使用 | 101 |
| 任务 10.1 认知示波器 | 102 |
| 知识目标 | 102 |
| 素养目标 | 102 |
| 知识课堂 | 102 |
| 10.1.1 示波器概述 | 102 |
| 10.1.2 模拟式示波器 | 102 |
| 10.1.3 MOS-620CH 型双踪示波器面板介绍 | 103 |
| 10.1.4 数字式示波器 | 105 |
| 10.1.5 UTD2052CL 型数字式示波器面板介绍 | 106 |
| 任务 10.2 示波器的操作 | 107 |

▶ 电工测试技术(含实训任务单) ◯

| | |
|------------------------|-----|
| 知识目标 | 107 |
| 素养目标 | 107 |
| 知识课堂 | 107 |
| 10.2.1 模拟式示波器的使用 | 107 |
| 10.2.2 数字式示波器的使用 | 110 |
| 思考与练习 10 | 110 |

参考文献

| | | |
|-----|-------|---------|
| 1 | ..... | 1.1.1 |
| 2 | ..... | 1.1.2 |
| 3 | ..... | 1.1.3 |
| 4 | ..... | 1.1.4 |
| 5 | ..... | 1.1.5 |
| 6 | ..... | 1.1.6 |
| 7 | ..... | 1.1.7 |
| 8 | ..... | 1.1.8 |
| 9 | ..... | 1.1.9 |
| 10 | ..... | 1.1.10 |
| 11 | ..... | 1.1.11 |
| 12 | ..... | 1.1.12 |
| 13 | ..... | 1.1.13 |
| 14 | ..... | 1.1.14 |
| 15 | ..... | 1.1.15 |
| 16 | ..... | 1.1.16 |
| 17 | ..... | 1.1.17 |
| 18 | ..... | 1.1.18 |
| 19 | ..... | 1.1.19 |
| 20 | ..... | 1.1.20 |
| 21 | ..... | 1.1.21 |
| 22 | ..... | 1.1.22 |
| 23 | ..... | 1.1.23 |
| 24 | ..... | 1.1.24 |
| 25 | ..... | 1.1.25 |
| 26 | ..... | 1.1.26 |
| 27 | ..... | 1.1.27 |
| 28 | ..... | 1.1.28 |
| 29 | ..... | 1.1.29 |
| 30 | ..... | 1.1.30 |
| 31 | ..... | 1.1.31 |
| 32 | ..... | 1.1.32 |
| 33 | ..... | 1.1.33 |
| 34 | ..... | 1.1.34 |
| 35 | ..... | 1.1.35 |
| 36 | ..... | 1.1.36 |
| 37 | ..... | 1.1.37 |
| 38 | ..... | 1.1.38 |
| 39 | ..... | 1.1.39 |
| 40 | ..... | 1.1.40 |
| 41 | ..... | 1.1.41 |
| 42 | ..... | 1.1.42 |
| 43 | ..... | 1.1.43 |
| 44 | ..... | 1.1.44 |
| 45 | ..... | 1.1.45 |
| 46 | ..... | 1.1.46 |
| 47 | ..... | 1.1.47 |
| 48 | ..... | 1.1.48 |
| 49 | ..... | 1.1.49 |
| 50 | ..... | 1.1.50 |
| 51 | ..... | 1.1.51 |
| 52 | ..... | 1.1.52 |
| 53 | ..... | 1.1.53 |
| 54 | ..... | 1.1.54 |
| 55 | ..... | 1.1.55 |
| 56 | ..... | 1.1.56 |
| 57 | ..... | 1.1.57 |
| 58 | ..... | 1.1.58 |
| 59 | ..... | 1.1.59 |
| 60 | ..... | 1.1.60 |
| 61 | ..... | 1.1.61 |
| 62 | ..... | 1.1.62 |
| 63 | ..... | 1.1.63 |
| 64 | ..... | 1.1.64 |
| 65 | ..... | 1.1.65 |
| 66 | ..... | 1.1.66 |
| 67 | ..... | 1.1.67 |
| 68 | ..... | 1.1.68 |
| 69 | ..... | 1.1.69 |
| 70 | ..... | 1.1.70 |
| 71 | ..... | 1.1.71 |
| 72 | ..... | 1.1.72 |
| 73 | ..... | 1.1.73 |
| 74 | ..... | 1.1.74 |
| 75 | ..... | 1.1.75 |
| 76 | ..... | 1.1.76 |
| 77 | ..... | 1.1.77 |
| 78 | ..... | 1.1.78 |
| 79 | ..... | 1.1.79 |
| 80 | ..... | 1.1.80 |
| 81 | ..... | 1.1.81 |
| 82 | ..... | 1.1.82 |
| 83 | ..... | 1.1.83 |
| 84 | ..... | 1.1.84 |
| 85 | ..... | 1.1.85 |
| 86 | ..... | 1.1.86 |
| 87 | ..... | 1.1.87 |
| 88 | ..... | 1.1.88 |
| 89 | ..... | 1.1.89 |
| 90 | ..... | 1.1.90 |
| 91 | ..... | 1.1.91 |
| 92 | ..... | 1.1.92 |
| 93 | ..... | 1.1.93 |
| 94 | ..... | 1.1.94 |
| 95 | ..... | 1.1.95 |
| 96 | ..... | 1.1.96 |
| 97 | ..... | 1.1.97 |
| 98 | ..... | 1.1.98 |
| 99 | ..... | 1.1.99 |
| 100 | ..... | 1.1.100 |

高等职业教育系列教材

电工测试技术

实训任务单

姓 名 _____

专 业 _____

班 级 _____

任课教师 _____



机械工业出版社

目 录

实训任务单 1 用电压表测量相电压/线电压与误差表示 1

实训1 电
压表实训
操作



实训任务单 2 用电压互感器配合电压表测量市电电压 5

实训2 电
压互感器实
训操作



实训任务单 3 用电流互感器配合电流表测量单相负载电流 9

实训3 电
流互感器实
训操作



实训任务单 4 用功率表和功率因数表测量三相负载功率及功率因数 13

实训4-1
功率表实训
操作



实训4-2
功率因数表
实训操作



实训任务单 5 用万用表测量三相负载电流/电压参数及常见电子元器件参数 17

实训5 万
用表实训
操作



实训任务单 6 用钳形电流表测量三相负载电流/电压参数及频率 21

实训6-1
钳形电流表
实训操作



实训6-2
频率表实训
操作



实训任务单 7 用绝缘电阻表测量电动机绝缘参数 25

实训7 绝
缘电阻表实
训操作



实训任务单 8 用接地电阻测量仪测量高压输电杆接地电阻 29

实训8 接
地电阻测量
仪实训操作



实训任务单 9 用直流电桥测量电动机绕组及电线电阻 33

实训9 直
流电桥实训
操作



实训任务单 10 用双踪示波器测量交流信号参数 37

实训10
示波器实训
操作



03

项目3

电流互感器配合电流表的使用

▶ 学习导入:

在发电、变电、输电、配电和用电的线路中电流大小差别很大,从几安到几万安都有。为了便于测量、保护和控制,需要通过电流互感器将大电流转换为小电流;另外,电路上的电压一般都比较高,如直接测量是非常危险的,电流互感器可起到电流变换和电气隔离的作用,可以将测量仪表和操作人员与高电压、大电流隔离,而且与被测回路绝缘,没有电的联系,从而保证了操作人员和仪表的安全。对仪表制造厂家来说,也不必再考虑高压绝缘,从而降低了仪表成本。本项目就电流互感器的结构、工作原理、测量使用方法等内容进行阐述。

项目3 电
流互感器配
合电流表的
使用



任务 3.1 认知电流互感器

知识目标

- 1) 认知电流互感器的基本结构和工作原理。
- 2) 认知电流互感器的分类。

素养目标

- 1) 培养学生探究学习的能力。
- 2) 培养学生电工操作的职业素养。
- 3) 培养学生严谨的工匠精神。

知识课堂

3.1.1 电流互感器的结构与原理

电流互感器 (Current Transformer, CT) 的可以把数值较大的一次电流通过一定的电流比转换为数值较小的二次电流, 用来进行测量、保护、控制等。

1. 电流互感器结构

电流互感器实际上是一个降流变压器, 能把一次大电流变换成二次小电流。使用时, 将一次侧与被测电路串联, 二次侧与电流表串联, 如图 3-1a 所示。由于电流表的内阻一般都很小, 所以电流互感器在正常工作状态时, 接近于变压器的短路状态。

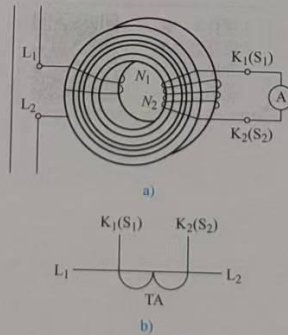


图 3-1 电流互感器的结构示意图和图形符号

a) 结构示意图 b) 图形符号

电流互感器的一次绕组串接到被测电路中, 对一次绕组的额定电流已进行了系列化规定, 有 $0.1 \sim 25000\text{A}$ 等不同规格; 二次绕组接到测量仪表, 其额定电流规定为 5A 或 1A ,

这样便于测量。

由于电流互感器是将大电流变成小电流，所以它的一次绕组的匝数远比二次绕组的匝数少。电流互感器的电路符号如图 3-1b 所示，一次绕组一般用一根直线表示，它的两个端钮分别标以 L_1 、 L_2 ，二次绕组相应的两个端钮分别标以 K_1 、 K_2 或 S_1 、 S_2 ，其中 L_1 和 K_1 (S_1)、 L_2 和 K_2 (S_2) 分别为同名端。

2. 电流互感器工作原理

电流互感器的工作原理与一般变压器的工作原理基本相同。当一次绕组中有电流 I_1 通过时，由一次绕组的磁动势 $I_1 N_1$ 产生的磁通绝大部分通过铁心而闭合。从而在二次绕组中感应出电动势 E_2 。如果二次绕组接有负载，那么，二次绕组中就有电流 I_2 通过，二次绕组的磁动势 $I_2 N_2$ 也产生磁通，其绝大部分也通过铁心闭合。因此，铁心中的磁通是一个由一、二次绕组的磁动势共同产生的合成磁通 Φ ，称为主磁通。根据磁动势平衡原理可以得到

$$K_{IN} = I_1 / I_2 = N_2 / N_1 \quad (3-1)$$

从式(3-1)可以看出，理想电流互感器两侧的电流大小和它们的绕组匝数成反比，该比值为常数 K_{IN} ，称为电流互感器的额定电流比。

由公式得

$$I_1 = K_{IN} I_2 \quad (3-2)$$

这是电流互感器的基本计算公式，根据式(3-2)可从电流互感器铭牌上标出的额定电流比 K_{IN} 及二次回路电流表的读数 I_2 ，计算出被测电流 I_1 。

3.1.2 电流互感器的主要参数

电流互感器的主要参数有以下 4 种。

1. 准确度等级

电流互感器的准确度等级是指在负载功率因数为额定值时，在规定的二次负载范围内，一次电流为额定值时的最大误差限值。根据国家标准，国产电流互感器的准确度等级按由高到低的顺序分为 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、3.0 和 10 共 9 个等级，而 0.01、0.02、0.05、0.1 级电流互感器主要用于精密测量或作为标准互感器用来检定低等级的电流互感器，0.2、0.5 级电流互感器常用于电能表计量，1.0 级电流互感器常与作为监视用的指示仪表连接，3.0、10 级电流互感器主要与继电保护配合使用。

2. 额定电压

电流互感器的额定电压是指其一次绕组对地或二次绕组长期能承受的最大绝缘电压值(有效值)，而不是指一次绕组两端所加的电压值。所以，电流互感器的额定电压只反映该电流互感器的绝缘水平，而与电流互感器的额定容量无关。当然，电流互感器的额定电压等级应与电网的额定电压等级一致，故所选的电流互感器的额定电压应与其安装处的电压等级相符。

3. 额定电流比 K_{IN}

电流互感器的一次额定电流 I_{1N} 与二次额定电流 I_{2N} 之比称为额定电流比 K_{IN} 。

4. 额定容量 S_N

电流互感器的额定容量是指电流互感器在最高准确度等级下, 运行于二次额定电流 I_{2N} 和额定负载 Z_{2N} 时, 二次侧所输出的视在功率。其表达式为

$$S_N = I_{2N}^2 Z_{2N} \quad (3-3)$$

电流互感器二次额定容量要大于实际二次负载, 实际二次负载应为二次额定容量的 25% ~ 100%。额定容量决定二次负载阻抗, 负载阻抗又影响测量或控制精度。负载阻抗主要受测量仪表和继电器线圈电阻、电抗、接线端子接触电阻、二次连接导线电阻的影响。

3.1.3 电流互感器的分类

根据不同的分类标准, 可将电流互感器分为以下不同类型。

1) 按用途可分为测量用电流互感器(在正常工作电流范围内, 向测量、计量等装置提供电网的电流信息)和保护用电流互感器(在电网故障状态下, 向继电保护等装置提供电网故障电流信息)。

2) 按绝缘介质可分为干式电流互感器、浇注式电流互感器、油浸式电流互感器和气体绝缘电流互感器。

3) 按电流变换原理可分为电磁系电流互感器和光电系电流互感器。

4) 按安装方式可分为贯穿式电流互感器(用来穿过屏板或墙壁的电流互感器)、支柱式电流互感器(安装在平面或支柱上, 兼做一次导体支柱用的电流互感器)、套管式电流互感器(没有一次导体和一次绝缘, 直接套装在绝缘套管上的一种电流互感器)和母线式电流互感器(没有一次导体但有一次绝缘, 直接套装在母线上使用的一种电流互感器)。

任务 3.2 认知电流表

知识目标

- 1) 认知电流表的分类。
- 2) 掌握电流表的选择和使用方法。

素养目标

- 1) 培养学生探究学习的能力。
- 2) 培养学生电工操作的职业素养。
- 3) 培养学生严谨的工匠精神。

知识课堂

3.2.1 电流表的分类

电流表 (Ammeter) 又称“安培表”，是用来测量交、直流电路中电流的仪表。在电路图中，电流表的符号为“ Ⓐ ”，直流电流表的符号要在 A 下加一个下划线“ — ”，交流电流表的符号要在 A 下加一个波浪线“ ~ ”。电流值以“安”或“A”为标准单位。

1) 根据被测电量的种类不同，电流表可分为直流电流表和交流电流表两大类。

① 直流电流表。用来测量直流电流，主要是采用磁电系电表的测量机构。

② 交流电流表。用来测量交流电流，主要是采用电磁系电表、电动系电表和整流式电表的测量机构。

2) 根据电流显示的方式不同可分为指针式电流表和数字式电流表两大类。

① 指针式电流表。把被测电流通过仪表的测量机构最终转化为指针的偏转角度，通过指针所在刻度盘的位置，读出电流的大小。

② 数字式电流表。数字式电流表分为单相数显电流表和三相数显电流表，该表具有变送、LED (或 LCD) 显示和数字接口等功能，通过对电网中各电参量的交流采样，以数字形式显示测量结果。经 CPU 进行数据处理，将三相 (或单相) 电流、电压、功率、功率因数、频率等电参量由 LED (或液晶) 直接显示，同时输出 0 ~ 5V、0 ~ 20mA 或 4 ~ 20mA 相应的模拟电量，与远程终端单元 (Remote Terminal Unit, RTU) 相连，并带有 RS-232 或 RS-485 接口。

3.2.2 电流表的使用

1. 合理选择电流表

1) 根据被测量准确度要求，合理选择电流表的准确度。电流表的准确度分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 个等级。一般地讲，0.1、0.2 级的电流表适用于标准表及精密测量中；0.5 ~ 1.5 级电流表适用于实验室的测量；1.0 ~ 5.0 级电流表适用于工矿企业中作为电气设备运行监测和电气设备检修。

2) 根据被测电流大小选择相应量限的电流表。量限过大会造成测量准确度下降，量限过小会造成电流表损坏。为充分利用仪表的准确度，应当按尽量使用标尺度后 1/4 段的原则选择仪表的量程。

3) 合理选择电流表内阻。电流表具有内阻，内阻越小，测量的结果越接近实际值。为了提高测量的准确度，应尽量采用内阻较小的电流表。

2. 测量前的检查

测量前，应检查电流表指针是否对准“0”刻度线。如果没对准，应调节调零器，使指针归零。

3. 电流表的使用

电流表的使用方法如下。

- 1) 将电流表必须串接在被测电路中。
- 2) 测量直流电流时, 电流表接线端的正“+”、负“-”极性不可接错, 否则可能损坏仪表, 电流表的正极接高电位端, 负极接低电位端; 测量交流电流时, 不需区分极性。
- 3) 应根据被测电流大小选择合适的量程。对于有两个量程的电流表, 它具有3个接线端, 使用时要看清接线端量程标记, 将公共接线端和一个量程接线端串接在被测电路中。对于多量程电流表, 在不知道被测电流多大的情况下, 可以从最大的电流量程开始逐渐减小量程试测。
- 4) 实际使用中, 在测量数值较大的交流电流时, 常借助于电流互感器来扩大交流电流表的量程。电流互感器二次额定电流一般设计为5A, 与其配套使用的交流电流表量程也应为5A。电流表指示值乘以电流互感器的电流比, 即为所测实际电流的数值。

4. 电流表的正确读数

读数时, 应让指针稳定后再进行读数, 并尽量保持视线与刻度盘垂直。如果刻度盘有反射镜, 应使指针和指针在镜中的投影重合, 以减小读数误差。在计算被测电流值时, 需要先计算出每一小格代表的电流数值(每一小格的电流数值也叫作分格常数, 等于电流量程除以刻度上的总格数), 再乘以指针偏转的格数, 就是被测的电流值。

综上, 在做实验探究的时候, 一定要保持严谨的态度, 在电流表量程的选择上要合适, 同时注意使用时的操作要规范。

任务 3.3 电流互感器配合电流表的操作

知识目标

- 1) 掌握电流互感器测量接线方法。
- 2) 掌握电流互感器测量电流的正确读数方法。

素养目标

- 1) 培养学生探究学习的能力。
- 2) 培养学生电工操作的职业素养。
- 3) 培养学生严谨的工匠精神。
- 4) 培养学生团队沟通协作的能力。

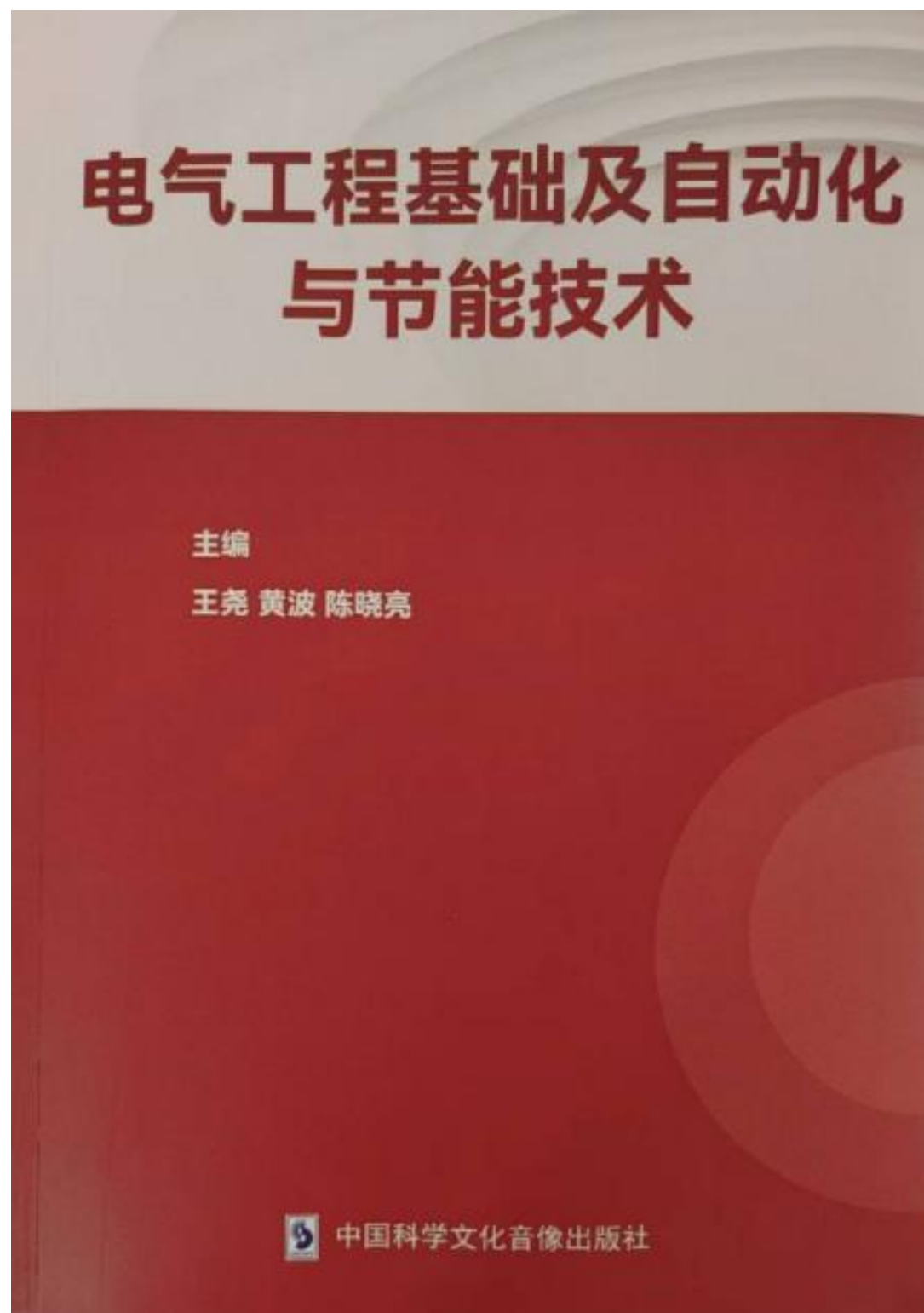
知识课堂

3.3.1 电流互感器的使用原则

电流互感器的接线应遵守如下串联原则。

- 1) 一次绕组应与被测电路串联, 二次绕组与所有仪表负载串联。电流互感器在使用时, 它的一次绕组应与待测电流的负载电路串联, 二次绕组则与电流表串接成闭合回路。

4. 《电气工程基础及自动化与节能技术》教材



作 者：王 尧 黄 波 陈晓亮
书 名：电气工程基础及自动化与节能技术
责任编辑：于 丽 张雅双
封面设计：白 洁

中国科学文化音像出版社有限公司出版

版 次：2024 年 3 月第 1 版

字 数：260 千字

ISBN 978-7-89550-374-8

版权所有 侵权必究

编者及工作单位

主 编

王 尧 河南邦泰合力管理咨询有限公司
黄 波 海洋石油工程股份有限公司
陈晓亮 中电(福建)电力开发有限公司

副主编

李增光 山东钢铁股份有限公司莱芜分公司能源动力厂
王胜国 武汉联动设计股份有限公司
孙显利 北明天时能源科技(北京)有限公司
冯 冰 宁夏银星发电有限责任公司
李 祥 内蒙古包头市固阳县生活污水处理站
苏刚刚 首钢长治钢铁有限公司焦化厂
孙爱芬 郑州电力职业技术学院

前 言

在科学领域中，电气工程是比较主要的学科，随着科学技术水平的不断提升，电气自动化技术也得到了迅猛的发展，其和各学科紧密联系在一起，通过渗透不同学科的理论，从而在诸多行业得到了广泛的应用。当前，电气系统更加丰富，呈现了体系化的状态，在电气系统传输过程中，借助于光纤设备，实现数据的传输，当利用了大量的光缆，连接电路的设备逐渐减少，因而节约了很多的电缆材料，对降低成本和能耗具有一定的意义。随着智能化时代的到来，电气自动化向智能化方向发展，将电子技术等予以融会贯通，数据采集的速度加快，也提升了电气自动化系统运行的稳定性和高效性。

随着时代的前进，社会经济的迅速发展，资源的耗费也在迅速增加。进入新世纪后，随着我国市场经济取得了迅速的发展，随着各种设备的不断增加与更新，能源费用也相应提高，能源供给缺口也相应出现，面对新的资源情况，人们就需要重新开发新的资源，以节省已有的资源，这就必须出台一系列相应的节能政策，以解决能源支出所遇到的困难。

本书旨在电气工程基础及自动化与节能技术的研究。在节能减排的社会背景下，为了促进电气工程自动化的可持续发展，必须将电气工程自动化节能设计作为主要目标，从而促进达到节能的效果，最终降低能量的损耗。

目 录

| | |
|-------------------------------|------------|
| 第一章 电气工程基础 | 001 |
| 第一节 电力系统 | 001 |
| 一、电气工程与电力系统的关系 | 001 |
| 二、电力系统的组成及其基本参量 | 002 |
| 三、电力系统中的发电厂 | 003 |
| 四、电力系统中的变电所 | 004 |
| 五、电能的传输及分配 | 005 |
| 第二节 电力系统发展简史及电力工业发展趋势 | 006 |
| 一、电力系统的形成和发展 | 007 |
| 二、我国电力工业的发展 | 008 |
| 三、电力工业发展趋势 | 010 |
| 第三节 电力系统的运行 | 014 |
| 一、电力系统运行的特点 | 014 |
| 二、电力系统运行的基本要求 | 015 |
| 第二章 电气设备工作原理及主接线 | 018 |
| 第一节 概述 | 018 |
| 一、电气主回路 | 018 |
| 二、主接线概述 | 018 |
| 三、电气设备操作常识 | 019 |
| 第二节 高压开关电器 | 019 |
| 一、电弧产生和熄灭的机理 | 020 |
| 二、高压断路器 | 022 |
| 三、高压隔离开关 | 023 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 四、高压负荷开关 | 024 |
| 第三节 高压熔断器 | 024 |
| 一、高压管式熔断器 | 024 |
| 二、高压跌落式熔断器 | 025 |
| 第四节 互感器 | 025 |
| 一、互感器概述 | 025 |
| 二、电流互感器与光电式互感器 | 026 |
| 第五节 电气主接线 | 028 |
| 一、主接线的基本形式 | 028 |
| 二、发电厂和变电站的典型主接线图 | 039 |
| 第三章 电气工程运行维护基本技术技能 | 041 |
| 第一节 电气工程安装调试技术 | 041 |
| 一、技术要点 | 041 |
| 二、主要作业内容 | 043 |
| 第二节 运行维护基本技术技能 | 044 |
| 一、变配电装置运行维护通用技术技能 | 044 |
| 二、弱电系统及装置 | 053 |
| 第三节 运行维护相关基本技术、技能 | 058 |
| 一、钳工基本操作技术、技能 | 058 |
| 二、吊装运输基本技术、技能 | 061 |
| 第四章 电气自动化控制技术 | 062 |
| 第一节 电气自动化基本理论 | 062 |
| 一、自动化系统组成与工作原理 | 062 |
| 二、自动化系统中常见的设备与器件 | 066 |
| 第二节 电气自动化的发展 | 068 |
| 一、自动化的沿革 | 068 |
| 二、电气自动化的发展与进步 | 071 |
| 第三节 电气自动化控制技术分析 | 073 |
| 一、电气自动化控制技术的特点 | 073 |
| 二、工厂中电气自控技术的主要功能 | 074 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 三、电气自动化控制技术存在问题 | 078 |
| 第五章 PLC 的基本知识 | 082 |
| 第一节 PLC 的产生与发展 | 082 |
| 一、可编程序控制器 (PLC) 产生与发展 | 082 |
| 二、可编程序控制器 (PLC) 研究现状 | 084 |
| 三、可编程序控制器发展趋势 | 085 |
| 第二节 PLC 的特点及分类 | 090 |
| 一、PLC 的特点 | 090 |
| 二、PLC 的分类 | 091 |
| 第三节 PLC 的主要技术指标和应用场合 | 092 |
| 一、PLC 主要技术指标 | 092 |
| 二、可编程序控制器应用场合 | 093 |
| 第四节 PLC 的基本结构、工作原理和编程语言 | 095 |
| 一、PLC 的基本结构 | 095 |
| 二、PLC 的工作原理 | 097 |
| 三、PLC 的编程语言 | 097 |
| 四、基本逻辑指令的编程规则与技巧 | 098 |
| 五、PLC 控制的常用编程方法 | 101 |
| 第六章 电气自动化控制系统的设计思想和构成 | 104 |
| 第一节 电气自动化控制系统设计的功能和要求 | 104 |
| 一、电控系统的设计与调试要求 | 104 |
| 二、设计过程中应重视的装备功能及要求 | 105 |
| 第二节 电气自动化控制系统设计的简单示例分析 | 108 |
| 一、分析电气控制系统的方法与步骤 | 108 |
| 二、普通车床的电气控制系统设计分析 | 110 |
| 三、卧式铣床的电气控制系统设计分析 | 110 |
| 第三节 电气自动化控制系统中的抗干扰设计 | 112 |
| 一、电磁干扰形成的条件 | 112 |
| 二、干扰源 | 112 |
| 三、提高系统抗电源干扰能力的方法 | 113 |

| | |
|---|------------|
| 四、几种抗干扰接地技术 | 114 |
| 第七章 电气自动化技术的应用实例研究 | 117 |
| 第一节 电气自动化技术在工业领域的具体应用研究 | 117 |
| 一、电气自动化技术在工业领域的应用现状 | 117 |
| 二、电气自动化技术在工业领域应用的发展策略 | 118 |
| 三、电气自动化技术在工业领域应用的意义 | 119 |
| 四、电气自动化技术在工业领域的应用实例 | 120 |
| 五、工业电气自动化技术的应用改革 | 120 |
| 第二节 电气自动化技术在电力系统的具体应用研究 | 121 |
| 一、概述 | 121 |
| 二、电气自动化技术在电力系统应用的发展方向 | 122 |
| 三、电气自动化技术在电力系统的发展趋势 | 122 |
| 四、电气自动化技术在电力系统中的应用 | 123 |
| 第三节 电气自动化技术在建筑领域的具体应用研究 | 126 |
| 一、电气自动化技术在建筑领域的应用介绍 | 126 |
| 二、电气自动化技术在建筑领域应用的优势 | 127 |
| 三、电气自动化技术在建筑领域的应用 | 127 |
| 第四节 电气自动化技术在煤矿生产领域的具体应用研究 | 132 |
| 一、电气自动化技术在煤矿生产领域的应用现状 | 132 |
| 二、电气自动化技术在煤矿生产领域的应用展望 | 133 |
| 第五节 电气自动化技术在汽车制造与汽车驾驶领域的具体应用研究 | 134 |
| 一、电气自动化技术在汽车制造领域的应用 | 134 |
| 二、电气自动化技术在汽车驾驶领域的应用 | 135 |
| 第八章 电气自动化工程中的智能化 | 138 |
| 第一节 概述 | 138 |
| 一、智能化技术相关概述 | 138 |
| 二、智能化技术在电气自动化中的应用 | 139 |
| 第二节 智能化技术的特点和趋势 | 139 |
| 一、智能化技术的特点 | 139 |
| 二、智能化技术的发展趋势 | 139 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第三节 智能化电气的应用 | 142 |
| 一、智能化技术在电气中的应用分析 | 142 |
| 二、智能电气自动化工程的应用 | 143 |
| 第四节 电器智能化 | 167 |
| 一、电器智能化的发展 | 167 |
| 二、智能电器模块化 | 168 |
| 第九章 输配电系统节能技术 | 175 |
| 第一节 输配电系统 | 175 |
| 一、概述 | 175 |
| 二、输配电系统节能发展趋势 | 176 |
| 第二节 供配电系统的节能方法与措施 | 179 |
| 一、减少输电线路损耗的方法与措施 | 179 |
| 二、减少输电线路运行中损耗的方法与措施 | 180 |
| 三、配电变压器的节能技术 | 181 |
| 第三节 供配电系统的谐波抑制技术 | 183 |
| 一、谐波的危害 | 183 |
| 二、谐波抑制技术 | 185 |
| 三、谐波抑制的效益 | 187 |
| 四、关于谐波标准与规定 | 188 |
| 第十章 电气照明装置及节能 | 189 |
| 第一节 照明方式和种类 | 189 |
| 一、照明方式 | 189 |
| 二、照明种类 | 190 |
| 第二节 常用电光源和灯具 | 191 |
| 一、电光源分类 | 191 |
| 二、常用电光源 | 192 |
| 三、灯具 | 193 |
| 第三节 电气照明基本线路 | 195 |
| 第四节 照明灯具安装 | 197 |
| 一、普通灯具安装 | 197 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 二、装饰灯具安装 | 200 |
| 三、建筑物景观照明灯、航空障碍标志灯和庭院灯安装 | 201 |
| 第五节 照明光照节能 | 204 |
| 一、照明节能评价指标 | 204 |
| 二、照明节能措施 | 204 |
| 结 语 | 206 |
| 参考文献 | 207 |

第四章 电气自动化控制技术

随着现阶段各行业的发展，电气自动化控制技术作为一门新型技术，已经被广泛应用于这些行业中。电气化自动控制化技术的引入，实现了工业化管理，节省了劳动力，进而提高了生产效率，提高产品质量，为工厂带来了极大的经济效益。

第一节 电气自动化基本理论

本节以建筑领域为例，介绍电气自动化系统的组成工作原理及常见设备等。

一、自动化系统组成与工作原理

建筑设备自动化系统是一个自动控制系统，系统针对每个被控参数都设有传感器、执行器和现场控制器三类设备。该系统在运行时，首先通过传感器对被控参数进行测量，得出的电信号送入控制器和设定值比较，控制器根据两者的差值、依据被控参数的特性，按一定的调节规律发出调节命令，调节命令传送给执行器，再由执行器对被控参数进行控制和调整，使被控参数满足要求。

(一) 建筑设备电气自动化系统组成

随着社会水平不断提高，人类在逐渐地突破自然的限制，建筑物的层数不断地增高。随着人们对于建筑物本身要求的增多，建筑物内部各项设施的要求也随之增高。特别是对建筑物内的电气设备而言，目前在高层建筑中，其电气体系主要包括以下几部分：受电设备、馈电设备、照明设备、动力设备、消防设备、电梯设备、空调设备、给排水设备、通风设备。

高层建筑的电气控制系统是相当复杂的，如何能使各个系统安全、智能、有序、节能地运行。优秀的设计与智能化的监控、管理，能使人类的生活环境发生巨大的改变，同时会对人类的生活方式产生重大的影响。

我国住房和城乡建设部颁布了《建筑设计防火规范》，在这个规范中，对什么是高层建筑做出了明确的说明：居民住宅楼房高于27m的，或者公共建筑物高于24m的，都被视为高层建筑。由此可见，未来高层楼宇建筑将成为主要建筑类型。高层楼宇在

为人们带来方便的同时，也给各种电气设备系统的运行提出了较高的要求。为了配合高层楼宇内各种电气设备的顺利运行，需要一个强大的控制系统作为协调机制中枢。

随着科学技术水平的不断提高，在高层建筑物内实现对复杂电气设备的控制已不再具有任何的挑战，特别是对建筑物内电气节能方面的研究已十分成熟。进入21世纪以后，能源缺乏问题越来越突出，而城市高层楼宇的能源消耗却日益加剧，因此要从多个方面进行建筑电气节能控制。

高层楼宇能源消耗，主要集中在各类电机设备运行过程中产生。因此，高层楼宇的建筑电气节能要根据不同电机设备的运行情况进行调整。利用自动化控制技术既要满足建筑物日常需求，也要符合不浪费能源的要求。如今，对电气设备节能的研究主要集中在对设备数据的处理以及对设备的控制上。

电能是办公综合体消耗的主要能源，常用的高层楼宇建筑物电气控制系统主要通过全楼宇的照明、低压配电系统、空调、办公设备等对象的监控，达到节能效果。

目前的建筑设备自动化系统一般使用两级网、四级控制装置的集散控制结构，系统由中央监控计算机、主控制器、现场控制器和通信网络组成，现场控制器负责对各建筑设备进行实时监控，中央监控计算机则通过网络与现场控制器交换信息。

1. 两级网

两级网由一级网络与二级网络组成。一级网就是一般的局域网，通常采用10Mbit/s，100Mbits Ethernet网或25Mbits ARCnet网。二级网一般采用的是标准总线方式。二级网是一种工业控制总线，通信速率是19.2kbits或9.6kbit/s。

2. 四级控制装置

第一级控制装置为中央监控计算机，它和各种设备如控制终端、大型显示屏、文件服务器、打印机等连接在一级网上，构成计算机系统。

在一级网与二级网之间接有若干个主控制器，负责协调第一级控制装置与第三级现场控制器之间的动作，实现一级网与二级网的通信，主控制器存储各现场控制器的数据，并发出报警等信息。

现场控制器连接在二级网上，这是一种现场控制设备，其中具有CPU卡、通信卡、开关量I/O卡和模拟量I/O卡。可以对现场信号进行采集、处理、控制、输出执行，并通过主控制器与上位管理计算机交换信息。现场控制器有通用的，也有专用的，如空调控制器、照明控制器等，可以根据不同的被控对象方便灵活地选择。

第四级控制装置为安装在建筑设备基础上的传感器与执行器，它们通过IO口与现场控制器连接。

上面这种结构形式使用灵活，有的系统将中央监控计算机直接和现场控制器一起连接到控制总线上，它们中间没有主控制器，现场控制器之间通信可以实现点对点，

从而保证了现场控制器的独立工作能力。

(二) 建筑设备电气自动化系统功能

1. 自动控制、监视、显示各种机电设备的启动与停止

如在制冷监控系统中,可以控制、监视冷却泵、冷冻泵的运行状态,并在中央监控计算机上显示。

2. 自动检测、显示各种设备的运行参数及其变化趋势和历史数据

如在供配电监控系统中,可以监视、存储系统的供电电压、电流、功率因素等参数,当参数超出设定值时,还可以自动实现越线报警。

3. 检测并及时处理各种意外突发事件

如在空气处理系统中,如果检测风机因故障无法运行,则可以采取措施,将系统中的风阀、电动调节阀等关闭。

4. 根据外界条件变化自动调节各种设备始终运行在最佳状态

如在制冷监控系统中,可以根据冷负荷的情况,自动调节制冷机组的运行数量,自动优化到既节约能源又感觉舒适的最佳状态。

5. 实现对大楼内各种机电设备的统一管理、协调控制

如火灾发生时,不仅消防系统立即自动启动、投入运行,而且整个建筑内所有有关系统都将自动转化方式,协同工作,配电系统自动停止使用,出入口控制系统自动发出信号,打开大门,供人们紧急疏散,整个建筑设备自动化系统将自动实现一体化的协调运转,以使火灾损失降低到最小。

6. 能源与设备管理

如系统可以对水、电、燃气等进行计量与收费,实现能源管理自动化。系统也可以建立设备档案,收集设备运行数据,形成设备运行报表,根据报表提示设备的维护与管理。

(三) 高层建筑电气系统节能控制管理目标体系

1. 建筑电气设备研究的重点

对系统运行的复杂性、执行任务的准确性和节能的经济性等多方面综合考虑,要将先进的控制装置部署在建筑物的电气设备上,对大型空调、照明、电梯等电能主要消耗设备进行综合控制,既达到减少电能损失的目的,同时又实现对设备的自动化管理。为了提高整个建筑物的节能综合效率,需要通过智能优化方法合理配置电能的控制,并选择合适的电机设备,从系统运行状态入手不断调整设备的电能利用率。一方面要兼顾设备设计功耗下的使用效果,另一方面还要针对电气设备中各机电系统的相互配合效率,通过充分调动整个建筑物的综合运行配合功能,实现建筑物电气控制的智能化发展,在保证系统工作稳定、准确的同时,提高系统的运行效率。

2. 对建筑物电气进行节能控制的目的

目的：采用创新的设计理念，实现对建筑物内的全部电气设备的综合管理和控制；实现基于节能目标的设备运行效率优化方法，实现对各种耗电设备的高效节能控制。

(1) 空调系统节能

不管建筑物是作何种用途，空调系统的耗电都是建筑物的主要设备，所占的比例都在40%~60%，空调系统的运行几乎是全天候的，为的是保证高层楼宇内部的舒适性。

(2) 照明系统节能

通常建筑节能控制在照明系统方面的研究较多，这主要与照明系统的灵活控制性有关，同时，城市峰谷电价的差异性、环境变化对照明的影响等问题，都为照明节能带来了新的课题。例如，根据用户动态需求自动调节照明功率等。对大型建筑物节能也提供了很多更具有灵活性和多样性的解决方案。

(3) 电梯、供水和排水系统

电梯、供水和排水系统的运行都需要电机为其提供动力支持。所以电梯、给排水系统的能耗都是来自电动机工作时的电能损失，控制模式单一且容易实现，只要使得电动机维持在平衡的输入和输出状态即可。只有找出使系统达到最优的运行条件的参数，才能降低能耗，实现节能。

3. 建筑电气节能控制的长期目标

电气节能控制是长期的，并存在于整个高层建筑的使用周期。而且电气节能控制在不同的建筑中都有体现。同时也会涉及不同的参与者，比如说设计者、建设者、房主、物业管理等。

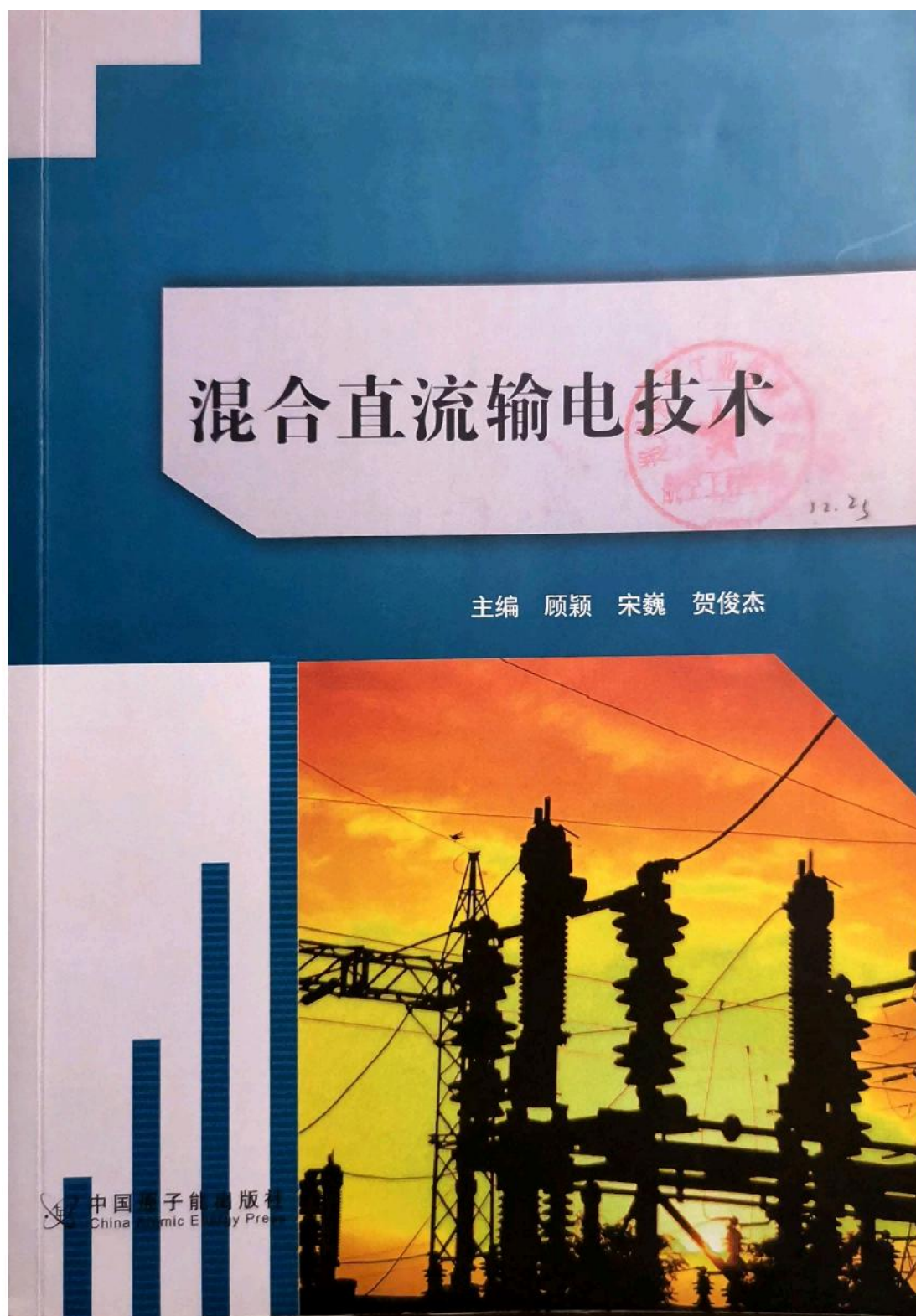
(1) 经济目标

和普通建筑相比，高层建筑对建筑成本的需求有所提高。为了体现出高层建筑物功能的全面性，就要设置相应的设备，设备多了，能耗自然就大。能耗的增加不但使开发商投资增加，还使得购买者望而却步。特别是在能源极度短缺的今天，极大地限制了高层建筑的发展。所以，只有当高层建筑真正实现了电气设备的节能，使得高层建筑的运行成本维持在较低的水平，才能使高层建筑物的功能发挥出来，真正地提高人们的生活舒适性和工作效率。同时也能为国家节约能源。

(2) 技术目标

高层建筑电气节能技术会涉及很多的专业，比如说计算机专业、数学专业、材料专业、化工专业、建筑专业等。对高层建筑电气设备节能技术的研究，不但能够推动本行业的发展，同时对其他行业也能产生很强的带动作用，总之，是有利于社会的进步和发展的。

5. 《混合直流输电技术》教材



普通高等教育“十三五”规划教材

混合直流输电技术

主 编 顾 颖 宋 巍 贺俊杰
副主编 李 响

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混合直流输电技术 / 顾颖, 宋巍, 贺俊杰主编.
—北京: 中国原子能出版社, 2018.6
ISBN 978-7-5022-9143-3

I. ①混… II. ①顾… ②宋… ③贺… III. ①混合
输电—直流输电—输电技术 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第138852号

混合直流输电技术

出版发行 中国原子能出版社 (北京海淀区阜成路 43 号 100048)

策划编辑 蒋焱兰 邮箱: ylj44@126.com QQ: 41914873

责任编辑 李新邦

特约编辑 刘 锋 陶 源

印 刷 北京市迪鑫印刷厂

经 销 全国各地新华书店

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 7.25

字 数 160 千字

版 次 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-9143-3

定 价 32.00 元

网 址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

目 录

| | |
|--|-----|
| 第一章 导论 | 1 |
| 第一节 研究目的与意义 | 1 |
| 第二节 柔性直流输电国内外研究及应用动态 | 3 |
| 第三节 高压直流电网的研究综述 | 6 |
| 第二章 高压直流输电系统基本原理 | 19 |
| 第一节 VSC-HVDC的优点与技术特点 | 19 |
| 第二节 一端LCC一端VSC的混合直流输电系统结构分析 | 28 |
| 第三节 STATCOM的LCC—HVDC系统结构 | 33 |
| 第四节 轻型直流输电的基本原理及应用 | 39 |
| 第五节 并联混合多馈入直流输电系统结构分析 | 49 |
| 第三章 并联混合多馈入直流输电系统的运行特性 | 55 |
| 第一节 LCC-HVDC的运行特性 | 55 |
| 第二节 VSC-HVDC的运行原理与控制策略 | 57 |
| 第三节 并联混合双馈入系统的控制策略和稳态特性 | 65 |
| 第四节 传统双馈入和并联混合双馈入系统的对比分析 | 67 |
| 第五节 交直流混合配电网的运行模式和协调控制方法 | 86 |
| 第四章 并联混合双馈入系统中VSC-HVDC对LCC-HVDC的影响 | 92 |
| 第一节 视在短路比增加量(AISCR)的提出与增加 | 93 |
| 第二节 混合双馈入直流系统中VSC-HVDC对LCC-HVDC受端 系统强度的影响 | 99 |
| 第三节 LCC与VSC型直流馈入对弱受端电网特性的影响 | 101 |
| 参考文献 | 110 |

第三章 并联混合多馈入直流输电系统的运行特性

第一节 LCC-HVDC 的运行特性

一、数学模型

传统的 LCC-HVDC 输电系统经历了几十年的发展与实际运行验证, 相关技术已颇为成熟。它的基本原件是 12 脉动换流器, 由交流侧的两个 6 脉动换流器串联而成, 该结构可滤除交、直流侧大部分的 $1n12$ 次谐波。由于 LCC-HVDC 系统的换流器件采用了不可自关断的晶闸管, 导致它的正常运行离不开两侧的交流系统, 而逆变侧对交流系统的依赖更为突出, 因此只针对逆变侧建立了数学模型, 如图 3-1 所示。

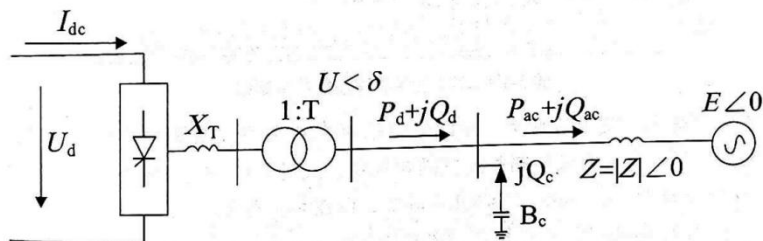


图 3-1 LCC-HVDC 逆变器模型

二、CIGRE 标准测试模型下的控制策略及运行特性

1. CIGRE 标准测试模型及其系统参数

CIGRE 直流输电标准测试系统的原型是一个海底电缆直流输电系统, 它的主要目的是对不同直流控制设备和控制策略进行性能比较, 具有普遍适用性, 同时也用以考核各种仿真工具对直流输电系统模拟的精确度, 其结构如图 3-2 所示。

未能恢复阻断能力,或反向电压期间换向过程未能完成,这两种情况在阀转为正向时,被换相的阀都将向原来预定退出的阀倒换相,这种情况称之为换相失败。由于整流侧的阀在电流关断后处于反向电压的时间较长,因此直流输电系统中大部分换相失败都发生在逆变器上。直流输电系统需要交流系统提供换相电流,也就是相间短路电流,因此为了保证换向过程的顺利完成,受端交流系统必须具有足够的容量,即足够的短路比 SCR,由此可见,当受端连接交流系统强度不够时,更加容易发生换流失败。短路比是衡量交流系统强弱的一个重要指标,其定义为换流站交流侧母线的短路容量与直流额定输送功率的比值,其值越大,交流系统越强,一般短路比小于 3 即认为是弱系统。

为分析不同短路比对换相失败的影响,现调整 CIGRE 标准直流测试模型逆变侧的参数,使短路比分别为 3.0 和 2.0,在系统运行至 1 s 时,于逆变侧换流母线处设置一持续 0.1 s 的三相短路故障,接地电阻为零。

由仿真结果可见,受端交流系统的强弱会对 LCC-HVDC 运行特性产生较大影响。当短路比为 2.0 时,交流系统较弱,不足以提供足够无功,因此换流站在故障消除后不能恢复正常运行状态,即换流失败;而当短路比升至 3.0 时,系统经历短暂的波动后即可顺利恢复原来的工作状态。该仿真示例也验证了基于 LCC 换流器的直流输电系统对所连接系统强弱有一定要求的特点,因此为了向弱交流系统及无源系统供电,必须借助基于 VSC 换流器的柔性直流输电技术。

第二节 VSC-HVDC 的运行原理与控制策略

一、VSC-HVDC 的运行原理

1. 稳态工作原理及特性

VSC-HVDC 与传统 LCC-HVDC 结构上最大的差异在于换流器,其他区别也均源于换流器的不同特性。柔性直流输电系统的三相拓扑结构如图 3-4 所示,其核心器件为电压源换流器 VSC。其他元件还包括支撑电容、电抗器、交流滤波器、变压器等。

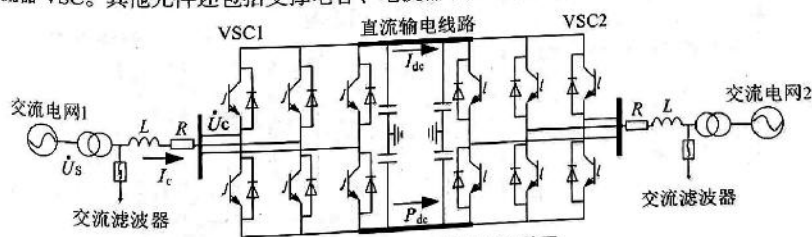


图 3-4 VSC-HVDC 系统三相拓扑图