



住房和城乡建设部“十四五”规划教材

# 建筑电气 工程

JIANZHU DIANQI  
GONGCHENG

主 编 李 云 周友初 刘志新

副主编 张艳梅 李 熙 李界华 项 林

主 审 邓雪峰



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

·长沙·

## 内容简介

本书共分为6个模块，有14个项目，41个任务。模块一为建筑电气及电工基础知识，包括建筑电气概述，电工技术基础知识；模块二为常用低压电气设备及其控制电路，包括电气设备的功能及选择原则，常用低压电气设备，控制电路；模块三为变配电工程，包括建筑供配电系统；模块四为照明工程，包括照明系统，照明工程图的识读；模块五为建筑电气安全，包括建筑物防雷及接地系统，电气安全与防护；模块六为建筑智能化系统，包括智能建筑及综合布线，消防系统，安防系统，信息通信系统。

本书以14个项目设计教学目标，突出模块化、项目化、工学结合特点；引入思政元素，知识目标、能力目标和素质目标，三维目标明确，体现职业教育特点；案例引入，任务驱动，可操作性，实用性强。每个项目都附带有大量的相关最新规范、图片、语音和视频资料，通过扫二维码即可获得，方便读者知识拓展和教学，也体现了教育信息化的特点。

本书适用于建筑装饰工程技术专业、建筑工程技术专业、建筑电气工程技术专业、建筑设备工程技术专业、消防工程技术专业、建筑工程管理专业、市政工程技术专业等专业的课程教学，也可作为在职职工的岗位培训教材，亦可作为建筑工程技术人员的参考用书。



---

## 高职高专土建类“十四五”规划“互联网+”创新系列教材 编审委员会

---

### 主任

(按姓氏笔画为序)

王运政 王小冰 刘 霁 刘孟良 宋国芳 郑 伟  
赵 慧 赵顺林 胡六星 彭 浪 谢建波 颜 昕

### 副主任

(按姓氏笔画为序)

向 曙 庄 运 刘文利 刘可定 刘锡军 孙发礼  
李玲萍 李 娟 胡云珍 徐运明 黄桂芳 黄 涛

### 委员

(按姓氏笔画为序)

万小华 王四清 卢 滔 叶 姝 吕东风 伍扬波  
刘 靖 刘小聪 刘可定 刘汉章 刘旭灵 刘剑勇  
许 博 阮晓玲 阳小群 孙湘晖 杨 平 李 龙  
李 奇 李 侃 李 鲤 李亚贵 李延超 李进军  
李丽君 李海霞 李清奇 李鸿雁 肖飞剑 肖恒升  
何 珊 何立志 何奎元 宋士法 张小军 张丽妹  
陈 晖 陈 翔 陈贤清 陈淳慧 陈婷梅 林孟洁  
欧长贵 易红霞 罗少卿 周 伟 周 晖 周良德  
项 林 赵亚敏 胡蓉蓉 徐龙辉 徐运明 徐猛勇  
高建平 黄光明 黄郎宁 曹世晖 常爱萍 彭 飞  
彭子茂 彭仁娥 彭东黎 蒋 荣 蒋建清 喻艳梅  
曾维湘 曾福林 熊宇璟 魏丽梅 魏秀瑛



# 出版说明 INSTRUCTIONS

为了深入贯彻党的十九大精神和全国教育大会精神，落实《国家职业教育改革实施方案》（国发〔2019〕4号）和《职业院校教材管理办法》（教材〔2019〕3号）有关要求，深化职业教育“三教”改革，全面推进高等职业院校土建类专业教育教学改革，促进高端技术技能型人才的培养，依据国家高职高专教育土建类专业教学指导委员会高等职业教育土建类专业教学基本和国家教学标准及职业标准要求，通过充分的调研，在总结吸收国内优秀高职高专教材建设经验的基础上，我们组织编写和出版了这套高职高专土建类专业规划教材。

高职高专教学改革不断深入，土建行业工程技术日新月异，相应国家标准、规范，行业、企业标准、规范不断更新，作为课程内容载体的教材也必然要顺应教学改革和新形式的变化，适应行业的发展变化。教材建设应该按照最新的职业教育教学改革理念构建教材体系，探索新的编写思路，编写出版一套全新的、高等职业院校普遍认同的、能引导土建专业教学改革的系列教材。为此，我们成立了规划教材编审委员会。规划教材编审委员会由全国30多所高职院校的权威教授、专家、院长、教学负责人、专业带头人及企业专家组成。编审委员会通过推荐、遴选，聘请了一批学术水平高、教学经验丰富、工程实践能力强的骨干教师及企业专家组成编写队伍。

本套教材具有以下特色：

1. 教材符合《职业院校教材管理办法》（教材〔2019〕3号）的要求，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，注重立德树人，在教材中有机融入中华优秀传统文化、四个自信、爱国主义、法治意识、工匠精神、职业素养等思政元素。

2. 教材依据教育部高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》及国家教学标准和职业标准（规范）编写，体现科学性、综合性、实践性、时效性等特点。

3. 体现“三教”改革精神，适应高职高专教学改革的要求，以职业能力为主线，采用行动导向、任务驱动、项目载体，教、学、做一体化模式编写，按实际岗位所需的知识能力来选取教材内容，实现教材与工程实际的零距离“无缝对接”。

4. 体现先进性特点，将土建学科发展的新成果、新技术、新工艺、新材料、新知识纳入教材，结合最新国家标准、行业标准、规范编写。

5. 产教融合，校企双元开发，教材内容与工程实际紧密联系。教材案例选择符合或接近真实工程实际，有利于培养学生的工程实践能力。

6. 以社会需求为基本依据，以就业为导向，有机融入“1+X”证书内容，融入建筑企业岗位(八大员)职业资格考试、国家职业技能鉴定标准的相关内容，实现学历教育与职业资格认证的衔接。

7. 教材体系立体化。为了方便教师教学和学生学习，本套教材建立了多媒体教学电子课件、电子图集、教学指导、教学大纲、案例素材等教学资源支持服务平台；部分教材采用了“互联网+”的形式出版，读者扫描书中的二维码，即可阅读丰富的工程图片、演示动画、操作视频、工程案例、拓展知识等。

高职高专土建类专业规划教材

**编审委员会**

# 前言 PREFACE

本书共分为6个模块,有14个项目,41个任务。以14个项目为细化目标,突出模块化、项目化、工企结合特点;引入思政元素,知识目标、能力目标和素质目标,三维目标明确,理论教学与技能训练相结合,体现职业教育特点;案例引入,任务驱动,可操作性,实用性强。每个项目都附带有大量的相关最新规范、图片、语音和视频资料,通过扫二维码即可获得,方便读者知识拓展和教学,也体现了教育信息化的特点。本书主要内容:模块一为建筑电气及电工基础知识,包括建筑电气概述,电工基础知识;模块二为常用低压电气设备及其控制电路,包括电气设备的功能及选择原则,常用低压电气设备,控制电路;模块三为变配电工程,包括建筑供配电系统;模块四为照明工程,包括照明系统,照明工程图的识读;模块五为建筑电气安全,包括建筑物防雷及接地系统,电气安全与防护;模块六为建筑智能化系统,包括智能建筑及综合布线,消防系统,安防系统,信息通信系统。

本书由湖南城建职业技术学院李云、周友初和刘志新任主编,由武汉城市职业学院建筑工程学院张艳梅、湖南城建职业技术学院李界华、湖南省第三工程有限公司李熙和长沙南方职业学院建筑工程系项林任副主编,李云负责全书的构思、组稿、统稿和部分编写工作。其中:模块一、模块二由刘志新、李云和郴州职业技术学院李丽田编写;模块三、模块四由周友初、项林和湖南城建职业技术学院陈柱慧编写;模块五由张艳梅和长沙高级技工学校关新编写;模块六由李界华和林爱晖编写;由湖南城建职业技术学院邓雪峰教授担任主审。

本书编写过程中参阅和借鉴了大量同行相关资料,在此向提供这些资料的同仁道谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥与错误之处,恳请读者和同行批评指正。

编者

2021年9月



# 目 录 CONTENTS

## 模块一 建筑电气及电工基础知识

项目 1 建筑电气概述	(3)
任务 1 建筑电气系统的组成与分类	(3)
1.1.1 建筑电气及其发展	(3)
1.1.2 建筑电气系统的组成	(4)
1.1.3 电力系统与建筑电气系统	(4)
1.1.4 建筑电气设备	(5)
任务 2 建筑电气设计及施工的基本内容	(6)
1.2.1 建筑电气设计与相关单位间的协调	(6)
1.2.2 建筑电气设计与其他专业设计间的协调	(7)
1.2.3 建筑电气施工的程序及要求	(7)
任务 3 建筑电气课程性质、要求和学习方法	(9)
1.3.1 建筑电气课程性质、要求	(9)
1.3.2 建筑电气课程的学习方法	(9)
小结	(10)
技能训练	(10)
思考与练习题	(10)
项目 2 电工技术基础知识	(11)
任务 1 电路的基本概念及其基本定律	(12)
2.1.1 电路和电路模型	(12)
2.1.2 电路的基本物理量	(13)
2.1.3 电路的工作状态	(16)
2.1.4 电阻和欧姆定律	(17)
2.1.5 基尔霍夫定律	(18)
2.1.6 电阻的串联、并联	(21)
任务 2 正弦交流电路及其基本分析方法	(23)

2.2.1 单相交流电路 .....	(23)
2.2.2 三相交流电路 .....	(33)
2.2.3 功率因数及其改善的方法 .....	(39)
小结 .....	(40)
技能训练 .....	(41)
思考与练习题 .....	(42)

## 模块二 常用低压电气设备及其控制电路

<b>项目 3 电气设备的功能及选择原则 .....</b>	<b>(47)</b>
任务 1 电气设备的功能 .....	(47)
3.1.1 电气设备的分类 .....	(47)
3.1.2 常见的低压电气设备的主要种类及用途 .....	(48)
任务 2 电气设备的选择原则 .....	(50)
3.2.1 按正常工作条件选择 .....	(50)
3.2.2 按短路工作条件选择 .....	(50)
3.2.3 按使用环境条件选择 .....	(51)
小结 .....	(51)
技能训练 .....	(51)
思考与练习题 .....	(52)
<b>项目 4 常用低压电气设备 .....</b>	<b>(53)</b>
任务 1 低压断路器 .....	(53)
4.1.1 低压断路器工作原理 .....	(53)
4.1.2 低压断路器的分类 .....	(54)
4.1.3 低压断路器的基本特性参数 .....	(57)
4.1.4 断路器的一般选用原则 .....	(58)
任务 2 接触器 .....	(59)
4.2.1 接触器结构及参数 .....	(59)
4.2.2 接触器的选择 .....	(60)
任务 3 热继电器 .....	(60)
4.3.1 热继电器结构及参数 .....	(60)
4.3.2 热继电器的选择 .....	(61)
任务 4 低压配电装置 .....	(61)
4.4.1 低压配电装置的分类及配电等级 .....	(61)
4.4.2 低压配电装置的结构 .....	(62)

4.4.3 低压保护装置 .....	(65)
4.4.4 电度表及接线方式 .....	(65)
任务5 变压器 .....	(66)
4.5.1 变压器的基本结构和工作原理 .....	(66)
4.5.2 变压器的运行特性 .....	(68)
4.5.3 特种变压器 .....	(70)
4.5.4 变压器的安装准备及运行 .....	(72)
任务6 电动机 .....	(74)
4.6.1 三相异步电动机的基本结构 .....	(74)
4.6.2 工作原理 .....	(75)
4.6.3 三相异步电动机的特性 .....	(77)
4.6.4 异步电动机的铭牌及技术参数 .....	(79)
4.6.5 异步电动机的启动、调速及制动 .....	(80)
小结 .....	(82)
技能训练 .....	(82)
思考与练习题 .....	(83)
<b>项目5 控制电路 .....</b>	<b>(85)</b>
任务1 电动机的基本控制电路 .....	(85)
5.1.1 三相异步电动机启停控制 .....	(85)
5.1.2 三相异步电动机正反转控制 .....	(88)
任务2 建筑设备控制电路案例 .....	(91)
5.2.1 混凝土搅拌机 .....	(91)
5.2.2 高位水箱给水方式的电气控制 .....	(92)
小结 .....	(93)
技能训练 .....	(94)
思考与练习题 .....	(95)

## 模块三 变配电工程

<b>项目6 建筑供配电系统 .....</b>	<b>(99)</b>
任务1 变配电所的结构 .....	(99)
6.1.1 变配电所的设置 .....	(99)
6.1.2 变配电所的结构 .....	(101)
任务2 建筑供配电的负荷计算 .....	(104)
6.2.1 计算负荷的意义 .....	(104)

6.2.2	负荷计算的方法 .....	(104)
6.2.3	负荷计算原则 .....	(104)
6.2.4	用电设备额定容量的确定 .....	(104)
6.2.5	负荷计算 .....	(106)
任务3	建筑供配电系统无功功率的补偿 .....	(111)
6.3.1	提高功率因数的意义 .....	(111)
6.3.2	无功补偿措施 .....	(111)
小结	.....	(114)
技能训练	.....	(114)
思考与练习题	.....	(115)

## 模块四 照明工程

项目7	照明系统 .....	(119)
任务1	建筑电气照明基础知识 .....	(119)
任务2	电光源及灯具的种类与选择 .....	(124)
7.2.1	电光源分类 .....	(124)
7.2.2	灯具的分类与选择 .....	(129)
任务3	电气照明线路的控制 .....	(131)
7.3.1	单管荧光灯接线 .....	(131)
7.3.2	高压钠灯接线 .....	(132)
7.3.3	双管荧光灯接线 .....	(132)
7.3.4	两地控制一盏灯的接线 .....	(133)
7.3.5	三地控制一盏灯的接线 .....	(133)
7.3.6	高压汞灯的接线 .....	(134)
任务4	灯具的布置与照度计算 .....	(134)
7.4.1	照明质量标准 .....	(134)
7.4.2	照度计算 .....	(137)
小结	.....	(142)
技能与训练	.....	(142)
思考与练习题	.....	(148)
项目8	照明工程图的识读 .....	(149)
任务1	照明施工图的识读 .....	(149)
8.1.1	电气施工图的特点及组成 .....	(149)
8.1.2	照明施工图的阅读方法 .....	(150)

8.1.3 照明施工图的图例符号 .....	(151)
8.1.4 照明灯具的标注 .....	(154)
8.1.5 配电线路的标注 .....	(154)
8.1.6 照明配电箱的标注 .....	(155)
8.1.7 开关及熔断器的标注 .....	(156)
任务2 建筑照明系统案例分析 .....	(156)
8.2.1 照明系统图识读 .....	(156)
8.2.2 照明平面图识读 .....	(156)
小结 .....	(159)
技能训练 .....	(159)
思考与练习题 .....	(160)

## 模块五 建筑电气安全

项目9 建筑物防雷及接地系统 .....	(163)
任务1 接地与接零的作用及分类 .....	(163)
9.1.1 接地与接零概述 .....	(163)
9.1.2 接地与接零的类型和作用 .....	(164)
任务2 电气设备、电子设备的接地 .....	(167)
9.2.1 电气设备的分类及接地 .....	(167)
9.2.2 各种接地的电阻值要求 .....	(168)
任务3 常见保护接地方式 .....	(169)
9.3.1 保护接地的类型 .....	(169)
9.3.2 TN系统 .....	(169)
9.3.3 TT系统 .....	(171)
9.3.4 IT系统 .....	(172)
任务4 民用建筑物的防雷 .....	(172)
9.4.1 建筑物的防雷分级 .....	(172)
9.4.2 防雷接地装置 .....	(173)
小结 .....	(175)
技能训练 .....	(175)
思考与练习题 .....	(177)
项目10 电气安全与防护 .....	(179)
任务1 触电事故及救护 .....	(179)
10.1.1 触电的形式 .....	(179)

10.1.2 影响触电严重程度的因素 .....	(180)
10.1.3 触电的救护 .....	(182)
任务2 安全用电 .....	(184)
10.2.1 常用的防护方法 .....	(184)
10.2.2 安全电压 .....	(185)
任务3 电气保护措施 .....	(186)
10.3.1 电涌保护技术 .....	(186)
10.3.2 漏电保护技术 .....	(188)
小结 .....	(193)
技能训练 .....	(193)
思考与练习题 .....	(195)

## 模块六 建筑智能化系统

项目11 智能建筑及综合布线 .....	(199)
任务1 智能建筑及其发展 .....	(200)
任务2 综合布线系统 .....	(200)
11.2.1 综合布线的定义与功能 .....	(200)
11.2.2 综合布线的组成 .....	(201)
11.2.3 综合布线系统分级与标准 .....	(202)
11.2.4 综合布线常用线缆 .....	(203)
小结 .....	(206)
技能训练 .....	(206)
思考与练习题 .....	(208)
项目12 消防系统 .....	(209)
任务1 消防系统概述 .....	(209)
12.1.1 消防基础 .....	(209)
12.1.2 火灾自动报警系统的组成 .....	(210)
任务2 火灾自动报警系统常用设备 .....	(211)
12.2.1 火灾探测器 .....	(211)
12.2.2 火灾报警系统常用附件 .....	(212)
任务3 火灾自动报警系统 .....	(214)
12.3.1 火灾自动报警控制器及其分类 .....	(214)
12.3.2 火灾自动报警控制器功能 .....	(214)
小结 .....	(216)

技能训练 .....	(216)
思考与练习题 .....	(218)
<b>项目 13 安防系统 .....</b>	<b>(219)</b>
任务 1 视频监控系统 .....	(219)
13.1.1 视频监控系统概述 .....	(219)
13.1.2 视频监控系统组成 .....	(220)
13.1.3 视频监控系统前端设备 .....	(222)
13.1.4 视频监控系统监控中心设备 .....	(225)
任务 2 门禁系统 .....	(227)
13.2.1 门禁系统的组成 .....	(227)
13.2.2 门禁系统的设备 .....	(228)
13.2.3 门禁系统结构模式 .....	(229)
任务 3 停车场管理系统 .....	(230)
13.3.1 停车场管理系统及其发展 .....	(230)
13.3.2 停车场管理系统的基本组成 .....	(231)
13.3.3 停车场管理系统的工作原理 .....	(233)
13.3.4 停车场管理系统的特点 .....	(234)
小结 .....	(235)
技能训练 .....	(235)
思考与练习题 .....	(236)
<b>项目 14 信息通信系统 .....</b>	<b>(237)</b>
任务 1 网络系统 .....	(238)
14.1.1 计算机网络简介 .....	(238)
14.1.2 计算机网络的硬件和软件 .....	(240)
14.1.3 计算机网络的协议与体系结构 .....	(242)
任务 2 电视、电话系统 .....	(244)
14.2.1 有线电视 .....	(244)
14.2.2 电话系统 .....	(247)
14.2.3 三网合一 .....	(249)
小结 .....	(250)
技能训练 .....	(250)
思考与练习题 .....	(252)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(253)</b>



模块一

---

# 建筑电气及电工基础知识



# 项目1 建筑电气概述

## 项目描述

本项目主要讲授建筑电气的发展及组成、建筑电气系统的分类、建筑电气设备的分类、建筑电气设计施工的基本内容以及建筑电气课程学习方法的建议。

## 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1)掌握建筑电气的发展及组成； (2)了解建筑电气设备和系统的分类； (3)了解建筑电气设计中有关单位及专业间的协调； (4)掌握建筑电气施工的程序及要求； (5)掌握学习建筑电气的基本方法	(1)具备对建筑电气系统类别判断的能力； (2)初步具有确定建筑电气设计与施工基本内容的能力； (3)具有和其他单位协调的能力； (4)熟悉电气施工程序	(1)追求精雕细琢、精益求精、超越自我的工匠精神，不仅具有高超的技艺和精湛的技能，而且还要有严谨、细致、专注和负责的工作态度； (2)思政元素：工匠精神、劳动精神

## 案例引入

房屋建筑在施工的过程中，在浇灌混凝土之前，一般能看到模板或钢筋上固定着一些线管，浇灌水泥后就被隐藏了。那么这些线管有何用途？同样在浇灌混凝土之前，为什么要给配电箱预留一个孔洞，而不是安装时凿出一个洞呢？有些建筑为什么要专门设计电井？经常看到围绕建筑物的屋顶边缘固定着一圈钢筋，它起什么作用？



线管预埋现场

## 任务1 建筑电气系统的组成与分类

### 1.1.1 建筑电气及其发展

建筑电气是以建筑物为平台，以电能、电气设备和电气技术为手段，创造、维持与改善室内空间的电、光、热、声环境的一门科学。其作用是服务于建筑，以及建筑物内人们的工作、生活、学习、娱乐、安全等。

随着建筑技术的发展以及智能建筑、绿色建筑的出现,建筑电气所涉及的范围已由原来单一的供配电、照明、防雷和接地,发展成为以近代物理学、电磁学、无线电电子学、机械电子学、光学、声学、生物学等理论为基础的应用于建筑工程领域的一门新兴学科,而且还在逐步应用新的数学和物理知识并结合电子计算机技术向综合应用的方向发展。这不仅使建筑物的供配电系统、保安监视系统实现了自动化,而且能对建筑物内的建筑设备监控系统、火灾报警与消防联动系统、通信自动化系统、办公自动化系统等实行最佳控制和最佳管理。因此,现代建筑电气已成为现代化建筑的一个重要标志。



电力系统概述

### 1.1.2 建筑电气系统的组成

各类建筑(如工业建筑、住宅建筑、办公建筑)电气系统虽然作用各不相同,但它们一般都是由用电设备、配电线路、控制和保护设备三大基础部分组成,如图 1-1 所示。

用电设备包括照明灯具、家用电器、风机、水泵、计算机与网络设备等,种类繁多,作用各异,分别体现了各类系统的功能特点。

配电线路用于传输电能和信号,如各类系统的线路均为各种型号的导线或电缆,其安装和敷设方式也都大致相同。

控制和保护设备是对相应系统实现控制、保护等作用的设备。这些设备常集中安装在一起,组成如配电盘、柜等设备。若干配电盘、柜常集中安装在同一房间中,即形成各种建筑电气专用房间,如变配电室、电信设备间、消防控制室等。这些房间均需结合具体功能,在建筑平面设计中统一安排布置。

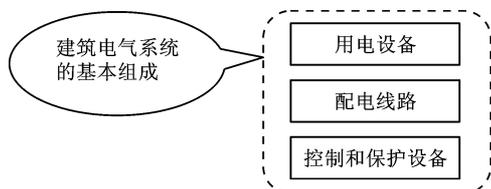


图 1-1 建筑电气系统的组成

### 1.1.3 电力系统与建筑电气系统

电力系统是由分布在辽阔地域的发电厂、变电站、输配电线路、用电设备等组成的大型互联系统,也是最大的人造能量传送系统,它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能,再经输电、变电和配电将电能供应到各用户。为实现这一功能,电力系统在各个环节和不同层次还具有相应的信息与控制系统,以对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度,从而保证用户获得安全、经济、优质的电能。

建筑电气系统隶属于电力系统,是电力系统的一个重要组成部分。从电能的供入、分配、传输和消耗使用来看,建筑电气系统可分为供配电系统和用电系统两大类;而根据用电设备的特点和系统中所传递能量的类型,又可将用电系统分为建筑照明系统、建筑动力系统和建筑弱电系统三种。

#### 1. 建筑的供配电系统

建筑供配电,主要是解决建筑物内用电设备的电源问题,应根据建筑物内所有用电设备的负荷(功率)大小、负荷类型、对供电可靠性的要求(重要程度)等因素,确定对各个用电设备(箱、柜)供电的方式。一般的建筑采用低压 380/220 V 配电,高层建筑采用高压 10 kV 甚至 35 kV 配电。一般供配电系统如图 1-2 所示。

供配电系统作为向用电设备提供电能的路径,其质量的好坏直接影响着整个建筑电气系统的性能和安全,因此对供配电系统的设计应给予高度重视。

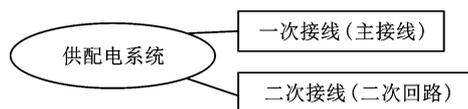


图 1-2 供配电系统的分类

## 2. 建筑的用电系统

### (1) 建筑电气照明系统。

将电能转换为光能进行采光,以保证人们在建筑物内外正常从事生产和生活活动,以及满足其他特殊需要的照明设施,称为建筑电气照明系统。它由电气系统和照明系统组成。

1) 电气系统是电能产生、输送、分配、控制和消耗所使用的系统。它是由电源(市供交流电源、自备发电机或蓄电池组)、导线、控制和保护设备与用电设备(各种照明灯具)组成的。

2) 照明系统是光能产生、传播、分配(反射、折射和透射)和消耗吸收的系统。它是由光源、控照器、室内空间、建筑内表面、建筑形状和工作面等组成的。

电气和照明两套系统既相互独立,又紧密联系。在实际的电气照明设计中,一般程序是首先根据建筑设计的要求进行照明设计,再根据照明设计的成果进行电气设计,最后完成统一的电气照明设计。

### (2) 建筑动力系统。

将电能转换为机械能以拖动水泵、风机等机械设备运转,从而为整个建筑提供舒适、方便的生产与生活条件而设置的各种系统,统称为建筑动力系统,如供暖、通风、给水、排水、热水供应、运输系统。维持这些系统工作的机械设备,如鼓风机、引风机、除渣机、上煤机、给水泵、排水泵、电梯等,全部是靠电动机拖动的。因此,建筑动力系统实质就是向电动机配电,以及对电动机进行控制的系统。

### (3) 建筑弱电系统。

电能为弱电信号的电子设备,具有信号准确接收、传输和显示功能,并能以此满足人们获取各种信息的需要和保持相互联系的各种系统,统称为建筑弱电系统,如综合布线系统、有线电视系统、通信系统、消防系统、安全防范系统、办公自动化系统等。

随着现代建筑与建筑弱电系统的进一步融合,智能建筑也随之出现。因此,建筑物智能化的高低取决于它是否具有完备的建筑弱电系统。

## 1.1.4 建筑电气设备

根据国家标准 GB/T 5226.1—2019,电气设备的定义是:将机械或机械部件(例如,材料、装置、器件、器具、卡具、仪器及类似物件)用电连接的装置。

电气设备从专业角度来讲,主要指用于对电路进行接通、分断,对电路参数进行变换,以实现电路或用电设备的控制、调节、切换、检测和保护等作用的电工装置、设备和元件,如发电机、变压器、电力线路、断路器等;从普通民众的角度来讲,主要是指日常生活中常用的一些提供便利的用电设备,如家用电器、电脑、网络设备、各种小家电等。

下面仅从建筑电气设备在建筑中所起的作用和专业属性来分类。

### (1) 根据在建筑中所起的作用来分类。

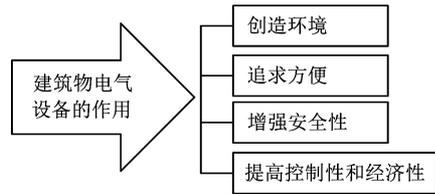
可将建筑电气中的设备大致分为如下四类(见图 1-3)：

1) 创造环境的设备，为人们创造良好的光、温湿度、空气和声音环境的设备，如照明设备、空调设备、通风换气设备、广播设备等。

2) 追求方便的设备，为人们提供方便生活工作以及缩短信息传递时间的设备，如电梯、通信设备等。

3) 增强安全性的设备，主要包括保护人身与财产安全、提高设备与系统本身可靠性的设备，如报警、防火、防盗和保安设备等。

4) 提高控制性和经济性的设备，主要包括延长建筑物使用寿命、增强控制性能的设备，以及降低建筑物维修、管理等费用的具有管理性能的设备，如自动控制设备和电脑管理。



(2) 根据建筑电气设备的专业属性来分类

可将建筑电气中的设备大致分为如下几类：

1) 供配电设备，如变电系统的变压器、高压配电系统的开关柜、低压配电系统的配电屏与配电箱、二次回路设备、发电设备等。

2) 照明设备，如各种电光源。

3) 动力设备，各种靠电动机拖动的机械设备，如吊车、搅拌机、水泵、风机、电梯等。

4) 弱电设备，如电话、通信设备、电视及 CATV、音响、计算机与网络、报警设备等。

5) 空调与通风设备，如制冷机泵、防排烟设备、温湿度自动控制装置等。

此外还有洗衣设备、厨房设备、运输设备等。

## 任务 2 建筑电气设计及施工的基本内容

### 1.2.1 建筑电气设计与相关单位间的协调

#### 1. 与建设单位的关系

工程完工后总是要交付给建设单位使用的，满足使用单位的需要是设计最根本的目的。因此，要做好一项建筑电气设计，首先必须了解建设单位的需求和他们所提供的设计资料。设计中不能只是盲目地去满足建设单位的要求，而应在客观条件许可的情况下，恰如其分地去实现。

#### 2. 与施工单位的关系

设计是用图纸来表达工程，而工程的实体则需要靠施工单位去建造，因此，设计方案必须具备可实施性。一般来讲，设计者应该掌握电气施工工艺，至少应了解各种安装过程，以免设计出的图纸不能实施。通常在施工前，需将设计意图向施工一方进行交底。交底的过程中，施工单位一般要严格按照设计图纸进行安装，若遇到需更改设计或材料代用等，则需经过“洽商”，洽商是作为图纸的补充，最后纳入竣工图内的。

#### 3. 与公用事业单位的关系

电气装置使用的能源和信息来自市政设施的不同系统。因此，在开始进行设计方案构思时，应考虑能源和信息输入的可能性及具体措施。与这方面有关的设施是供电网络、通信网

络和消防报警网络等。因此,需与供电、电信和消防部门等进行业务联系。

## 1.2.2 建筑电气设计与其他专业设计间的协调

### 1. 建筑电气与建筑专业的关系

建筑电气与建筑专业(包括结构、装修)的关系,视建筑物功能的不同而不同。在工业建筑设计过程中,生产工艺设计是起主导作用的,而土建设计以满足工艺设计要求为前提,处于配角的地位。

民用建筑设计过程中,建筑专业始终是主导专业,电气专业和其他专业则处于配角的地位,即围绕着建筑专业的构思而开展设计,力求表现和实现建筑设计的意图,并且在工程设计的全过程中服从建筑专业的调度。

由于各专业都有各自的特点和要求,有各自的设计规范和标准,所以在设计中不能片面地强调某个专业的重要性而置其他专业的规范于不顾,不然就会影响其他专业的技术合理性和使用安全性。如电气专业在设计中应当在总体功能和效果方面努力实现建筑专业的设计意图,而建筑专业也要充分尊重和理解电气专业的特点,注意为电气专业设计创造条件,并认真解决电气专业所提出的技术要求。

### 2. 建筑电气与建筑设备专业的协调

建筑电气与建筑设备(采暖、通风、给排水、燃气)争夺空间地盘的矛盾特别多。因此,在设计中应很好地协调,与建筑设备专业合理划分地盘。建筑电气应主动与土建、暖通、上下水、煤气、热力等专业在设计中协调好,而且要认真进行专业间的校对,否则容易造成工程返工和建筑功能上的损失。

总之,只有各专业之间相互理解、相互配合,才能设计出既符合建筑设计意图,又在技术和安全上符合规范,在功能上满足使用要求的建筑物。

## 1.2.3 建筑电气施工的程序及要求

建筑电气安装工程一般可分为三个阶段,即施工准备阶段、安装施工阶段和竣工验收阶段,如图1-4所示。



图1-4 建筑电气安装工程的三个阶段

### 1. 施工准备阶段

施工准备阶段一般可分为阶段性施工准备和作业条件的施工准备。所谓阶段性施工准备,是指工程开工之前针对全面工程所做的各项准备工作;所谓作业条件的施工准备,是指为某一施工阶段,某分部、分项工程或某个施工环节所做的准备工作,它是局部性、经常性的施工准备工作。为保证工程的全面开工,应做好以下几方面的准备工作。

(1)熟悉、会审图样。图样是工程的语言、施工的依据。开工前,首先应熟悉施工图样,了解设计意图及内容;明确工程所采用的设备和材料以及图样所提出的施工要求;明确电气

工程和主体工程以及其他安装工程的交叉配合,以便及早采取措施,确保在施工过程中不破坏建筑物的强度,不破坏建筑物的美观,不与其他专业发生位置冲突。

(2)熟悉和工程有关的其他技术资料,如施工及验收规范、技术规程、操作规程、质量检验评定标准以及制造厂提供的随机文件,即设备安装使用说明书、产品合格证、试验记录数据表等。

(3)编制施工方案。在全面熟悉施工图样的基础上,依据图样并根据施工现场的实际情况、技术力量及技术准备情况,综合做出合理的施工方案。

(4)编制工程预算。工程预算包括施工图预算和施工预算。

(5)根据施工方案和施工预算,组织机具的调配和材料的采购工作,并有计划地组织机具和材料进场。

(6)有计划地组织施工队伍进场。

(7)全面检查现场施工条件的具备情况。

## 2. 安装施工阶段

施工中根据电气装置的特点,依据规范要求制定合理的施工程序和施工措施,是保证工程质量、严防发生事故、避免造成损失的一项重要工作。虽然各种电气装置的特点有所不同,安装方法也有所区别,但其基本程序都是相近的,一般分为施工准备、安装、调试、收尾、试运行和交工验收等几个步骤。在施工过程中,电气安装施工人员必须严格按照操作规程进行施工,不准违章;施工现场用火以及进行气焊、使用喷灯和电炉等,均应有防火及防护措施;施工现场临时供电线路的架设和电气设备的安装,应符合临时用电要求;所用导线应绝缘良好;电气设备金属外壳应接地;户外临时配电箱及开关装置应有防雨措施。电动设备拆除后,应拆除带电导线;如果导线必须保留,则应切断电源,将裸露线头施以绝缘,并将导线提高到距地面 2.5 m 以上的高度。雨季施工时,应对临时电源线路、配电箱及电气设备经常进行绝缘检查,绝缘不良者应立即进行修理和干燥;对施工安全用品,如安全带、安全网等亦应经常检查,加强管理,防止霉烂变质,影响使用安全。

进行吊装工作时,应根据负荷的大小选择吊装机具,所吊物件不准超过吊装机具的允许工作负荷。吊装前应对所用吊装机具进行严密检查,确认完好无损后,方可使用。每个施工人员都要养成文明施工的好习惯,工程完工和下班时,都要对施工现场进行清扫整理,切实做到“工完场清”。

在工业与民用建筑安装工程中,电气安装工程施工与主体建筑工程有着密切的关系,必须紧密配合,才能对工程进度、工程造价和工程质量等产生良好的效果,如配管、配线、开关电器及配电柜的安装等都应在土建施工过程中密切配合,才能做好预埋和预留孔洞的工作。这样既能加快施工进度,又能提高施工质量;既安全可靠,又整齐美观。

对于钢筋混凝土建筑物的暗配管工程,应当在浇灌混凝土前将一切管路、接线盒和电机、电器、配电柜的基础安装部分等全部预埋好,其他工程则可以等混凝土干涸后再施工。

## 3. 竣工验收阶段

工程验收是检验评定工程质量的重要环节,在施工过程中应根据施工进度,适时对隐蔽工程、阶段工程和竣工工程进行检查验收。工程验收的要求、方法和步骤有别于一般的质量检验。

工程竣工验收是对建筑安装企业生产技术、生产成果的一次综合性检查验收。建设工程项目通过竣工验收后,才可投产使用,形成生产能力。一般工程正式验收前,应由施工单位进行自检预验收,检查有关技术资料、工程质量,发现问题及时做好处理,然后再提出竣工验收报告,由建设单位组织设计单位、施工单位及监理单位等有关人员共同进行检查验收。

## 任务3 建筑电气课程性质、要求和学习方法

### 1.3.1 建筑电气课程性质、要求

《建筑电气工程》课程是建筑设备安装专业群的一门专业必修课程,也是建筑设计、建筑工程设计与施工、建筑工程管理、建筑工程造价等专业方向的一门拓展课程,还是建筑智能化工程、建筑电气工程、建筑设备工程、建筑供热通风与空调工程、建筑给水排水工程中施工员、监理员等职业岗位技术人员必备的专业技能之一。

本项目的基本要求是,首先在掌握电工基础知识和理论的基础上,了解建筑电气的任务、组成以及建筑电气系统和设备的分类,然后按照建筑供配电工程、照明工程、动力工程、防雷与接地工程、弱电工程等项目进行初步电气设计,懂得如何与其他专业相互协调,并使之符合电气施工工艺标准要求。通过本项目的学习,学生能初步掌握建筑电气系统运行、维护和设计所必需的基本理论,能查阅建筑电气工程相关的标准和规范,能识读建筑电气施工图,能依据图纸进行安装施工并使之达到相关质量验收标准。

### 1.3.2 建筑电气课程的学习方法

对于建筑电气课程的学习方法,有以下几点建议。

(1)应结合所学专业特点(如建筑电气工程专业照明线路和灯具的安装、给排水专业水泵的安装与控制、暖通空调专业防排烟风机的安装与控制、建筑工程施工专业的电气管线的预埋等),这样不仅能提高学习兴趣,还能培养综合运用和协调各学科技术的能力。

(2)充分理解建筑电气设计与施工的基本内容,注意建筑电气设计与相关单位以及与其他专业之间的协调,了解建筑电气施工的程序与要求。

(3)现场参观。现场参观能给学生提供一个完整和直观的概念,在条件允许的情况下,应多到现场参观和教学,观察、考察周围的建筑电气系统,增强感性认识,加深对所学知识的理解。

(4)可以适当阅读规范、图集、手册、教材和参考书,还可以通过互联网获得更多更新的电气知识。

(5)注意加强技能训练,独立思考、探讨典型工程案例,积累工程经验,多向有实践经验的专业人员请教。

## 小结

建筑电气设备可按其在建筑中所起的作用和专业属性来分类。

从电能的供入、分配、传输和消耗使用来看，建筑电气系统可分为供配电系统和用电系统两大类。根据用电设备的特点和系统中所传递能量的类型，又可将用电系统分为建筑电气照明系统、建筑动力系统和建筑弱电系统三种。

建筑电气设计需注意两方面的协调。建筑电气安装工程一般可分为三个阶段，即施工准备阶段、安装施工阶段和竣工验收阶段，要注意不同阶段的程序及要求。

## 技能训练

### 1. 实训项目

认识建筑物的电气设备。

### 2. 实训目的

通过对某建筑物相关电气设备的观察和分析，初步了解建筑电气的基本分类和应用情况。培养学生安全用电观念，如穿绝缘鞋，戴安全帽，遵守用电操作规程等。

### 3. 实训准备

联系某建筑物的物业管理部门，了解室内外电气设施的相关情况。

### 4. 实训内容

- (1) 收集该建筑物所有电气设备的分布情况。
- (2) 判断电气设备的类别。
- (3) 提交成果：填写该建筑物的电气设备类别情况调查表。

## 思考与练习题

- (1) 建筑电气系统的基本组成是什么？
- (2) 建筑电气设备可分为哪几类？
- (3) 建筑电气系统由哪几部分组成？
- (4) 建筑用电系统可分为哪几类？
- (5) 建筑电气安装工程施工要做哪些准备工作？
- (6) 电气安装工程的程序有哪些？
- (7) 如何学习建筑电气？

## 项目2 电工技术基础知识

### 项目描述

本项目主要讲授建筑电气所需的电工基础知识。首先是电路的基本概念(包括电路模型、基本物理量、电路的工作状态)和基本定律(包括欧姆定律和基尔霍夫定律),以及直流电路的基本分析方法,然后讲解单相交流电路及其基本分析方法,最后讲述三相交流电源和三相交流负载的连接以及提高功率因数的方法。

### 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1)了解电路及电路模型的基本概念和作用; (2)掌握电路中的参考方向及各基本物理量的概念和应用方法; (3)熟悉欧姆定律和基尔霍夫定律的使用方法; (4)熟悉电阻的连接特点,掌握直流电路的基本分析方法; (5)掌握正弦交流电路的基本概念,理解正弦量的相量表示法	(1)能够正确运用欧姆定律、基尔霍夫定律等解决直流电路问题; (2)会提高交流电路功率因数; (3)具备对相应电压及电流进行分析计算的能力; (4)会用常用的电路仪器、仪表	(1)具有工匠精神,重视电路连接的工艺质量; (2)具有安全用电的意识; (3)思政元素:工匠精神、安全意识

### 案例引入

小妮是某企业的实习电工,她学习马马虎虎,她师傅问:“一个电阻与一个电感串联,测得它们的电压分别为3V和4V,那么串联电路的总电压是多少?”小妮想了想说:“那还不简单,3+4=7嘛。”师傅又问:“当某电感元件的电压为零时,通过它的电流也为零,对吗?”“这个我当然知道了,根据欧姆定律,肯定为零。”师傅摇了摇头,又问小妮:“把220V、1000W电炉的电阻丝,剪掉一半,其功率会怎么变化?”小妮大大咧咧地说:“功率减半啊。”师傅说:“那你说照明电路的保护线上应不应该装熔断器呢?”小妮说:“当然不用了,因为这会浪费嘛。”小妮的说法哪些是错误的?正确的说法是什么?这些问题都将是我们在电工学习过程中需要重点学习的问题。下面带着这些问题开始我们的学习吧。

## 任务 1 电路的基本概念及其基本定律

### 2.1.1 电路和电路模型

#### 1. 电路的组成

电路是指为了某种需要,由一些电气器件按某种方式连接起来的电流的通路。这些电气器件泛指各种电路实际部件,如电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、晶体管等。

如图 2-1(a)所示是一个简单的手电筒电路,它由电池、灯泡、开关和连接导线组成,需要照明时将开关闭合,电流就在电路中流通,灯泡发光。可见,要构成一个完整的电路,需要三个组成部分。

(1)电源是电路中提供电能的装置,它可以将其他形式的能量,如化学能、热能、机械能、太阳能和原子能等转换为电能,是推动电路中电流流动的原动力。如图 2-1(a)中的干电池电源就是将化学能转换为电能。

(2)负载是电路中接收电能的装置,它将电源供给的电能转换为其他形式的能量。如图 2-1(a)中的灯泡能将电能转换为光和热能,又如电动机把电能转换为机械能,充电的蓄电池把电能转换为化学能等。

(3)中间环节是连接电源与负载的导线和控制电器,如图 2-1(a)中的开关。实际电路为了长期安全工作还需要一些保护设备,如熔断器、热继电器、空气开关等,它们在电路中起着传输、分配、保护和控制的作用。

#### 2. 电路模型

在电工技术中,为了实现对实际电路的分析和计算,通常在工程实际允许的条件下可将实际电路抽象成理想化的模型进行处理,即突出足以反映其功能的主要电磁特性,而忽略其次要因素,将实际电路器件用电路模型来替代,并按规定的图形符号来表示。如电阻,就可以用一个只具有耗能特性的“电阻元件”作为它的电路模型。如图 2-1(a)所示的实际电路就可以用如图 2-1(b)所示的电路模型表示,其中电池用电压源  $U_s$  和内电阻  $R_s$  表示,灯泡用负载电阻  $R$  表示,开关用无接触电阻的理想开关  $S$  表示。相对于负载电阻来说,金属导线的电阻通常很小,一般忽略不计,即认为它是理想导线。由图 2-1 可看出,手电筒的电路模型较实际电路显然更清晰明了。

今后所说的电路一般均指由理想电路元件构成的抽象电路,并非实际电路本身。电路模型是用来探讨存在于具有不同特性的各种真实电路中的共同规律的工具。在电路图中,各种电路元件都是用规定的图形和文字符号来表示。

需要指出的是,上面所讲到的各种电路模型,只适用于低、中频电路的分析,因为在低、中频电路中,电路元器件基本上都是集总参数元件(即次要因素可以忽略的元件),其电磁过程都分别集中在元件内部进行;而在高频和超高频电路中,元器件上的电磁过程并不是集中在元件内部进行的,因此要用分布电路模型来抽象和进行描述。

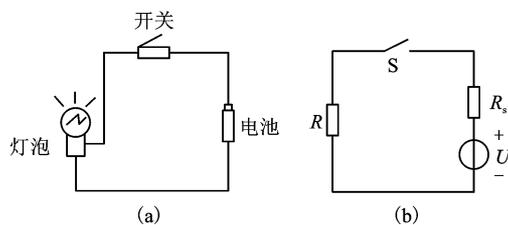


图 2-1 电路模型

### 3. 电路的作用

实际电路种类繁多,功能也各不相同,其作用主要有两个方面。第一个方面是实现电能的传输、分配与转换,典型的例子是电力系统。第二个方面是实现信息的传递与处理,例如电视机。电视机的接收天线接收到载有语言、音乐、图像信息的电磁波后,经过选频、放大、解调等处理,将分离出的图像信号送到显像管,在控制信号的作用下,将信号显示为画面,同时将伴音信号传送到扬声器转换为声音。

## 2.1.2 电路的基本物理量

### 1. 电流及其参考方向

带电粒子(电子、离子)有规则地定向移动即形成电流。电流的大小是用单位时间内通过导体横截面的电量进行衡量的,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2-1)$$

电流的大小及方向都不随时间变化时,称其为恒定电流,简称直流,可表示为:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2-2)$$

式中:  $Q$  是在  $t$  时间内通过导体横截面的电量。

**注意:** 在电路理论中,一般用小写的英文字母来表示变量,而用大写的英文字母来表示恒量。如式(2-1)中的电流和电量都是用的的小写英文字母,而式(2-2)中则用大写英文字母。在稳恒直流电路中,电流的大小和方向都不随时间变化;在正弦交流电路中,电流的大小和电荷移动的方向均按正弦规律变化。

电流不但有大小,而且有方向。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。

但在具体电路中,电流的实际方向常常随时间变化,即使不随时间变化,某段电路中电流的实际方向有时也难以预先断定,因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因,在分析电路问题时,人们引入了电流参考方向的概念,即先指定某一方向为电流方向,称为电流的参考方向,如图2-2(a)所示的虚线箭头。当然,所选的方向并不一定就是电流的实际方向,如图2-2(b)所示的虚线箭头。

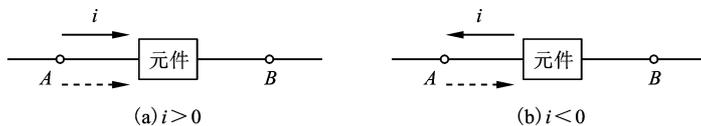


图 2-2 电流参考方向

若电流的参考方向与其实际方向(虚线箭头)一致,则电流  $i$  为正值( $i > 0$ ),如图2-2(a)所示;若电流的参考方向与实际方向相反,则电流为负值( $i < 0$ ),如图2-2(b)所示。

这样,在指定的电流参考方向下,电流值的正或负就反映了电流的实际方向。若经计算得出电流为正值,则说明所设参考方向与实际方向一致;若经计算得出电流为负值,则说明所设参考方向与实际方向相反。显然,在未指定参考方向的情况下,电流值的正或负是没有意义的。

电流的参考方向是任意指定的, 一般用箭头表示, 有时也用双下标表示, 如  $i_{AB}$  表示其参考方向为由  $A$  指向  $B$ ,  $i_{BA}$  表示其参考方向为由  $B$  指向  $A$ , 显然两者相差一个负号。一般在电路图中只标明参考方向。

## 2. 电压及其参考方向

电路中, 一般把电场力将单位正电荷从某点移到另一点所做的功定义为这两点之间的电压, 也称电位差, 用  $u$  或  $u(t)$  表示

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (2-3)$$

式中: 功  $w(t)$  的单位是焦(J); 电压的单位是伏(V)。

电压表明单位正电荷在电场力作用下转移时减少的电能, 体现为电位的降低(从高电位点到低电位点), 所以电压的方向就是电位降的方向。通常, 两点间电压的高电位端为“+”极, 低电位端为“-”极。就像需要为电流指定参考方向一样, 也需要为电压指定参考方向(也称参考极性, 即“+”极到“-”极的方向)。如果电压的参考极性与实际极性一致, 则电压  $u > 0$ , 如图 2-3(a) 所示; 如果电压的参考极性与实际极性相反, 则电压  $u < 0$ , 如图 2-3(b) 所示。

电压的参考极性是任意指定的, 一般用“+”“-”极性表示; 有时也用箭头表示参考极性, 如图 2-3 所示, 箭头由正极指向负极; 也可用双下标表示, 如  $u_{AB}$  表示  $A$  点为“+”极,  $B$  点为“-”极。

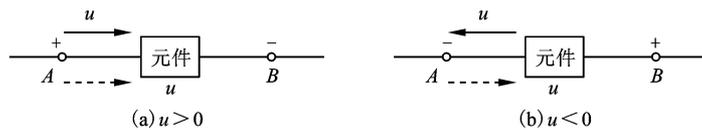


图 2-3 电压的参考方向

一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向可以分别独立地任意指定, 但为了方便, 常常采用关联参考方向, 指定电流的参考方向从标有电压正极性的一端指向负极性端, 即两者的参考方向一致, 如图 2-4(a) 所示, 这时在电路图上只需标明电流参考方向或电压参考极性中的任意一种即可; 电流、电压参考方向相反时称为非关联参考方向, 如图 2-4(b) 所示。



图 2-4 关联参考方向与非关联参考方向

## 3. 电动势

当电源与外部负载电路接通时, 正电荷在电场力的作用下通过外电路由高电位端向低电位端移动, 从而形成电流。为使电流维持下去, 电源必须依靠其他非电场力(如电池中的化学能)把正电荷由电源的低电位端移向高电位端。将单位正电荷由电源的低电位(负)端经电源内部移到高电位(正)端所做的功, 即单位正电荷所获得的电能, 称为电源的电动势, 用符号  $E$  来表示, 其单位也是伏特(V)。

电动势是衡量电源做功能力的物理量,电动势的表示方法与电压相同,但方向与电压相反,即由低电位端(负)指向高电位(正)端。若正电荷 $Q$ 在电源力的作用下沿着电源内部从 $b$ 点移到 $a$ 点,则电源电动势 $E_{ba}$ 与其两端间的电压 $U_{ab}$ 存在以下关系:

$$E_{ab} = -U_{ab} \quad (2-4)$$

#### 4. 电功率和电能

电路中的电流通过用电设备时,电能将转换成其他形式的能量而做功。单位时间内,某段电路传送或转换的电能称为电功率。电功率与电能的关系为:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (2-5)$$

直流时为:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{UdQ}{dt} = UI \quad (2-6)$$

即某段电路吸收或发出的电功率,等于该段电路两端的电压与流过该段电路的电流之乘积。电功率的标准单位为瓦特(W),也常用千瓦(kW)、毫瓦(mW)作为单位。

根据电功率的定义,某段电路在 $t$ 时间内吸收或发出的电能为:

$$W = Pt \quad (2-7)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦(J)。1 J就是1 W的用电设备在1 s内消耗的电能。

通常电业部门用“度”作为单位来测量用户消耗的电能,“度”是千瓦时(kWh)的简称。1度(或1 kWh)电等于功率为1 kW的元件在1小时内消耗的电能,有:

$$1 \text{ kWh} = 1 \times 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

有了关联参考方向的概念,则电功率计算式(2-5)就可以表示为以下两种形式。

当 $u$ 、 $i$ 为关联参考方向时,有:

$$p = ui \quad (\text{直流功率 } P = UI) \quad (2-8)$$

当 $u$ 、 $i$ 为非关联参考方向时,有:

$$p = -ui \quad (\text{直流功率 } P = -UI) \quad (2-9)$$

无论关联与否,只要计算结果 $p > 0$ ,则该元件就是在吸收功率,即消耗功率;若 $p < 0$ ,则该元件是在发出功率,即产生功率。根据能量守恒定律,对一个完整的电路来说,发出功率的总和应正好等于吸收功率的总和。

**【例 2-1】** 计算如图 2-5 所示的各元件的功率,指出是吸收功率还是发出功率,并求整个电路的功率。已知电路为直流电路, $U_1 = 5 \text{ V}$ , $U_2 = -9 \text{ V}$ , $U_3 = 6 \text{ V}$ , $I = 2 \text{ A}$ 。

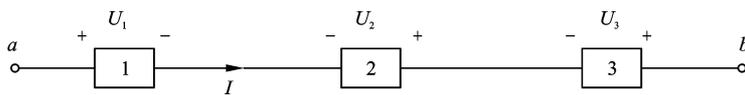


图 2-5 例 2-1 电路图

**解:** 在图 2-5 中,元件 1 的电压与电流为关联参考方向,由式(2-8)得:

$$P_1 = U_1 I = 5 \times 2 = 10 \text{ W}$$

故元件 1 吸收功率。

元件 2 和元件 3 的电压与电流为非关联参考方向, 由式(2-9)得:

$$P_2 = -U_2 I = -(-9) \times 2 = 18 \text{ W}$$

$$P_3 = -U_3 I = -6 \times 2 = -12 \text{ W}$$

故元件 2 吸收功率, 元件 3 发出功率。

整个电路功率为:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 10 + 18 - 12 = 16 \text{ W}$$

### 2.1.3 电路的工作状态

实际工作中, 由于电源、负载和中间环节的连接方式不同, 电路可以有通路、开路和短路三种工作状态(见图 2-6), 下面以直流电路为例说明三者的特征。

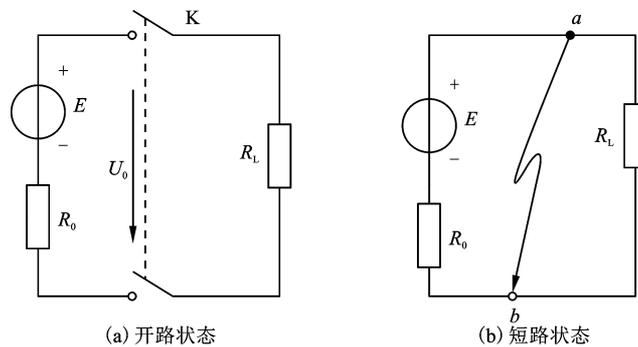


图 2-6 电路的工作状态

#### 1. 通路(负载工作状态)

电源与负载通过中间环节接成闭合回路的情况称为通路。如图 2-6(a)所示, 当开关 K 闭合时, 电流通过负载电阻消耗电能, 若忽略输电导线的电阻, 根据全电路欧姆定律, 有:

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} \quad (2-10)$$

$$U_L = IR_L = E - IR_0$$

即

$$U = U_L = E - IR_0 \quad (2-11)$$

可见, 当电源的电动势  $E$  和内阻  $R_0$  一定时, 电源端电压  $U$  随着电流  $I$  的增大而减小。由于实际电源的内阻  $R_0$  通常很小, 当  $R_0$  远小于  $R_L$  时, 电源端电压  $U$  随着电流  $I$  的增大而减小得很少。

#### 2. 开路

电源与负载不接成闭合回路的情况称为开路, 也称断路, 如图 2-6(a)所示。电源处于开路状态时, 电路中的电流为零, 相当于负载电阻  $R_L$  等于无穷大的情况, 电源不能输出电能。此时, 电源的端电压  $U$  称为电源开路电压, 用符号  $U_{oc}$  表示, 有:

$$U_{oc} = E \quad (2-12)$$

#### 3. 短路

负载电阻  $R_L$  为零时或由于某种原因使电源两端短接从而直接连通的情况称为短路, 如

图2-6(b)所示。由于短路点  $a$ 、 $b$  间的电阻几乎为零,因此电流不流过负载电阻  $R_L$ 。此时电源输出的电流称为短路电流,用符号  $I_s$  表示,有:

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (2-13)$$

由于电源内阻  $R_0$  通常很小,所以短路电流  $I_s$  通常很大,当其流过电气设备时,将使电气设备因温度过高或电磁力过大而迅速损坏,造成严重事故,应该尽力预防。一般地,短路都由电气设备和线路的绝缘损坏、接线错误等引起,因此必须注意安全。为了防止短路事故,通常在电路中接入熔断器或自动断路器,一旦短路故障发生,可以迅速切断电路的电源。

**【例2-2】** 实验中测出某电源的开路电压  $U_{oc} = 10\text{ V}$ , 短路电流  $I = 100\text{ A}$ , 求该电源的电动势和内阻。

解: 据式(2-12)得:

$$E = U_{oc} = 10\text{ V}$$

据式(2-13)得:

$$R_0 = \frac{E}{I_s} = \frac{10}{100} = 0.1\ \Omega$$

## 2.1.4 电阻和欧姆定律

### 1. 欧姆定律

电阻元件是电路中最常见的元件,它是由各种导电材料做成的,在电路中起限制和调节电流等作用。电阻元件流过电流时要消耗电能,因此电阻元件是耗能元件。电阻元件的图形符号如图2-7(a)所示。



欧姆定律

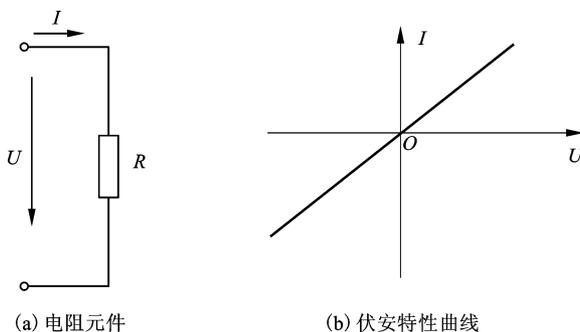


图2-7 电阻元件及其伏安特性曲线

在电压、电流关联参考方向下,其端钮的伏安关系为:

$$U = RI \quad (2-14)$$

这就是我们熟悉的欧姆定律,即电阻元件两端所加的电压  $U$  和流过该电阻元件的电流  $I$  之比  $R$  称为电阻元件的电阻值,简称为电阻,其计算式为:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2-15)$$

欧姆定律表示了电压、电流与电阻三者之间的变化关系。遵循欧姆定律的电阻称为线性电阻元件，其电路特性可以用流过该电阻的电流及其两端所加的电压之间的伏安特性曲线来表示，如图 2-7(b) 所示。

电阻的单位是欧姆( $\Omega$ )，也常用千欧( $k\Omega$ )、兆欧( $M\Omega$ )作为单位。

电阻的倒数称为电导，用符号  $G$  来表示，即

## 2. 电气设备的额定值

电气设备或元件长期正常运行的电流容许值称为额定电流，其长期正常运行的电压容许值称为额定电压。额定电压和额定电流的乘积为额定功率，即

$$P_N = U_N I_N \quad (2-16)$$

通常电气设备或元件的额定值标都是在产品的铭牌上的，如一白炽灯标有“220 V、40 W”，则表示它的额定电压为 220 V，额定功率为 40 W。应遵照铭牌上规定的限额和使用条件来使用电气设备，以便电气设备安全、合理、可靠地工作。电气设备实际输出功率  $P_L$  是由负载来决定的，不一定等于额定功率  $P_N$ 。当电气设备的实际输出功率  $P_L$  等于额定功率  $P_N$  时，其发热条件得到了充分利用，电气设备安全、合理、可靠地工作，此时称为满载运行；当  $P_L < P_N$  时，电气设备的发热条件得不到充分利用，电气设备使用不合理，此时称为欠载运行；当  $P_L > P_N$  时，电气设备长时间运行将使其温度过高，此时称为过载运行。

**【例 2-3】** 将一只额定值为 220 V、100 W 的灯泡，接到电动势为 220 V、内阻为  $1 \Omega$  的电源上。求：该灯泡的实际功率，该灯泡在一小时内产生的热量，该灯泡在一天(24 小时)内消耗的电能(度)。

**解：**灯泡的电阻为：

$$R = \frac{U_N}{I_N} = \frac{U_N^2}{P_N} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$$

电路中的电流为：

$$I_L = \frac{E}{R + R_0} = \frac{220}{484 + 1} \approx 0.45 \text{ A}$$

加在灯泡上的实际电压为：

$$U_L = I_L R = 0.45 \times 484 = 217.8 \text{ V}$$

可见，由于电源存在内阻，加在灯泡上的电压并不等于电源的电动势。

灯泡的实际功率为：

$$P_L = U_L I_L = 217.8 \times 0.45 = 98.01 \text{ W}$$

灯泡在一小时内产生的热量为：

$$Q = W = P_L t = 98.01 \times 3600 = 352.8 \text{ kJ}$$

灯泡在一天(24 小时)内消耗的电能为：

$$W = P_L t = 98.01 \times 24 = 2352.24 \text{ Wh} = 2.352 \text{ kWh}$$

### 2.1.5 基尔霍夫定律

在电路分析计算中，其依据来源于两种电路规律：一种是各类理想电路元件的伏安特性，这取决于元件本身的电磁性质，即各元件的伏安关系，与电路连接状况无关；另一种是与电路的结构及连接状况有关的定律，这些定律与组成电路的元件性质无关。基尔霍夫定律

就是用来表达电压、电流在结构方面的规律和关系的。首先介绍以下几个名词。

(1)支路。电路中通过同一电流的每个分支称为支路。如图2-8所示,图中共有三条支路,即**bafe**支路、**be**支路、**bcde**支路。

(2)节点。电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图2-8所示,图中共有两个节点,即**b**节点、**e**节点。

(3)回路。电路中任一闭合路径都称为回路。如图2-8所示,图中共有三个回路,即**abcdefa**回路、**abefa**回路、**bcdeb**回路。

基尔霍夫定律包括电流定律和电压定律。

### 1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律用于确定连接同一节点各支路电流间的关系。由于电流是电荷连续运动形成的,电路中的任一节点都不可能堆积电荷,即电流具有连续性。因此,对电路中任一节点而言,任一时刻流入某节点的电流之和都等于流出该节点的电流之和,这就是基尔霍夫电流定律,用公式表示为:

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (2-17)$$

式中: $I_i$ 为流入节点的电流; $I_o$ 为流出节点的电流。如图2-8所示,根据选定的各支路电流的参考方向,列出节点**b**的KCL方程为:

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (2-18)$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点,也可以扩展应用于包围部分电路的任一假设闭合面,称为广义节点。如图2-9所示,可以将包含三个节点的闭合面看成一个广义节点,容易证明在任一瞬时有:

$$\sum I = I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (2-19)$$

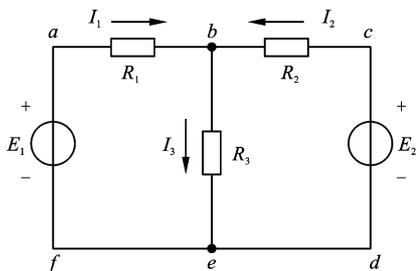


图 2-8 复杂电路

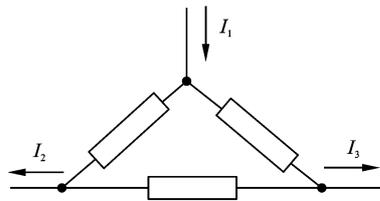


图 2-9 KCL 的扩展应用

**【例 2-4】** 应用基尔霍夫电流定律计算如图 2-10 所示的电路中流过各未知元件的电流。

**解:** 选定流过各未知元件的电流参考方向,如图 2-10 所示。

对节点 C:  $I_3 = 6 + 5 = 11$  A。

对节点 B:  $I_2 + I_3 = 4$  A,  $I_2 = 4 - I_3 = 4 - 11 = -7$  A

对节点 A:  $I_1 = I_2 + 6 = -7 + 6 = -1$  A

### 2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律是反映电路中各支路电压之间关系的定律,可表述为对于任何电路中的任一回路,在任一时刻,沿着一定的绕行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,各段



基尔霍夫定律

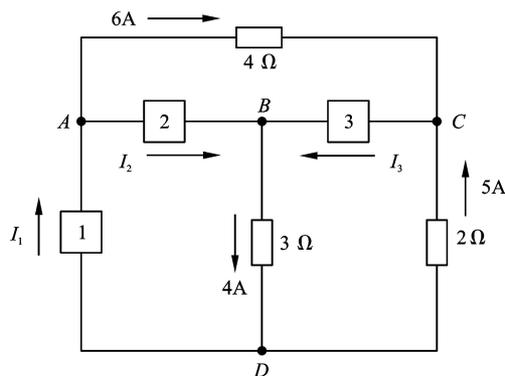


图 2-10 例 2-4 电路图

电压的代数和恒为零，其数学表达式为：

$$\sum u = 0 \quad (2-20)$$

一般规定电位升取正号，电位降取负号。因此，基尔霍夫电压定律也可表述为对电路中任一回路而言，电位升之和等于电位降之和，即

$$\sum U_r = \sum U_f \quad (2-21)$$

式中： $U_r$  为电位升； $U_f$  为电位降。

按式(2-20)列回路电压方程式时，当绕行方向与电压参考方向一致时，该电压前面取“+”，否则取“-”。注意：应用 KVL 时，首先要标出电路各部分的电流、电压或电动势的参考方向。列电压方程时，一般约定电阻的电流方向和电压方向一致。

基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合电路，还可以扩展应用于开口电路。如图 2-11 所示，运用式(2-21)可对回路列出 KVL 方程式：

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2 + U_{OC}$$

**【例 2-5】** 如图 2-12 所示， $I_1 = 3 \text{ mA}$ ， $I_2 = 1 \text{ mA}$ 。试确定电路元件 3 中的电流  $I_3$  和其两端电压  $U_{ab}$ 。

解：根据 KCL，对于节点  $a$  有：

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

代入数值得：

$$(3-1) + I_3 = 0$$

则：

$$I_3 = -2 \text{ mA}$$

根据 KVL 和如图 2-12 右侧回路所示的绕行方向，可列出回路的电压平衡方程式为：

$$-U_{ab} - 20I_2 + 80 = 0$$

代入  $I_2 = 1 \text{ mA}$ ，得：

$$U_{ab} = 60 \text{ V}$$

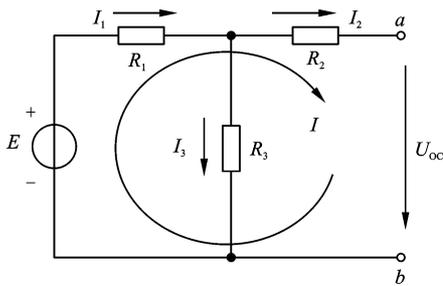


图 2-11 开口电路

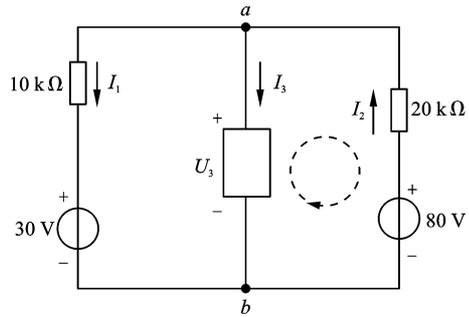


图 2-12 例 2-5 电路图

### 2.1.6 电阻的串联、并联

实际电路中电阻的连接方式是多种多样的，其中最简单的是串联和并联形式。如果采用一个电阻来代替串联、并联或任意连接形式的所有电阻，而不会改变外部电路的电压和电流，则该电阻称为等效电阻。用等效电阻代替其他电阻的方法称为等效变换，相应的变换电路称为等效电路。

#### 1. 电阻的串联

如图 2-13(a) 所示，虚线框  $N_1$  内的电路由三个电阻顺序相连而成，并且在这些电阻中通过同一电流，这样的连接方式称为串联。如图 2-13(b) 所示， $R$  就是  $N_1$  中三个串联电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的等效电阻。

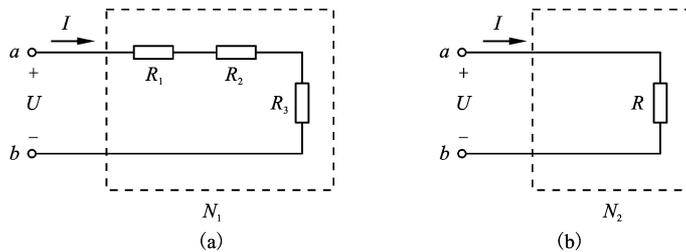


图 2-13 串联电阻的等效电阻

等效电阻的概念很容易推广到有  $n$  个串联电阻的电路中。显然，当  $n$  个电阻  $R_1, R_2, \dots, R_n$  相串联时，其等效电阻为：

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (2-22)$$

电阻串联时，各电阻上的电压为：

$$U_k = R_k I = \frac{R_k}{R} U \quad (2-23)$$

可见，各个串联电阻的电压与电阻值成正比，即总电压按各个串联电阻值进行分配。式

(2-23)称为串联电阻的分压公式。

串联的每个电阻的功率也与它们的电阻成正比。

## 2. 电阻的并联

如果多个电阻连接在两个公共的节点之间，每个电阻上的电压都相同，这样的连接方式称为电阻的并联。很多情况下，电阻并联用电导计算较为方便。

根据 KCL 和欧姆定律，在关联参考方向下，如图 2-14(a) 所示电路的电压、电流关系为

$$I = G_1 U + G_2 U + G_3 U = (G_1 + G_2 + G_3) U \quad (2-24)$$

同理可得如图 2-14(b) 所示电路的电压、电流关系为：

$$I = GU \quad (2-25)$$

比较式(2-24)和式(2-25)可知，有

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (2-26)$$

式中的  $G$  就是  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  三个并联电导的等效电导。

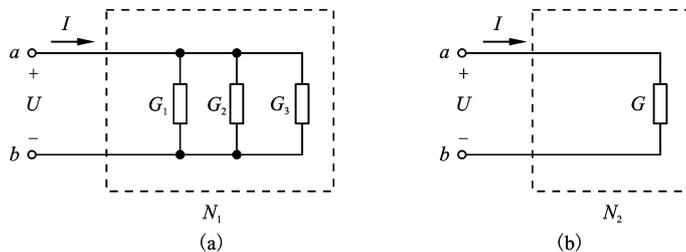


图 2-14 并联电阻的等效电导

等效电导的概念很容易推广到有  $n$  个并联电阻的电路。显然，若有  $n$  个电导为  $G_1, G_2, \dots, G_n$  的电阻相并联，则等效电导为

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k \quad (2-27)$$

上式还可以写成

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (2-28)$$

电阻并联时，各电阻中的电流为

$$I_k = G_k U = \frac{G_k}{G} I \quad (2-29)$$

可见，各个并联电阻中的电流与它们各自的电导值成正比。或者说，总电流按各个并联电阻元件的电导进行分配。如果两个电阻  $R_1$  和  $R_2$  并联，如图 2-15(a) 所示，其等效电阻  $R$  如图 2-15(b) 所示，其值可计算如下：

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-30)$$

用式(2-29)求两个电阻的电流分配，并将电导用电阻代替，可得

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{G_1}{G} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{G_2}{G} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned} \right\} \quad (2-31)$$

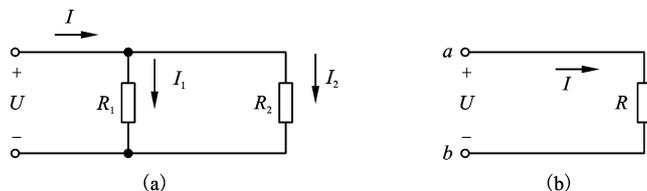


图 2-15 两个电阻的并联

## 任务2 正弦交流电路及其基本分析方法

### 2.2.1 单相交流电路

前面所接触到的都是大小和方向不随时间变化的稳恒直流电。在电力系统中，所有电源都是同一频率的正弦交流电源，供电、用电电路各处的电压和电流也是同一频率的正弦函数，这类电路称为正弦电流电路，通常称为交流电路。由于正弦交流电在传输、变换和控制上有着直流电不可替代的优点，所以在日常生产和生活中得到了广泛应用。

#### 1. 正弦交流电三要素

大小和方向随时间按正弦规律变化的电量称为正弦电量，简称为正弦量，如正弦电压、正弦电流等。本书约定正弦量均用小写字母表示，如正弦电压用  $u(t)$  表示，电流用  $i(t)$  表示，也可直接写成  $u$ 、 $i$ 。下面以正弦电流为例来介绍正弦量的各种表示方法。

正弦电流的时域表示式为：

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2-32)$$

正弦电流波形如图 2-16 所示。要确定一个正弦量，必须给出振幅  $I_m$ 、角频率  $\omega$ 、初相  $\varphi_i$  三个参数，我们把这三个参数称为正弦量三要素，下面分别介绍。

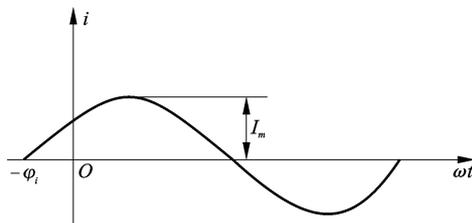


图 2-16 正弦电流波形



单相交流电

(1) 振幅。正弦量的时域函数可表示瞬时值,  $m$  是正弦量各瞬时值中最大的, 称为正弦量的最大值或幅值, 也称振幅, 用带下标  $m$  的大写字母表示。

(2) 角频率。角频率  $\omega$  表征了  $i(t)$  的变化快慢, 单位是 rad/s。正弦量完成一个循环所经历的时间称为周期, 用  $T$  表示, 单位为 s。正弦量每秒钟完成的循环次数称为频率, 用  $f$  表示, 单位为 Hz。显然有:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2-33)$$

$\omega$  与  $T$ 、 $f$  的关系为:

$$\omega = 2\pi f \quad (2-34)$$

$\omega$ 、 $T$ 、 $f$  反映的都是正弦量循环变化的快慢,  $\omega$  越大, 即  $f$  越大或  $T$  越小, 则正弦量循环变化得越快;  $\omega$  越小, 即  $f$  越小或  $T$  越大, 则正弦量循环变化得越慢。直流量的大小、方向都不变, 可以看作  $\omega = 0$  ( $f = 0$ ,  $T = \infty$ ) 的正弦量。

我国和世界上大多数国家的电力工业的标准频率(即“工频”)是 50 Hz, 美国和西欧一些国家的工频为 60 Hz。

**【例 2-6】** 已知工频正弦量为 50 Hz, 试求其周期  $T$  和角频率  $\omega$ 。

解:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314 \text{ rad/s}$$

即工频正弦量的周期为 0.02 s, 角频率为 314 rad/s。

(3) 相位。

① 相位及初相位。式(2-26)中的  $\omega t + \varphi_i$  称为正弦量相位角或相位, 它是随时间变化的量, 反映正弦量的变化进程。把  $t = 0$  时的相位  $\varphi_i$  称为正弦量的初相位, 简称初相, 它反映计时起点的正弦量的值。初相值和时间起点的选择有关。

② 相位差。两个同频率正弦量的相位之差称为相位差, 用  $\varphi$  表示。如图 2-17 所示的两个正弦电流为:

$$i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \phi_{i1})$$

$$i_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \phi_{i2})$$

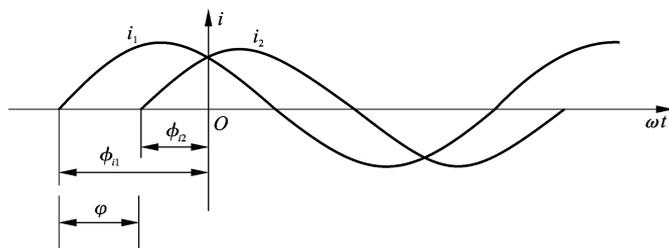


图 2-17 电流  $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$  的波形

相位差  $\varphi = (\omega t + \phi_{i1}) - (\omega t + \phi_{i2}) = \phi_{i1} - \phi_{i2}$ 。可见, 相位差等于初相差, 且为一常数, 与时间变量  $t$  无关, 即相位差与计时起点无关。

若  $\varphi > 0$ ,  $\phi_{i1} > \phi_{i2}$ , 则电流  $i_1$  超前  $i_2$ 。

若  $\varphi < 0$ ,  $\phi_{i1} < \phi_{i2}$ , 则电流  $i_1$  滞后  $i_2$ 。

若  $\varphi = 0$ ,  $\phi_{i1} = \phi_{i2}$ , 则电流  $i_1$  与  $i_2$  同相。

若  $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ , 则电流  $i_1$  与  $i_2$  正交。

若  $\varphi = \pm \pi$ , 则电流  $i_1$  与  $i_2$  反相。

此时, 两个不同频率的正弦量的相位差不再是一个常数, 而是随时间变化的量。对不同频率的正弦量谈相位差是无意义的。

## 2. 正弦交流电的有效值

交流电的大小和方向随时间变化, 所以不论是测量还是计算都不方便, 为此引入了有效值的物理量。有效值用大写字母表示, 如  $U$  和  $I$ 。

有效值的定义是当某一交流电流和一直流电流分别通过同一电阻  $R$  时, 如果在一个周期  $T$  内产生的热量相等, 那么这个直流电流  $I$  的数值叫作交流电流的有效值。

正弦交流电流  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$ , 一个周期内在电阻  $R$  上产生的能量为:

$$W = \int_0^T i^2 R dt$$

直流电流  $I$  在相同时间  $T$  内, 在电阻  $R$  上产生的能量为:

$$W = I^2 R t$$

根据有效值的定义, 有:

$$I^2 R t = \int_0^T i^2 R dt$$

于是得:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2-35)$$

式(2-35)为有效值的定义式, 适用于任何周期变化的电流、电压及电动势。由此可知, 周期量的有效值等于其瞬时值的平方在一个周期内积分的平均值再取平方根, 所以有效值又称为均方根值。

将正弦交流电流  $i = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$  代入式(2-35)得:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \phi_i) dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \left[ \frac{1}{2} - \cos 2(\omega t + \phi_i) \right] dt} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \end{aligned}$$

即

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, I \text{ 称为有效值} \quad (2-36)$$

$$I_m = \sqrt{2} I, I_m \text{ 称为峰值} \quad (2-37)$$

同样可定义电压有效值为:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2-38)$$

$$U_m = \sqrt{2}U \quad (2-39)$$

通常所称的正弦电压、正弦电流的大小，除特殊说明外，一般都是指其有效值。例如工业供电电压为 220 V 就是指有效值；各种电气设备的额定值，电磁式、电动式仪表测量的数值，也均是指有效值。

**【例 2-7】** 已知正弦电流  $i = 20\sin(314t + 150^\circ)$  A，电压  $u = 10\sqrt{2}\sin(314t - 30^\circ)$  V。试分别画出它们的波形图，并求出它们的有效值、频率及相位差。

**解：**  $i$ 、 $u$  波形图如图 2-18 所示。其有效值为：

$$I = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14.142 \text{ A}, U = 10 \text{ V}$$

$i$ 、 $u$  的频率为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50 \text{ Hz}$$

$u$ 、 $i$  的相位差为：

$$\varphi = \phi_u - \phi_i = -30^\circ - 150^\circ = -180^\circ$$

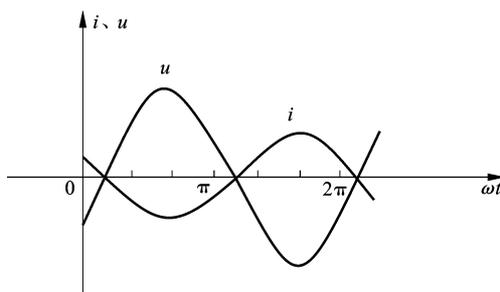


图 2-18 例 2-7 波形图

### 3. 单一参数的正弦交流电路

在交流电路中，各种电气设备的作用尽管不同，但都可归纳为三类元件，即电阻、电感和电容元件的等效。下面讨论单一元件在交流电路中的电压和电流之间的大小与相位关系，并分析能量的转换和功率问题。

(1) 电阻元件。

在交流电路中常常遇到的白炽灯、电热器等都可以近似为电阻性元件，其符号和参考方向如图 2-19(a) 所示。

1) 电压与电流关系。

设电阻元件的电流  $i = \sqrt{2}I\sin(\omega t + \phi_i)$ ，电压  $u = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \phi_u)$ ，依据欧姆定律：

$$u = Ri = \sqrt{2}RI\sin(\omega t + \phi_i) = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \phi_u)$$

则有：

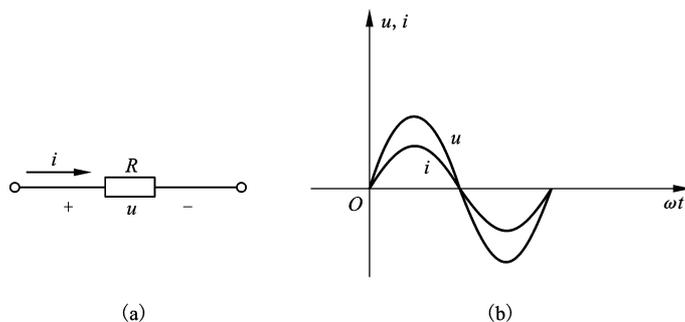


图 2-19 电阻中电压、电流的符号图、波形图

$$U = Ri, \phi_u = \phi_i$$

上式表明电阻上的电流、电压同相位，它们的有效值也服从欧姆定律。如图 2-19(b) 所示为电阻中电流、电压的波形图，它们是同相位的。

## 2) 功率。

电阻元件在正弦电流电路中也同样消耗功率。由于电压、电流随时间变化，故各时刻消耗的功率也不相同。电路任一瞬间吸收或消耗的功率称为瞬时功率，用  $p$  表示

$$p = ui$$

将正弦交流电  $u$ 、 $i$  的表达式代入上式(设初相  $\varphi = 0$ )，可得：

$$p = ui = 2UI\sin^2(\omega t) = UI[1 - \cos 2(\omega t)] \quad (2-40)$$

瞬时功率  $p$  随时间变化的规律如图 2-20 所示。式(2-34)中的前一部分是常量  $UI$ ，后一部分是以两倍频率变化的正弦量，整个波形在平均值  $UI$  上下变动。由于电压和电流同相，瞬时功率总是正值。或者说，对于任何瞬间，恒有  $p > 0$ 。因此，电阻元件是耗能元件。

瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率，用  $P$  表示

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI[1 - \cos(2\omega t)] dt = I^2 R = \frac{U^2}{R} = GU^2 \quad (2-41)$$

这与直流电路中计算电阻元件的功率形式完全一样。

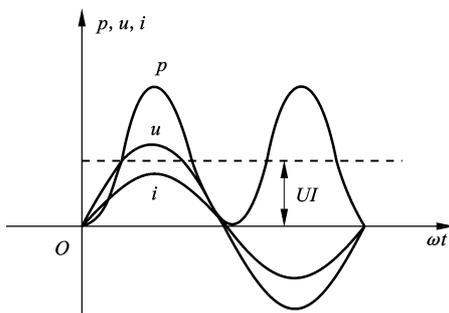


图 2-20 电阻中的功率

## (2) 电感元件

用导线在某种材料做成的芯子上绕制成的螺旋管称为电感线圈，也称电感器，如电动机的绕组、日光灯的镇流器线圈等。这些元件一般电阻都比较小，只需考虑其磁场效应即可，可视为纯电感元件。

### 1) 电压与电流关系。

将电感线圈接入交流电路中会产生感应电压，其符号和参考方向如图 2-21(a) 所示。

设经过电感的正弦电流、电压分别为：

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \phi_i)$$

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi_u)$$

根据电磁感应定律：

$$u = L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \omega L I \cos(\omega t + \phi_i)$$

$$= \sqrt{2} \omega L I \sin(\omega t + \phi_i + 90^\circ) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi_i + 90^\circ)$$

则有： $U = \omega L I$ ， $\phi_u = \phi_i + \frac{\pi}{2}$ 。可见，电感上的电压超前电流  $90^\circ$ ，即  $u$  与  $i$  正交，有效值关系为  $U = \omega L I$ 。如图 2-21(b) 所示为电感中电流、电压的波形图。

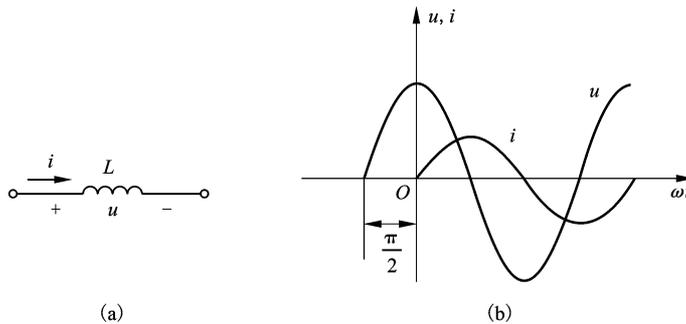


图 2-21 电路中电流、电压的波形图

### 2) 感抗。

电感中电压与电流的有效值关系为  $U = \omega L I$ ，则：

$$\frac{U}{I} = \omega L = X_L \quad (2-42)$$

式中： $X_L = \omega L = 2\pi f L$  具有电阻的量纲，而且带有对抗电流通过的性质，称为感抗，单位仍为欧姆( $\Omega$ )。频率越高，则电流变动越快，感应电动势将增大，相应地，电感两端的电压也将增大，故感抗将成比例地增大。因此，电感线圈常被应用于抑制高频电流或阻碍电流变化的场合。对于直流，因为  $\omega = 0$ ，所以  $X_L = \omega L = 0$ ，电感可看作短路。

### 3) 功率。

电感  $L$  吸收的瞬时功率(设  $\phi_i = 0$ )为：

$$p = ui = 2UI \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \sin(\omega t) = 2UI \sin[2(\omega t)]$$

如图2-22所示为 $p$ 随时间变化的规律。其瞬时功率是一个正弦变量，其最大值为 $UI$ ，频率为电流或电压频率的两倍。在第一个 $1/4$ 周期内， $u$ 和 $i$ 的方向一致，瞬时功率 $p$ 为正值，表示电感在吸收能量，并把吸收的能量转化为磁场能量。在第二个 $1/4$ 周期内， $u$ 和 $i$ 方向相反， $p$ 为负值，表示电感在供出能量，原先储存在磁场中的能量将逐渐释放，直到全部放出。后面两个 $1/4$ 周期过程与前面相似，不再重复。

由上述过程可见，电感元件是储能元件，它在电路中的作用是储存与释放能量，并不消耗能量，即它的平均功率为零，用公式表示为：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 0$$

电感不断吸收与供出能量，或者说电感和外部之间有能量交换，这种交换能量的规模可用无功功率表示。电感元件的无功功率为：

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L} \quad (2-43)$$

电感元件上的无功功率是感性无功功率，它在电力供应中占有很重要的地位。电力系统中具有电感的设备如变压器、电动机等，没有磁场就不能工作，而它们的磁场能量是由电源供应的，电源必须和具有电感的设备进行一定规模的能量交换，或者说电源必须向具有电感的设备供应一定数量的感性无功功率。

为了与平均功率相区别，无功功率的单位采用var(乏)，工程上常用的单位有kvar。

相对于无功功率，平均功率也称为有功功率。

### (3) 电容元件。

将两个金属片(或导体)用绝缘介质隔开，即构成一个储存电量 $q$ 的电器，称为电容器。若只考虑电容器的电场效应，且认为其中绝缘介质的损耗为零(即绝缘电阻为无穷大)，则此种电容器即可视为理想电容元件，如图2-23(a)所示。

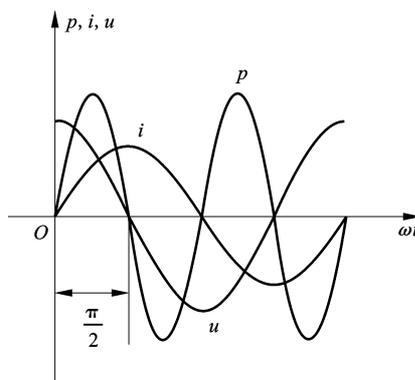


图2-22 电感中的功率

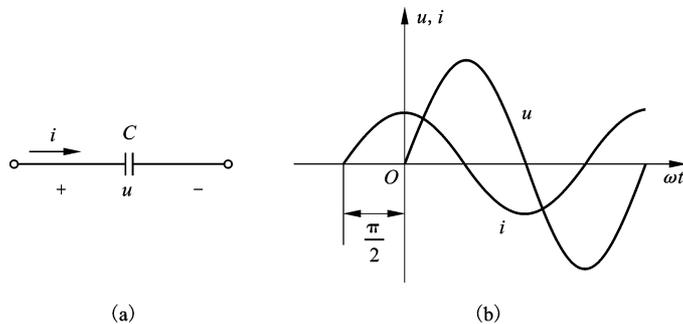


图2-23 电容中电压、电流波形图与相量图

为了表征电容元件储存电荷的能力,定义单位电压下它所能储存的电量为电容元件的电容量,简称电容,用  $C$  表示

$$C = \frac{q(t)}{u(t)} \quad (2-44)$$

式中:  $q(t)$  为电容元件极板上的电量;  $C$  的单位为法拉(F),有时还用微法( $\mu\text{F}$ )、皮法(pF)作为单位。

1) 电压与电流关系。

设经过电容的正弦电流、电压分别为:

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \phi_i) \\ u &= \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi_u) \end{aligned}$$

由于:

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du}{dt} = \sqrt{2} \omega C U \cos(\omega t + \phi_u) \\ &= \sqrt{2} \omega C U \sin(\omega t + \phi_u + 90^\circ) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \phi_u + 90^\circ) \end{aligned}$$

则有:  $I = \omega C U$ ,  $\phi_i = \phi_u + \frac{\pi}{2}$ 。可见,电容上电流超前电压  $90^\circ$ ,它们的有效值关系为  $I = \omega C U$ 。如图 2-23(b) 所示为电容中电流、电压的波形图。

2) 容抗。

电容中电压与电流的有效值关系为  $I = \omega C U$ , 则:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} = X_c \quad (2-45)$$

式中:  $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$  具有电阻的量纲,而且带有对抗电流通过的性质,称为容抗,单位仍为欧姆( $\Omega$ )。容抗与频率及电容均成反比。当电容  $C$  一定时,频率越高,电容极板上电荷的变化率就越大,容抗也就越小,因此,高频电流容易通过电容器。对于直流电路,电容可看作开路。

感抗、容抗统称为电抗。

3) 功率。

电容  $C$  吸收的瞬时功率(设  $\phi_u = 0$ ) 为:

$$p = ui = 2UI \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \sin\omega t = UI \sin(2\omega t) \quad (2-46)$$

如图 2-24 所示为  $p$  随时间变化的规律。其瞬时功率是一个正弦变量,其最大值为  $UI$ , 频率为电流或电压频率的两倍。在第一个  $1/4$  周期内,  $u$  和  $i$  的方向一致,瞬时功率  $p$  为正值,表示电容在吸收能量,并把吸收的能量转化为电场能量。在第二个  $1/4$  周期内,  $u$  和  $i$  方向相反,  $p$  为负值,表示电容在供出能量,原先储存在电场中的能量将逐渐释放直到全部放出。后面两个  $1/4$  周期过程与前面相似,不再重复。

由上述过程可见,电容元件是储能元件,它在电路中的作用是储存与释放能量,并不消耗能量,即它的平均功率为零,用公式表示为:

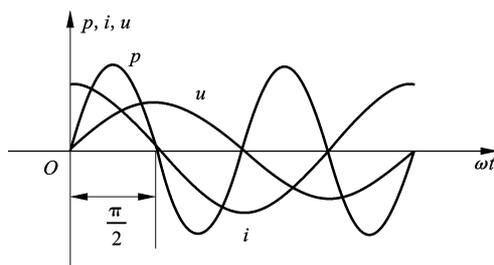


图 2-24 电容的功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 0$$

电容元件的无功功率为：

$$Q_c = UI = I^2 X_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (2-47)$$

### 5. RLC 串联交流电路

前面介绍了单一参数的交流电路，而实际电路往往是由多种元件组成的。下面分析如图 2-25(a) 所示的由  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联组成的交流电路。

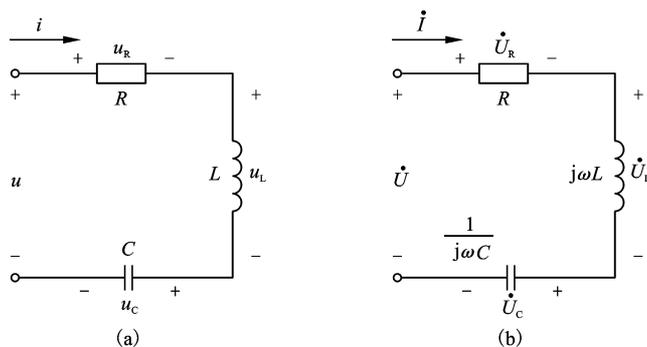


图 2-25 RLC 串联电路

#### (1) 电压与电流关系

设该串联电路中的电流为：

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \phi_i)$$

由 KVL 可以得到此电路瞬时值电压方程为：

$$u = u_R + u_L = u_C$$

可以求得：

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{U}{I} \quad (2-48)$$

$$\varphi = \phi_u - \phi_i = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = \arctan\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \quad (2-49)$$

以及：

$$\left. \begin{aligned} R &= |Z| \cos\varphi \\ X &= |Z| \sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2-50)$$

$|Z|$ 称为阻抗模，总是正值； $\varphi$ 是阻抗的辐角，称为阻抗角，可能是正的，也可能是负的，视 $X$ 的正负而定。显然， $|Z|$ 和 $R$ 、 $X$ 的单位相同，都是欧姆( $\Omega$ )。

若 $X_L > X_C$ ，则 $X > 0$ ， $\varphi > 0$ ，电路是电感性的；若 $X_L < X_C$ ，则 $X < 0$ ， $\varphi < 0$ ，电路是电容性的；若 $X_L = X_C$ ，则 $X = 0$ ，电路是电阻性的，电路发生谐振。 $\varphi$ 也是电压相量超前电流相量的角度，等于阻抗角。如上所述，对于感性电路， $\varphi > 0$ ；对于容性电路， $\varphi < 0$ 。

$|Z|$ 、 $R$ 、 $X$ 三者之间的关系构成一个三角形，称为阻抗三角形。若再将阻抗三角形的每一个边乘以电流有效值 $I$ ，又可得到电压三角形，如图2-26所示。这两个三角形相似，可得：

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ \quad (2-45)$$

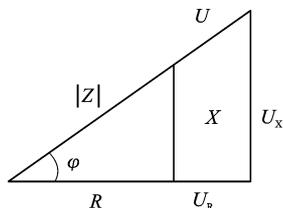


图 2-26 阻抗三角形和电压三角形

(2) 功率关系。

1) 瞬时功率。

瞬时功率 $p = ui$ ，即各瞬时的电压和电流相乘之积，其波形如图2-27所示。由图可发现，其功率有正有负，这说明在外电路和二端网络之间有能量往返交换，这种现象是由储能元件造成的。



正弦交流电功率

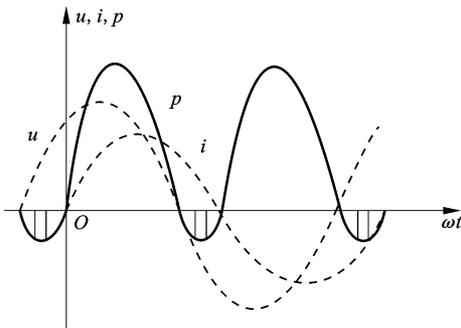


图 2-27 正弦交流电路的瞬时功率

2) 平均功率。

平均功率又称有功功率，即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos\varphi = UI\lambda \quad (2-51)$$

上式表明，正弦电流电路中的有功功率一般并不等于电压与电流有效值的乘积，它还与电压、电流之间的相位差 $\varphi$ 有关。式(2-51)中，有：

$$\lambda = \cos\varphi \quad (2-52)$$

$\lambda$ 称为二端网络的功率因数， $\varphi$ 称为功率因数角，它等于二端网络的等效阻抗的阻抗角。

若  $\varphi=0$ , 即  $\lambda = \cos\varphi = 1$ , 二端网络吸收的有功功率才等于电压与电流有效值的乘积, 这是因为当  $\varphi=0$  时, 电压与电流同相位, 二端网络等效于一个电阻。若  $\varphi = \pm\pi/2$ , 则  $\lambda = \cos\varphi = 0$ , 二端网络不吸收有功功率, 这是因为当  $\varphi = \pm\pi/2$  时, 电压与电流相位正交, 二端网络等效于一个电抗。

### 3) 无功功率。

电感和电容虽然本身并不消耗能量, 但却会在二端网络与外电路之间造成能量的往返交换现象。在工程上我们引入了无功功率的概念(用  $Q$  表示), 来衡量电路与电源之间能量交换的规模, 其表达式为:

$$Q = UI\sin\varphi \quad (2-53)$$

若电路中既有电感又有电容, 则它们在电路内部会先自行交换一部分能量, 其差额再与外电路进行交换。因而二端网络由外电路吸收的无功功率  $Q$  应等于电感吸收的无功功率  $Q_L$  与电容吸收的无功功率  $Q_C$  的差, 即

$$Q = Q_L - Q_C \quad (2-54)$$

### 4) 视在功率

变压器、电机及一些电气器件的容量是由它们的额定电压和额定电流决定的, 所以引入视在功率的概念。对于一个电路, 定义其电压、电流有效值的乘积为视在功率, 即

$$S = UI \quad (2-55)$$

视在功率的单位为 VA(伏安), 工程上也常用 kVA(千伏安)和 MVA(兆伏安)等作为单位。根据式(2-51)~式(2-53)可知,  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  存在以下关系:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-56)$$

$$\left. \begin{aligned} P &= UI\cos\varphi = S\cos\varphi \\ Q &= UI\sin\varphi = S\sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2-57)$$

因此,  $P$ 、 $Q$  和  $S$  也构成一个直角三角形, 如图 2-28 所示, 称为功率三角形。由图 2-28 可得出下列关系式:

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P}, \quad \cos\varphi = \frac{P}{S} = \lambda \quad (2-58)$$

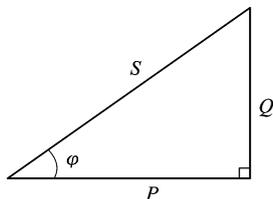


图 2-28 功率三角形

## 2.2.2 三相交流电路

目前, 国内外的电力系统普遍采用三相制供电方式, 它具有传输效率高、经济可靠、工作性能良好等优点。生活中常用的单相交流电源只是三相制中的一相。三相电路可看成复杂

电路的一种特殊类型，它是在单相交流电的基础上发展起来的，前述的有关单相正弦交流电路的基本理论、定律和分析方法完全适用于三相正弦交流电路。

### 1. 三相交流电源

#### (1) 三相交流电的产生。

三相正弦交流电是由三相交流发电机产生的，如图 2-29 所示为三相交流发电机的原理图。图中定子铁芯的内圆周表面有冲槽，用来放置三相定子(电枢)绕组，它们的始端标为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，末端标为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。每个绕组的两边放在相应的定子铁芯的槽内，三个绕组的始端之间彼此相隔  $120^\circ$ 。磁极是转子，是可以转动的。当原动机以均匀速度拖动转子转动时，每相定子绕组依次切割磁力线，将会产生频率相同、幅值相等、相位互差  $120^\circ$  的正弦电动势  $e_A$ 、 $e_B$ 、 $e_C$ ，称为对称三相电动势，参考方向由定子绕组末端指向始端。

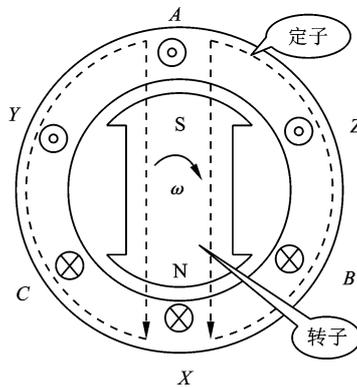


图 2-29 三相交流发电机原理图

实际中常采用三相电压源来分析三相电路。电压与电动势反相，电压的参考方向由定子绕组始端指向末端。这三个频率相同、有效值相等而相位互差  $120^\circ$  的电压源的组合称为对称三相电压源，简称对称三相电源。如果以  $A$  相为参考(初相位等于零)，则可得出对称三相电源的瞬时表达式为：

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \sqrt{2} U \sin(\omega t) \\ u_B &= \sqrt{2} U \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= \sqrt{2} U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2-59)$$

其波形图如图 2-30 所示。对称三相电源的电压瞬时值之和等于零，即

$$u_A + u_B + u_C = 0$$

三相电源中，各电压到达同一量值(例如正的最大值)的先后次序称为相序。在上述例子中，相序是  $A-B-C$ 。这种相序是  $A$  相比  $B$  相超前， $B$  相又比  $C$  相超前，称为正序；否则称为负序或逆序。无特别说明时，三相电源均认为是指正序对称三相电源。工业中通常在交流发电机的三相引出线及配电装置的三相母线上涂以黄、绿、红三种颜色，来分别表示  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三相。三相电源的相序改变时，将使其供电的三相电动机改变旋转方向，这种方法常用于控制电动机使其正转或反转。

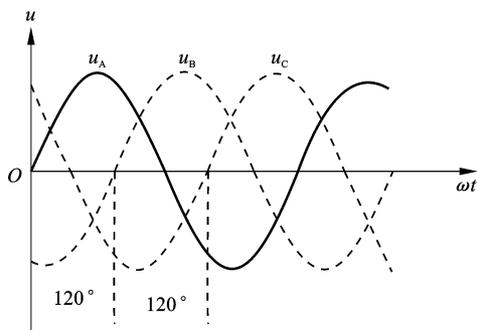


图 2-30 对称三相电源的电源波形图

## (2) 三相电源的连接

三相电源的连接有两种方式：星形连接与三角形连接。

①星形连接。星形连接就是将三个电压源的负极端  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  连接在一起而形成一个公共节点，记为  $N$ ，称为中性点；而从三个电压源的始端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  向外引出三条线，称为端线，也称为火线，如图 2-31 所示。有时从中性点  $N$  还引出一根线，称为中性线，当中性点接地时，中性线也称地线或零线。

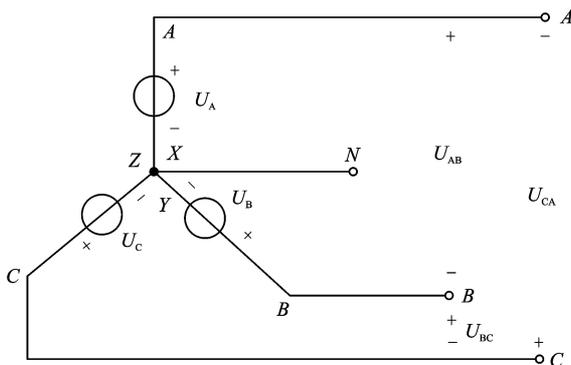


图 2-31 三相电源的星形连接

端线  $A$ 、 $B$ 、 $C$  之间的电压称为线电压，分别记为  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ 。端线中的电流称为线电流，流过每相电源的电流称为相电流。显然，对于星形连接的三相电源，线电流与相电流为同一电流。中性线中的电流称为中性线电流。每相电源的电压称为相电压，分别记为  $U_{AN}$ 、 $U_{BN}$ 、 $U_{CN}$ ，通常简记为  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 。对称三相电源星形连接时，如设  $A$  相相位为  $0^\circ$ ，则  $B$  相相位为  $-120^\circ$ ， $C$  相相位为  $120^\circ$ ，它们的大小均为  $U_p$ ，下标  $p$  表示相，通过基尔霍夫定律分析运算，三个线电压也是对称的，其有效值为相电压有效值的  $\sqrt{3}$  倍，即  $U_l = \sqrt{3}U_p$ （下标  $l$  表示线），其相位分别超前相应相电压  $30^\circ$ 。

②三角形连接。将对称三相电压源的始端与末端依次连接，组成一个闭合三角形，再从  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端向外引出三条端线，即构成三相电源的三角形连接，如图 2-32 所示。显然，三

角形连接时，其线电压等于相电压，但线电流不等于相电流。

应该指出，三相电源作三角形连接时，要注意接线的正确性。当三相电连接正确时，在三角形闭合回路中，总的电压为零。

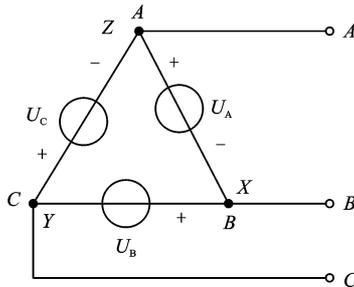


图 2-32 三相电源的三角形连接

## 2. 三相负载的连接

由三相电源供电的负载  $Z_A$ 、 $Z_B$ 、 $Z_C$  构成一个三相负载。三相负载有两类：一类是由三个单相负载(如灯泡、电烙铁)各自作为一相组成的；另一类是负载本身就是三相的，如三相电动机等。

三相负载也有两种连接方式：星形连接与三角形连接。

### (1) 星形连接。

如图 2-33 所示，将三相负载的末端连接在一起，这个连接点用  $N'$  表示，将其与三相电源的中性点  $N$  相连，三相负载的首端分别接到三根火线上，这种连接形式称为三相负载的星形连接，每相负载的阻抗为  $Z_A$ 、 $Z_B$ 、 $Z_C$ 。此时每相负载的额定电压等于电源的相电压。

流过每根端线的电流称为线电流，方向定为由电源流向负载；流过中性线的电流叫中性线电流，方向如图 2-33 所示；而流过负载的电流叫相电流，其方向与相电压方向一致。显然，在三相负载星形连接时，线电流等于相电流。

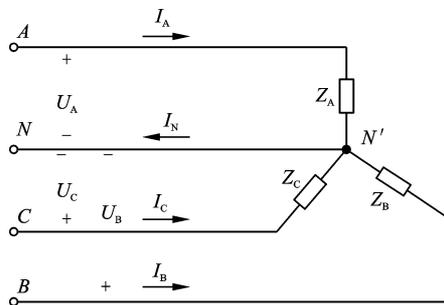


图 2-33 三相负载的星形连接

### 1) 三相负载不对称的情况。

在三相负载不对称的情况下，对于三相电路的计算，应分别计算每相电路。

由于相电流不对称,中性线电流一般不为零,如果这时将中性线断开,负载电压将失去平衡,使用电气设备不能正常工作,严重时将使设备损坏。因此,在照明线路中必须采用三相四线制,同时中性线连接应可靠并具有一定的机械强度,并且规定中性线上不准安装熔断器(俗称“保险丝”)或开关。

## 2) 三相负载对称的情况。

若每相负载的阻抗均相等,则称为平衡三相负载,也称为对称三相负载,此时 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 大小相等,频率相同,彼此间相位差等于 $120^\circ$ ,称之为三相对称电流。此时,中线电流 $I_N = 0$ ;负载的线电压与相电压之间的关系与电源作星形连接时相同,即 $U_l = \sqrt{3}U_p$ 。

如果三相电源和三相负载都对称,则称为对称三相电路。在对称三相电路中,若中性线中没有电流通过,则可以去掉中性线。这种用三根导线将电源和负载连接起来的三相电路称为三相三线制。在实际生产中,三相负载(如三相电动机)一般都是对称的,因此,三相三线制电路在工业生产中较为常见。

由于对称负载的电压和电流都是对称的,因此在对称三相电路中,只需要计算一相电路即可,其余两相可按照对称性写出。

## (2) 三角形连接。

如图2-34所示的三相负载的连接形式,称为三相负载的三角形连接。在此连接形式中,负载的额定电压等于电源线电压。

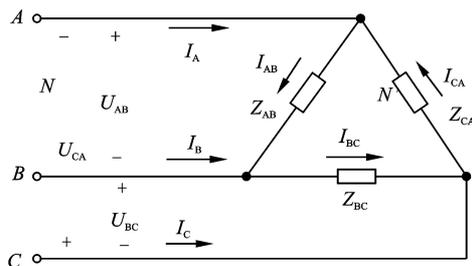


图 2-34 负载三角形连接电路

当 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ 时,三相负载对称;否则,三相负载不对称。

### 1) 三相负载不对称的情况。

三相负载不对称时,三相电路的每相负载需分别进行计算。由图2-34可知,各负载的线电压就是相电压,从而可得出各相相电流 $I_{AB}$ 、 $I_{BC}$ 、 $I_{CA}$ 。

### 2) 三相负载对称的情况。

每相负载的相电压与线电压相等,三个线电流和相电流都是对称的,其线电流有效值为相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,即

$$I_l = \sqrt{3}I_p \quad (2-60)$$

三相电路就是由上述各种连接方式的三相电源和三相负载组成的系统。视电源和负载为星形连接或三角形连接,可构成Y-Y连接、Y- $\Delta$ 连接以及 $\Delta$ -Y连接和 $\Delta$ - $\Delta$ 连接。

对比可知,电源电压不变时,对称负载由星形连接改为三角形连接后,相电压为星形连

接时的 $\sqrt{3}$ 倍,相电流也为星形连接时的 $\sqrt{3}$ 倍,而线电流则为星形连接时的 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}=3$ 倍。

### 3. 三相电路的功率

(1) 不对称三相电路功率的计算。

在负载不对称的情况下,三相电路中每相负载消耗的功率都不同,应分别计算。三相电路的有功功率应为各相负载的有功功率之和,即

$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C \\ &= U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C \end{aligned} \quad (2-61)$$

式中: $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 、 $\varphi_C$ 分别是A相、B相、C相在电压与电流为关联参考方向下的相电压与相电流之间的相位差,等于各相负载的阻抗角。

三相负载的总无功功率为:

$$\begin{aligned} Q &= Q_A + Q_B + Q_C \\ &= U_A I_A \sin\varphi_A + U_B I_B \sin\varphi_B + U_C I_C \sin\varphi_C \end{aligned} \quad (2-62)$$

式中: $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 、 $\varphi_C$ 分别是A相、B相、C相在电压与电流为关联参考方向下的相电压与相电流之间的相位差,等于各相负载的阻抗角。

(2) 对称三相电路功率的计算。

在对称三相电路中,各相负载吸收的有功功率相等,则式(2-61)可写为:

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi \quad (2-63)$$

式中: $U_p$ 是相电压; $I_p$ 是相电流; $\varphi$ 是相电压与相电流之间的相位差,等于负载的阻抗角。

或写成:

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi \quad (2-64)$$

式中: $U_l$ 是线电压; $I_l$ 是线电流; $\varphi$ 仍然是相电压与相电流之间的相位差,等于负载的阻抗角。

分析计算对称三相电路的总有功功率,常常用到式(2-64),因为它对Y连接或 $\Delta$ 连接的负载都适用,同时三相设备铭牌上标明的都是线电压和线电流,三相电路中容易测量出来的也是线电压和线电流。

在对称三相电路中,有:

$$Q = 3U_p I_p \sin\varphi = \sqrt{3} U_l I_l \sin\varphi \quad (2-65)$$

式中各符号的意义同前。

三相负载的总视在功率为:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-66)$$

在三相对称的情况下,有:

$$S = 3U_p I_p = \sqrt{3} U_l I_l \quad (2-67)$$

三相负载的总功率因数为:

$$\lambda = \frac{P}{Q} \quad (2-68)$$

在三相对称情况下 $\lambda = \cos\varphi$ ,也就是一相负载的功率因数, $\varphi$ 为负载的阻抗角。

对称三相电路中各相的瞬时功率可写为:

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = 3U_p I_p \cos\varphi$$

三相平衡负载的瞬时功率  $p(t)$  为一常量, 这种性质称为瞬时功率的平衡。瞬时功率平衡的电路称为平衡制电路。这是三相平衡负载的一大优点, 可以避免三相电动机在转动中产生振动。

在两种接法中, 星形连接时线电压增大到  $\sqrt{3}$  倍, 三角形连接时线电流增大到  $\sqrt{3}$  倍, 而两种接法的相电压、相电流及三相功率都未发生改变。

### 2.2.3 功率因数及其改善的方法

#### 1. 功率因数改善的意义

在建筑工程中, 许多电器设备, 如电动机、电磁铁、变压器以及照明用的日光灯等都是电感性负载, 它们的功率因数一般都不高, 这会引起下列两个问题。

(1) 降低了供电设备的利用率。

对于某一额定容量的电源设备来说, 它能发出的有功功率  $P = UI\cos\varphi = UI\lambda = S\cos\varphi$ 。显然, 功率因数越低, 该电源设备所发出的有功功率越小, 电源设备的利用率越低。

如: 一台 400 kVA 的变压器, 当负载的功率因数  $\cos\varphi = 0.95$  时, 变压器提供的有功功率为 380 kW; 当负载的功率因数  $\cos\varphi = 0.5$  时, 变压器提供的有功功率为 200 kW。可见, 若想充分利用设备的容量, 则应提高负载的功率因数。

(2) 增加了供电设备和线路的功率损耗。

当负载有功功率和电源电压一定时, 功率因数越低, 则线路上的电流  $I = P / (U\cos\varphi)$  越大, 线路上的功率损耗  $\Delta P = I^2 r$  也越大, 而且输电线路上的压降  $\Delta U = Ir$  增加, 使得负载上的电压降低, 影响负载的正常工作。

我国有关规程规定, 高压供电的用电单位, 最大负荷时的功率因数不得低于 0.9; 低压供电的用电单位, 最大负荷时的功率因数不得低于 0.85。如果达不到上述要求, 则必须进行无功补偿, 所以要采取措施提高功率因数, 这样才可充分利用电气设备, 提高供电质量。

#### 2. 改善功率因数的方法

改善功率因数最常用的方法有两种: 一种是在电站或变电站内用无功发电机(同步补偿机)或电力电容器, 对电网进行集中补偿; 另一种就是在电感性负载端并联电容器, 进行分散补偿。

并联电容器后, 流过感性负载的电流及其功率因数没有变, 而整个电路的功率因数  $\cos\varphi > \cos\varphi_1$ , 比并联电容前提高了; 电路的总电流  $I < I_L$ , 比并联电容前减小了。这是由于并联电容器后, 电感性负载所需的无功功率大部分可由电容的无功功率进行补偿, 减小了电源与负载之间的能量交换。但要注意, 并联电容后, 电路的有功功率并未改变。电容电流等于两个无功电流之差, 即

$$I_c = \frac{P}{U} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi)$$

又由于  $I_c = \omega CU$ , 所以需并联的电容  $C$  为:

$$C = \frac{I_c}{\omega U} = \frac{P}{\omega U^2} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi) \quad (2-69)$$

则需补偿的无功功率为:

$$Q_C = I_C U = \omega C U^2 = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi) \quad (2-70)$$

**【例 2-8】** 一盏功率为 40 W 的日光灯, 接在 220 V, 50 Hz 的交流电源上, 功率因数为  $\cos\varphi_1 = 0.5$ , 欲将功率因数提高到  $\cos\varphi = 0.9$ , 试求需补偿的无功功率。

解:

$$\cos\varphi_1 = 0.5, \text{ 则 } \tan\varphi_1 = 1.732$$

$$\cos\varphi = 0.9, \text{ 则 } \tan\varphi = 0.484$$

需补偿的无功功率为:

$$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi) = 40 \times (1.732 - 0.484) = 49.92 \text{ W}$$

## 小结

电路就是由若干电气器件按某种方式连接起来的电流的通路。一个完整的电路由电源、负载和中间环节三部分组成。电路有通路、开路和短路三种工作状态。

电流、电压的参考方向在分析电路时具有十分重要的作用。电动势是反映电源内部非电场力做功能力的物理量, 其方向与电压相反; 电功率是单位时间内某电路或元件传送或转换的电能。

欧姆定律和基尔霍夫定律是电路分析计算的基本定律。

三相对称电动势、电压或电流是指三个频率相同、振幅相等而相位互差  $120^\circ$  的三个正弦量。三相电路有两种连接方式: 一种是作星形连接时, 线电流等于相电流, 线电压是相电压的  $\sqrt{3}$  倍, 即  $U_l = \sqrt{3}U_p$ , 且线电压相位超前对应的相电压  $30^\circ$ ; 另一种是作三角形连接时, 线电压等于相电压, 线电流是相电流的  $\sqrt{3}$  倍, 即  $I_l = \sqrt{3}I_p$ , 且线电流相位滞后对应的相电流  $30^\circ$ 。

对称三相电路在分析计算时可化为 Y-Y 接线, 负载中性点对电源中性点电压  $U_{NN'} = 0$ , 中性线不起作用, 形成各相的独立性, 因而可归结为一相计算, 可单独画出等效的 A 相计算电路 ( $Z_N = 0$ ) 进行计算, 然后按照对称量的方法求得 B 相、C 相。

不对称三相电路的总功率等于三相功率之和, 对称三相电路的总功率等于  $P = 3U_p I_p \cos\varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi$ , 其中  $\varphi$  为各相负载的阻抗角。对称三相电路的总瞬时功率恒定; 三相四线制电路采用三个功率表分别测定三相功率, 三相三线制时可只用两个功率表测量三相功率, 然后求其合成。

改善负载的功率因数, 能提高供电设备的利用率, 减少供电设备和线路的功率损耗。

改善功率因数的方法: 一是提高自然功率因数; 二是利用人工补偿改善功率因数, 在电感性负载端并联电容器, 进行分散补偿。

## 技能训练

### 1. 实训项目

三相负载连接实验。

### 2. 实验目的

(1) 掌握三相负载的星形和三角形连接方法, 以及负载的线电压与相电压、线电流与相电流的关系。

(2) 了解三相四线制电路中中线的作用。

(3) 明确电工实验安全操作规程, 注意用电安全。

### 3. 实验仪器设备

三相灯箱 1 个; 交流电流表 1 块; 万用表 1 块; 电流表插座 6 个; 单刀单脚开关 2 个。

### 4. 实验内容与步骤

(1) 如图 2-35 所示连接电路, 图中 A 可用电流表插座来代替, 按实验表 2-1 中项目用万用表和交流电流表来测量、读数和记录( $S_1$  断开, 三相负载对称;  $S_2$  断开, 无中线)。

(2) 如图 2-36 所示连接电路, 图中 A 可用电流表插座来代替, 按实验表 2-2 中项目用万用表和交流电流表来测量、读数和记录( $S$  断开, 三相负载对称)。

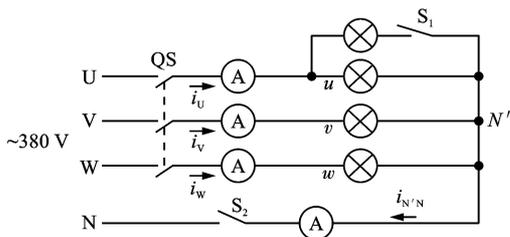


图 2-35 负载的星形连接

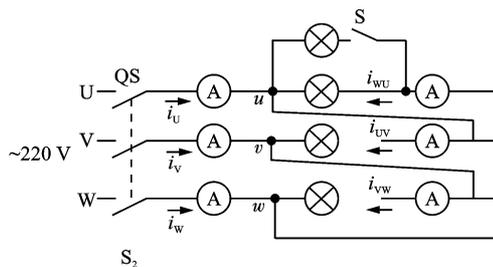


图 2-36 负载的三角形连接

表 2-1 负载星形连接时电压和电流的测量

负载情况	负载情况	$U_{UV}$	$U_{VW}$	$U_{WU}$	$I_U$	$I_V$	$I_W$	$I_{UV}$	$I_{VW}$	$I_{WU}$
有中线	负载对称									
	负载不对称									
无中线	负载对称									
	负载不对称									

表 2-2 负载三角形连接时电压和电流的测量

负载情况	$U_{UV}$	$U_{VW}$	$U_{WU}$	$I_U$	$I_V$	$I_W$	$I_{UV}$	$I_{VW}$	$I_{WU}$
负载对称									
负载不对称									

### 5. 实验报告要求

- (1)整理实验数据,结合负载对称和不对称两种情况,总结负载星形连接时线电压与相电压、线电流与相电流的关系。
- (2)总结分析中线  $N'N$  的作用。

## 思考与练习题

### 一、选择题

- (1)理想电压源输出恒定的电压,其输出电流( )。  
A. 恒定不变  
B. 等于零  
C. 由内电阻决定  
D. 由外电阻决定
- (2)一个电热器从 220 V 的电源取用的功率为 1000 W,如将它接到 110 V 的电源上,则取用的功率为( )W。  
A. 125  
B. 250  
C. 500  
D. 1000
- (3)电阻  $R_1$  的阻值比电阻  $R_2$  小,把它们并联后,总电阻( )。  
A. 既小于  $R_1$  又小于  $R_2$   
B. 小于  $R_2$  而大于  $R_1$   
C. 既大于  $R_1$  又大于  $R_2$   
D. 等于  $R_1$  与  $R_2$  之和
- (4)下列说法正确的是( )。  
A. 理想电压源和理想电流源可以等效互换  
B. 应用基尔霍夫定律列写方程式时,可以不参照参考方向  
C. 实际电感线圈在任何情况下的电路模型都可以用电感元件来抽象表征  
D. 网孔都是回路,而回路则不一定是网孔
- (5)电位是指电路中某点与( )之间的电压。  
A. 任意点  
B. 参考点  
C. 大地  
D. 电源负极
- (6)已知某电路的正弦电压  $u$  和正弦电流  $i$  的相位差为  $30^\circ$ ,电路呈容性,则电压  $u$  和电流  $i$  的相位关系是( )。  
A.  $u$  滞后  $i$  相位  $30^\circ$   
B.  $u$  和  $i$  同相  
C.  $u$  超前  $i$  相位  $30^\circ$   
D.  $u$  和  $i$  反相
- (7)在电感性负载两端并联一定值的电容,以提高功率因素,下列说法正确的是( )。  
A. 减少负载的工作电流  
B. 减少负载的有功功率  
C. 减少负载的无功功率  
D. 减少线路的功率损耗
- (8)若要求三相不对称负载中各相电压均为电源相电压,则( )。  
A. 星形有中线  
B. 星形无中线  
C. 三角形连接  
D. 星形与三角形连接均可以
- (9)下列结论中正确的是( )。  
A. 当三相负载越接近对称时,中线电流就越小  
B. 当负载作  $\Delta$  连接时,线电流为相电流的  $\sqrt{3}$  倍  
C. 当负载作 Y 连接时,必须有中线  
D. 当负载作  $\Delta$  连接时,线电流必等于相电流

(10) 星形连接时, 三相电源的公共点叫三相电源的( )。

- A. 中性点      B. 参考点      C. 零电位点      D. 接地点

二、计算题

(1) 如图 2-37 所示, 已知  $R_1=3\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=6\text{ k}\Omega$ , 电压表的内阻为  $9\text{ k}\Omega$ , 当电压表接在  $R_1$  两端时, 读数为  $2\text{ V}$ , 而当电压表接在  $R_2$  两端时, 读数为  $3.6\text{ V}$ , 试求电路两端( $AB$  间的)的电压和电阻  $R$  的阻值。

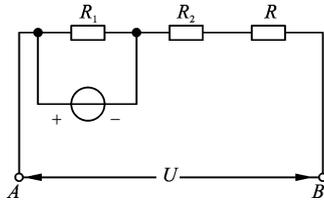


图 2-37 题 2-2 电路

(2) 求如图 2-38 所示的二端电路的等效电阻  $R_{ab}$ 。

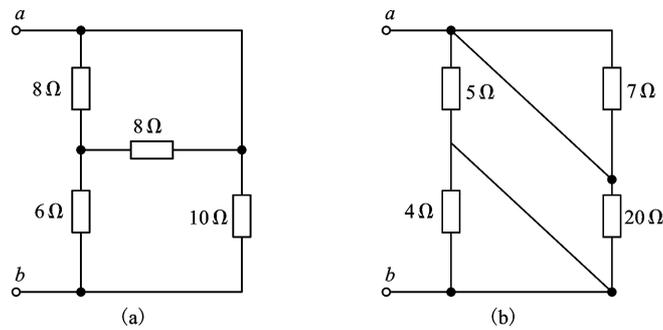


图 2-38 题 2-3 电路

(3) 如图 2-39 所示, 电路为实际中的电压测量电路。

- ① 若用内阻为  $1200\ \Omega$  的电压表测量, 求电压表的读数。
- ② 若用内阻为  $3600\ \Omega$  的电压表测量, 求电压表的读数。
- ③ 若用内阻为无穷大的电压表测量, 再求电压表读数。

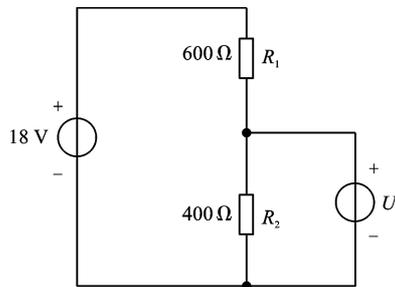


图 2-39 题 2-4 电路

(4) 已知如图 2-40 所示的电路中电压  $U=4.5\text{ V}$ , 试求电阻  $R$ 。

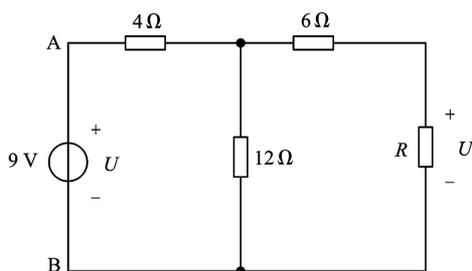


图 2-40 题 2-5 电路

(5) 在如图 2-41 所示的纯电阻电路中, 已知  $R = 22 \Omega$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ 。当  $u_R = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ V}$  时, 求电流  $i_R$ 。

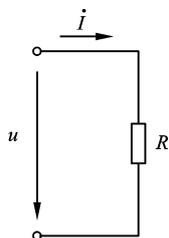


图 2-41 题 2-6 电路

(6) 一只  $110 \Omega$  的电阻元件接到  $U = 220 \text{ V}$  的正弦电源上, 求电阻元件中的电流有效值及其所消耗的功率。若该元件的功率为  $40 \text{ W}$ , 则它所能承受的电压有效值是多少伏?

(7) 有一只  $C = 100 \mu\text{F}$  的电容元件接到  $f\sqrt{2} \sin \omega t$  的电源上。求电路中的电流有效值, 写出其瞬时值表达式。

(8) 某线圈的电感量为  $0.1 \text{ H}$ , 电阻可忽略不计。接在  $u = 220\sqrt{2} \sin(314t + 45^\circ) \text{ V}$  的交流电源上。试求电路中的电流及无功功率; 若电源频率为  $100 \text{ Hz}$ , 电压有效值不变, 又如何? 写出电流的瞬时值表达式。

(9) 正弦交流电路有一感性负载, 其额定功率  $P = 2.64 \text{ kW}$ , 功率因数  $\cos \varphi = 0.6$  (滞后), 工作电压是工频正弦电压为  $220 \text{ V}$ 。

① 为使负载的功率因数达  $0.9$ , 所需的补偿电容器的电容量  $C$  为多少?

② 计算补偿前后输电线路中的电流值。

(10) 有一对称三相负载, 每相电阻  $R = 6 \Omega$ , 电抗  $X = 8 \Omega$ , 三相电源的线电压  $U = 380 \text{ V}$ 。求:

① 负载做星形连接时的功率  $P_Y$ 。

② 负载做三角形连接时的功率  $P_\Delta$ 。

(11) 某超高压输电线路中, 线电压为  $2.2 \times 10^5 \text{ V}$ , 输送功率为  $2.4 \times 10^8 \text{ W}$ 。若输电线路的每相电阻为  $10 \Omega$ 。

① 试计算负载功率因数为  $0.9$  时线路上的电压降及输电线上一年的电能损耗。

② 若负载功率因数降为  $0.6$ , 则线路上的电压降及一年的电能损耗又为多少?

## 模块二

---

# 常用低压电气设备及其控制电路



## 项目3 电气设备的功能及选择原则

### 项目描述

本项目主要讲授电气设备按正常工作条件、短路工作条件以及环境条件的选择原则，阐述了如何划分一次设备和二次设备，并对常用电气设备按主要品种和用途进行了分类。

### 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1) 熟悉常用电气设备的种类和用途； (2) 了解电气设备选择的原则； (3) 熟悉电气设备的安装调试	(1) 能正确区分电气设备的种类； (2) 具备按正常工作条件选择电气设备的能力； (3) 能够按短路条件进行选择 and 校验电气设备	(1) 从电气设备的选择原则这个角度，确保电气设备的正常运行，达到人身和财产安全的目的； (2) 绿色环保意识； (3) 思政元素：绿色环保、劳动精神

### 案例引入

电气设备除了为生活提供便利的用电设备外，还包括用于对电路进行接通、分断，对电路参数进行变换的电气装置，如断路器、变压器等，而这些设备是每一个电气设计、安装人员必须熟悉的。对于建筑电气安装人员，通常要根据电气施工图纸采购设备，并且每一种设备的使用条件都是不一样的，所以要进行核对。

## 任务1 电气设备的功能

### 3.1.1 电气设备的分类

在电力系统中，电气设备是指用于发电、输电、变电和用电的所有设备。电气设备的常用分类有如下几种。

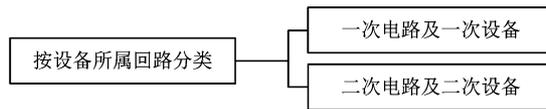
(1) 按设备所属回路来分，如图3-1所示。

1) 一次电路及一次设备。变、配电所中承担输送和分配电能任务的电路，称为一次电路或一次回路，亦称主电路。一次电路中所有的电气设备，称为一次设备。

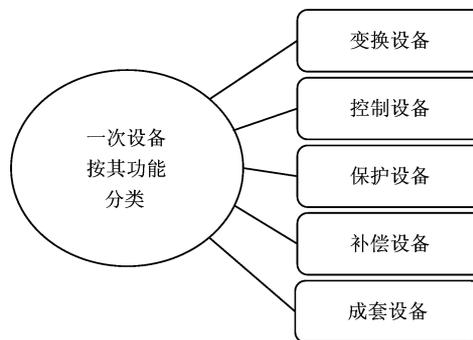
2) 二次电路及二次设备。凡用来控制、指示、监测和保护一次设备运行的电路，均称为二次电路或二次回路，亦称副电路。二次电路通常接在互感器的二次侧。二次电路中的所有设备，称为二次设备。



常用电气设备



(2)一次设备按其功能来分,可分为以下几类(见图 3-2)。



1)变换设备。其功能是按电力系统工作的要求来改变电压或电流等,例如电力变压器、电流互感器、电压互感器等。

2)控制设备。其功能是按电力系统工作的要求来控制一次设备的投入和切除,例如各种刀开关、低压断路器等。

3)保护设备。其功能是对电力系统进行过电流和过电压等的保护,例如熔断器、热继电器和避雷器等。

4)补偿设备。其功能是补偿电力系统的无功功率,以提高电力系统的功率因数,例如并联电容器等。

5)成套设备。它是按一次电路接线方案的要求,将有关一次设备及二次设备组合为一体的电气装置,例如高压开关柜、低压配电屏、动力和照明配电箱等。

### 3.1.2 常见的低压电气设备的主要种类及用途

常见的低压电气设备的主要种类及用途见表 3-1。

表 3-1 常见的低压电气设备的主要种类及用途

序号	类别	主要品种	用途
1	断路器	塑料外壳式断路器	主要用于电路的过负荷保护、短路、欠电压、漏电压保护,也可用于不频繁接通和断开的电路
		框架式断路器	
		限流式断路器	
		漏电保护式断路器	
		直流快速断路器	
2	熔断器	有填料熔断器	主要用于电路短路保护,也可用于电路的过载保护
		无填料熔断器	
		半封闭插入式熔断器	
		快速熔断器	
		自复熔断器	
3	刀开关	开关板用	主要用于电路的隔离,有时也能分断负荷
		负荷开关	
		熔断器式刀开关	
4	转换开关	组合开关	主要用于电源切换,也可用于负荷通断或电路的切换
		换向开关	
5	接触器	交流接触器	主要用于远距离频繁控制负荷,切断带负荷电路
		直流接触器	
6	起动器	磁力起动器	主要用于电动机的起动
		星三起动器	
		自耦减压起动器	
7	控制器	凸轮控制器	主要用于控制回路的切换
		平面控制器	
8	继电器	电流继电器	主要用于控制电路中,将被控量转换成控制电路所需的电量或开关信号
		电压继电器	
		时间继电器	
		中间继电器	
		温度继电器	
		热继电器	
9	主令电器	按钮	用作接通、分断控制电路,以发布命令或用作程序控制
		限位开关	
		微动开关	
		万能转换开关	

低压电器品种繁多,选用时应遵循以下两个基本原则(见图 3-3)。

(1)安全性。对低压配电电器,要求是灭弧能力强、分断能力好、热稳定性能好、限流准确等;对低压控制电器,则要求其动作可靠、操作频率高、寿命长并具有一定的负载能力。

所选设备必须保证电路及用电设备能安全可靠地运行,保证人身安全。

(2)经济性。在满足安全要求和使用需要的前提下,尽可能采用合理的、经济的方案及电气设备。

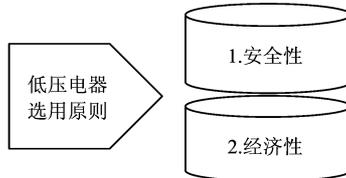


图 3-3 低压电器选用原则

## 任务 2 电气设备的选择原则

电气设备的选择,应符合国家现行的有关标准。

### 3.2.1 按正常工作条件选择

(1)电气设备的额定电压应与所在回路的标称电压相适应。电器的额定频率应与所在回路的标称频率相适应。

(2)电气设备的额定电流不应小于所在回路的负荷计算电流。切断负荷电流的电气设备(如开关、隔离开关)应校验其断开电流。接通和断开起动尖峰电流的电气设备(如接触器)应校验其接通、分断能力和每小时操作的循环次数(操作频率)。

(3)保护用电气设备还应按保护特性选择。

(4)低压电气设备的工作制通常分为 8 小时工作制、不间断工作制、断续周期工作制、短时工作制及周期工作制等几种,应根据不同要求选择其技术参数。

某些电气设备还应按有关专门要求进行选择,如互感器应符合准确等级的要求。

### 3.2.2 按短路工作条件选择

(1)可能通过短路电流的电气设备(如开关、隔离器、隔离开关、熔断器组合电器及接触器、起动器等),应满足在短路条件下短时耐受电流的要求,即校验动稳定和热稳定。动稳定是指电气设备在短路冲击电流所产生的电动力作用下,不致损坏的能力。热稳定是指电气设备载流导体在最大稳态短路电流作用下,其发热温度不超过载流导体短路时的允许发热温度。

(2)断开短路电流的保护电气设备(如低压熔断器、低压断路器),应满足在短路条件下分断能力的要求。开关设备的断流容量不小于安装地点最大三相短路容量。

### 3.2.3 按使用环境条件选择

电气设备的选择应适应所在场所的环境条件。当电气设备安装地点的环境条件，如海拔、温度、污秽等超过一般使用条件时，应采取措施进行设备调整。如高海拔地区需采用高原型设备或更高耐压设备，环境温度高的场合会降低设备的最高允许载流，污秽地区需采用防污型设备等。

因此，应根据电气设备的装置地点、使用条件、人员安全、检修和运行等要求，对设备进行种类(屋内或屋外)和型式(防污型、防爆型、湿热型等)的选择。

## 小结

在电力系统中，电气设备是指用于发电、输电、变电和用电的所有设备，包括一次回路和二次回路。一次电路是指变、配电所中承担输送和分配电能任务的电路；二次电路是指用来控制、指示、监测和保护一次设备运行的电路。

常用的低压电气设备有断路器、熔断器、刀开关、转换开关、接触器等，应根据安全性、经济性等指标来选用电气设备。

电气设备的选择，应符合国家现行的有关标准，具体常包括正常工作条件、短路工作条件和使用环境条件。

## 技能训练

### 1. 实训项目

参观学校的变配电室

### 2. 实训目的

通过参观学校的变配电室，初步了解变配电室电气设备的一次设备和二次设备。培养学生安全用电观念，如穿绝缘鞋，戴安全帽，遵守用电操作规程等。

### 3. 实训准备

联系学校的后勤管理部门，了解变配电室电气设备的相关情况。

### 4. 实训内容

(1) 了解变配电室高低压电气设备的分布情况。

(2) 分析判断电气设备的分类。

(3) 提交成果：填写该变配电室的电气设备使用条件表格，包括型号规格、正常使用条件下的参数、短路条件下的参数等。

## 思考与练习题

### 一、选择题

(1) 电气设备选择的一般原则是( )。

- A. 安全、经济                      B. 高效、节能  
C. 环保、经济                      D. 安全、智能

(2) 下列需要考虑短路分断能力的电气设备是( )。

- A. 刀开关                      B. 熔断器                      C. 接触器                      D. 负荷开关

(3) 电力系统中, 电气设备按设备所属回路可分为( )。

- A. 一次电路和二次电路                      B. 保护电路和测量电路  
C. 变换电路和控制电路                      D. 监视电路和控制电路

(4) 用电设备的额定电压一般比所接网络的额定电压( )。

- A. 高 5%                      B. 相同                      C. 低 5%                      D. 低 10%

### 二、简答题

(1) 低压电气设备是怎样分类的? 各有什么用途?

## 项目4 常用低压电气设备

### 项目描述

本项目主要讲授低压断路器、接触器、热继电器、变压器、电动机等常用电气设备的作用、结构组成、工作原理、图例、使用条件、安装要求等，并对低压配电装置的分类、配电等级、内部结构、低压保护装置的选择和电度表的接线方式进行讲解。

### 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1)掌握低压断路器的原理、分类和选择原则； (2)掌握接触器的原理、结构和选择条件； (3)掌握热继电器的原理、功能和选择原则； (4)了解低压配电装置的结构、分类、配电等级以及低压保护装置的选择； (5)掌握变压器的基本结构、工作原理以及安装要求	(1)具有断路器正确分类和根据正常工作条件与短路条件的选型能力； (3)具有接触器选择、安装能力； (4)具有热继电器选择、安装能力； (5)具有初步的对低压配电装置的选型和安装能力、对低压保护装置的选型和安装能力和对电度表的选型和接线能力； (6)具有对变压器运行参数的初步计算能力和安装能力	(1)具有安全用电观念； (2)具有绿色环保意识，在保证安全的前提下，力求节约原材料； (3)注重安装工艺质量，具有严谨细致、专注负责、精益求精的工匠精神和团队合作精神 (4)思政元素：匠心、细致、节约意识

### 案例引入

低压电气设备通常是指用于额定电压交流 1000 V 或直流 1500 V 以下回路中起保护、控制、调节、转换和通断作用的电气设备。我们知道终端变压器是把电压从高电压降至 380/220 V 低压，电动机是最常用的动力负载，而中间环节包括各种手动与自动开关、测量仪器仪表、保安设备和配电箱柜等。要了解建筑供配电系统知识，就必须熟悉这些常用电气设备，包括它们的名称、结构原理、作用以及如何选用等。

## 任务1 低压断路器

### 4.1.1 低压断路器工作原理

低压断路器(文字符号为 QF)是一种能自动切断电路故障的保护电器，主要用于保护低压交直流电路的线路及电气设备，使它们免受过电流、短路和欠电压等不正常情况的损害。

低压断路器具有良好的灭弧性能，它能带负荷通断电路，可用于电路的不频繁操作，主要由触头系统、灭弧系统、脱扣器和操作机构等组成。它的操作机构比较复杂，主触头的通断可以手动，也可以电动，故障时能自动脱扣。其工作原理如图 4-1 所示。实际上它相当于刀开关、熔断器、热继电器和欠电压继电器的组合。

断路器用作合、分电路时，可依靠扳动手动操作机构的手柄或者利用电动操作机构使得断路器的动、静触头闭合或者断开。

当断路器所在线路出现过载(过负荷)时，断路器热脱扣器中的双金属元件受热(或者通过它近旁的发热元件使得双金属元件受热)产生变形、弯曲，并打开锁扣使得断路器跳闸。热脱扣器一般用于过载保护。

当断路器所在线路中出现短路时，短路电流使得磁脱扣器的动衔铁被吸合，从而带动牵引装置使得断路器跳闸。磁脱扣器一般用于短路保护。

当断路器所在线路出现电压低于  $70\%U_N$ (额定电压)的情况时，欠电压脱扣器将触发断路器执行跳闸操作。这种脱扣被称为欠电压脱扣；当操作者需要从远方来操作断路器跳闸时，可以利用分励脱扣器。分励脱扣器可实现断路器的远程操作。



微型断路器跳闸实验

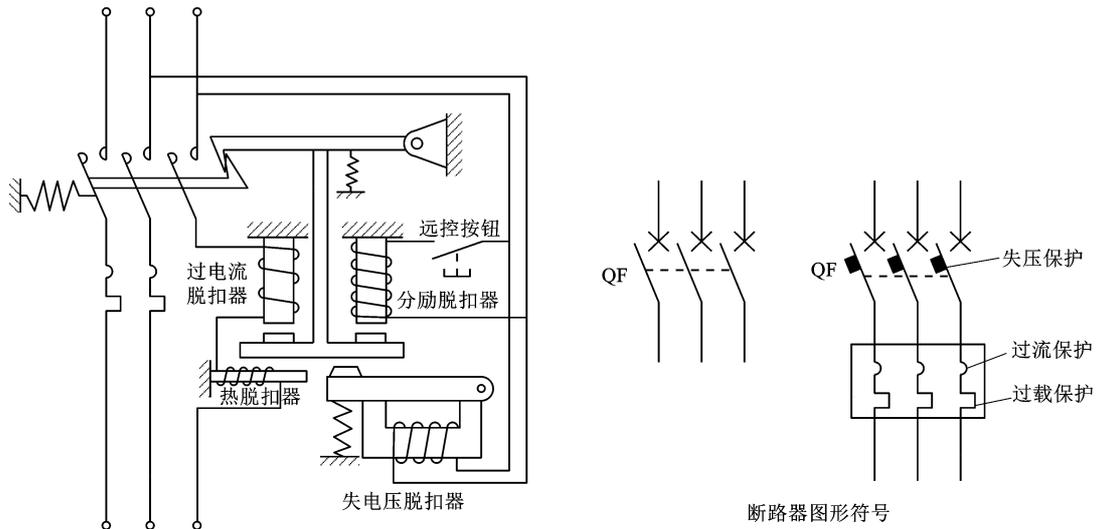


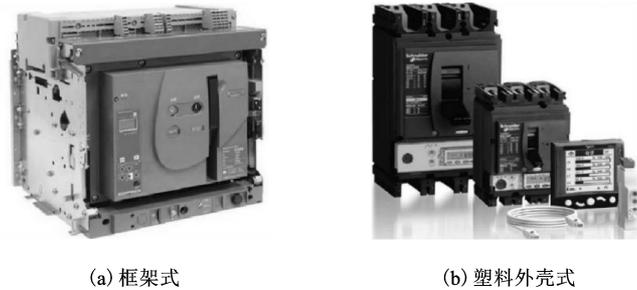
图 4-1 低压断路器工作原理示意图

## 4.1.2 低压断路器的分类

### 1. 断路器的结构形式

根据断路器的结构形式可分为框架式(ACB)和塑料外壳式(MCCB)，如图 4-2 所示。框架式低压断路器的结构是敞开装在框架上，因其保护方案和操作方式比较多，故有“万能式”之称。塑料外壳式低压断路器属于装置式，是民用建筑中常用的一种，它具有保护性能好、安全可靠等优点。额定电流较大，短路电流亦较大时，应选用万能式断路器；额定电流在 600 A 以下，且短路电流较小时，可选用塑壳断路器；微型断路器(MCB)一般用于照明、家

用电器等小容量设备,常配有漏电保护模块,适合非专业人员使用,并且不需要进行维护,其外形如图4-3所示。



(a) 框架式

(b) 塑料外壳式

图4-2 低压断路器外形图



图4-3 微型断路器外形图

## 2. 按保护对象分类

低压断路器保护对象的分类见表4-1。

表4-1 低压断路器保护对象分类

分类	功能类型	保护功能	保护对象
配电保护型	A类为非选择型	过载长延时、短路瞬时二段保护	电源、电气线路
	B类为选择型	过载长延时、短路短延时和短路瞬时的三段保护	
电动机保护型		短路、过载、欠电压	电动机
家用及类似用途		短路	照明、家用电器
漏电保护断路器		漏电等	触电、电气火灾保护

## 3. 断路器的脱扣形式

断路器脱扣器形式主要有热磁式和电子式两种。

热磁脱扣器的过载保护采用双金属片,在过电流持续一段时间后,双金属片的弯曲引起脱扣,而短路保护采用电磁原理,通过电磁线圈的短路电流瞬时推动衔铁带动脱扣。

电子脱扣器的过载和短路均采用电子控制器来推动脱扣机构脱扣(含长延时、短延时和瞬时)。

#### 4. 根据负荷特性分类

##### (1) 配电型断路器。

配电保护型断路器的反时限断开特性参见表 4-2。

表 4-2 配电保护型断路器的反时限断开特性

通过电流名称	整定电流倍数	约定时间/h		
		$I_n \leq 63 \text{ A}$	$I_n \geq 63 \text{ A}$	
约定不脱扣电流	$1.05I_n$	$\geq 1$	$\geq 2$	
约定脱扣电流	$1.30I_n$	$< 1$	$< 2$	
返回特性电流	$3.00I_n$	可返回时间/h		
		5	8	12

考虑到配电线路内有电动机群，由于电动机仅是其负载的一部分，且一群电动机不会同时起动，故确定为  $3I_n$  ( $I_n$  为断路器的额定电流， $I_n \geq I_L$ ， $I_L$  为线路额定电流)，对断路器进行试验，当试验电流为  $3I_n$  时，保持 5 s ( $I_n \leq 40 \text{ A}$  时)、8 s ( $40 \text{ A} < I_n < 250 \text{ A}$  时)、12 s ( $I_n > 250 \text{ A}$  时)，然后将电流返回至  $I_n$ ，断路器应不动作，这就是返回特性。

配电保护型的瞬动整定电流为  $10I_n$  (误差为  $\pm 20\%$ )， $I_n$  为 400 A 及以上规格，可以在  $5I_n$  和  $10I_n$  中任选一种 (由用户提出，制造厂整定)。

##### (2) 电动机保护型断路器。

对于直接保护电动机的电动机保护型断路器，它只要有过载长延时和短路瞬时的二段保护性能就够了，也就是说，它可选择 A 类断路器 (包括塑壳式和万能式)，DZ5、DZ15、TO、TG、GM1、TM30、HSM1 及 DW15 等系列除有配电保护的性能外，它们的 630 A 及以下规格均有保护电动机的功能 (表 4-3)。

电动机保护型的瞬动整定电流为  $12I_n$ ，一般设计时  $I_n$  可以等于电动机的额定电流。

表 4-3 电动机保护型断路器的反时限断开特性

通过电流名称	整定电流倍数	约定时间
约定不脱扣电流	$1.0I_n$	$\geq 2 \text{ h}$
约定脱扣电流	$1.2I_n$	$< 2 \text{ h}$
	$1.5I_n$	按电动机负载性质可选 2、4、8、12 min 之内动作，一般的选 2~4 min
	$7.2I_n$	$7.2I_n$ 也是一种可返回特性，它必须躲过电动机的起动电流 ( $5\sim 7$ 倍 $I_n$ )， $T_p$ 为延时时间，按电动机的负载性质动作，时间一般选用 $2 \text{ s} < T_p \leq 10 \text{ s}$ 或 $4 \text{ s} < T_p \leq 10 \text{ s}$

(3) 家用和类似场所保护型断路器。

家用和类似场所的保护(过去又称它为导线保护或照明保护),也是一种小型的A类断路器,其典型产品有C45N、PX200C、HSM8等。

见表4-4中的B、C、D型是瞬时脱扣器的形式: B型脱扣电流 $>3I_n \sim 5I_n$ , C型脱扣电流 $>5I_n \sim 10I_n$ , D型脱扣电流 $>10I_n \sim 20I_n$ 。用户可根据保护对象的需要,任选它们中的一种。

表4-4 家用和类似场所用断路器的过载脱扣特性

脱扣器形式	脱扣器额定电流 $I_n$	通过电流	规定极限时间	预期结果
B、C、D	$\leq 63$ A	$1.13I_n$	$\geq 1$ h	不脱扣
	$>63$ A		$\geq 2$ h	
B、C、D	$\leq 63$ A	$1.45I_n$	$< 1$ h	脱扣
	$>63$ A		$< 2$ h	
B、C、D	$\leq 32$ A	$2.55I_n$	1~60 s	脱扣
	$< 32$ A		1~120 s	
B	所有值	$3I_n$	$\geq 0.1$ s	不脱扣
C		$5I_n$		
D		$10I_n$		
B	所有值	$5I_n$	$< 0.1$ s	脱扣
C		$10I_n$		
D		$20I_n$		

在进行工程设计时,应根据不同的负载对象来选择不同保护特性(如上所述)的断路器,避免因选用不当而造成严重后果。在实践中,最容易混淆的是电动机负载保护误选为配电保护型或家用保护型。微型断路器(MCB)也有电动机保护型,如天津梅兰日兰的C45AD等,它们的保护特性应符合表4-3的要求。

### 4.1.3 低压断路器的基本特性参数

#### 1. 壳架等级额定值

壳架等级额定值是指配备有不同电流整定值的过电流脱扣器的断路器,能够承受最高的过电流脱扣器整定电流值。例如NS100,配热磁脱扣器16 A、25 A、32 A、40 A、50 A、63 A、80 A、100 A;配电子脱扣器40 A、100 A。

#### 2. 额定工作电压( $U_N$ )

额定工作电压( $U_N$ )是指断路器的标称电压,是在规定的正常使用和性能条件下,能够连续运行的电压。断路器能在系统最高工作电压下保持绝缘;并能按规定的条件进行关合与开断。我国规定在220 kV及以下电压等级,系统额定电压的1.15倍即为最高电压;330 kV及以上电压等级则以额定电压的1.1倍作为最高工作电压。

### 3. 额定电流( $I_n$ )

额定电流( $I_n$ )是指在环境温度为 $40^{\circ}\text{C}$ 情况下,脱扣器能长期通过的电流,也就是脱扣器额定电流。对带可调式脱扣器的断路器则为脱扣器可长期通过的最大电流。当在周围空气温度高于 $40^{\circ}\text{C}$ 但不高于 $60^{\circ}\text{C}$ 使用时,在符合标准规定的最高允许温度下,允许降低负荷长期工作。

### 4. 短路分断能力

额定极限短路分断能力 $I_{cu}$ :断路器在承受此短路电流时必须可靠地分断短路故障,但不要求断路器在未经过维修或更换零件的条件下仍能继续使用。

额定运行短路分断能力 $I_{cs}$ :断路器在承受此短路电流时必须可靠地分断短路故障,但要求断路器在未经过维修或更换零件的条件下能继续再次使用。

$I_{cs}$ 必定小于或等于 $I_{cu}$ ,一般用 $I_{cs}=\times\times\%I_{cu}$ 表示。

额定短时耐受电流 $I_{cw}$ :要求断路器在一定时间内承受一定的短路电流,不损坏并且仍能可靠地执行其功能。短时耐受电流必须给出两个值,一个是时间,一个是电流。比如 $1\text{ s}$ 、 $45\text{ kA}$ ,表示 $1\text{ s}$ 内可以承受的电流为 $45\text{ kA}$ 。

### 5. 过载脱扣器电流整定值( $I_{set1}$ )

电流超过脱扣电流整定值 $I_{set1}$ ,断路器延时跳闸(反时限或长延时)。它还代表着断路器不跳闸时所能承受的最大电流。该值必须大于最大负载电流 $I_c$ ,但是小于电路所允许的最大电流 $I_z$ 。

热脱扣继电器 $I_{set1}$ 通常可在 $0.7I_n\sim 1.0I_n$ 范围内调整,但是如果使用电子控制器,则其 $I_{set1}$ 调整范围会更大,通常为 $0.4I_n\sim 1.0I_n$ 。

对于配有不可调过电流脱扣继电器的断路器, $I_{set1}=I_n$ 。

### 6. 短路脱扣器电流整定值(瞬时 $I_{set3}$ 或短延时 $I_{set2}$ )

短路脱扣继电器(瞬时 $I_{set3}$ 或短延时 $I_{set2}$ ),用于高故障电流值出现时,使断路器快速跳闸。其跳闸阈值由家用型断路器的标准,如IEC 60898标准确定;或者依据相关标准,特别是IEC 60947-2标准,由工业用断路器的制造厂标出。

## 4.1.4 断路器的一般选用原则

断路器一般选用的原则如下。

- (1) 断路器额定电流(壳架电流) $\geq$ 负载工作电流(计算电流)。
- (2) 断路器额定电压 $\geq$ 电源和负载的额定电压。
- (3) 断路器脱扣器额定电流 $\geq$ 负载工作电流(计算电流)。
- (4) 断路器极限通断能力 $\geq$ 电路最大短路电流。
- (5) 断路器欠电压脱扣器额定电压=线路额定电压。

断路器选择还需考虑的因素有以下几种。

- (1) 结构形式的选择。
- (2) 断路器的使用环境:周围环境温度、位于配电亭或开关柜的外壳中、气候条件等。
- (3) 断路器的操作要求:选择性脱扣、遥控要求和指示及相关辅助触点,辅助脱扣线圈以及它们之间连线的要求。

- (4) 安装规定,特别是对人身的保护。  
 (5) 负载特性。

## 任务2 接触器



接触器

### 4.2.1 接触器结构及参数

接触器也称为电磁开关,它是利用电磁铁的吸力来控制触头动作的。接触器按主触头流过的电流可分为直流接触器和交流接触器两类,在工程中常用交流接触器(见图4-4)。

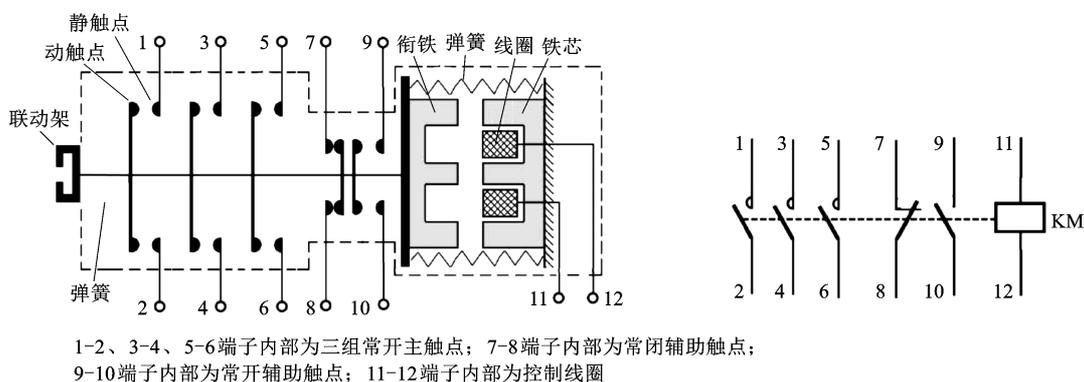


图4-4 交流接触器结构原理与符号

接触器触点有动合触点和动断触点两种:当线圈未通电时,触点是断开的,称为动合触点;而线圈未通电时,触点是闭合的,称为动断触点。显然,一旦线圈通电后,动合触点要闭合,动断触点要断开。当线圈失电后,所有触点又恢复原来的状态,即复位。另外,根据触点允许通过的电流大小,又可分为主触点和辅助触点两种。主触点接触面积较大,允许通过较大的电流。主触点上面装有灭弧装置,一般接在电动机的主电路上。辅助触点只能通过5 A以下的小电流,接在控制电路中主要起控制作用。

接触器的主要技术数据有额定电压、额定电流(均指主触头)、电磁线圈额定电压等。应用中一般选其额定电流大于负载工作电流的接触器,通常负载额定电流为接触器额定电流的70%~80%。

交流接触器线圈的额定电压有220 V、380 V和660 V等,使用时,必须根据控制电路的供电电压来选择接触器线圈的额定电压。

交流接触器的主要特点如下。

- (1) 它是用按钮来控制电磁线圈的,电流很小,控制安全可靠。当环境潮湿时,可选用电磁线圈电压为36 V的安全电压进行控制。
- (2) 电磁力动作迅速,可以频繁操作。如建筑工地的搅拌机、起重机等常用接触器来控制电动机负荷运行。
- (3) 可以用附加按钮实现一台电动机的多处控制或实现遥控功能。

(4)具有失电压或欠电压保护作用。当电压过低时,电磁线圈吸力变小,拉力弹簧使衔铁和拉杆动作,接触器自动断电。

常用的交流接触器有 CJX、C20 等系列,目前还有一种 B 系列的新型接触器。

#### 4.2.2 接触器的选择

选择接触器的依据主要是接触器的工作条件,重点考虑以下因素。

(1)接触器的类型要符合要求,控制交流负载应选用交流接触器,控制直流负载则选用直流接触器。

(2)接触器吸引线圈的额定电压应与控制回路电压相一致。

(3)接触器的使用类别应与负载性质相一致。应先将负载按上述接触器的使用类别进行划分,再根据工作类别选择接触器系列。

接触器主触头的额定工作电流应大于或等于负载电路的电流。应注意,当所选择的接触器的使用类别与负载不一致时,若接触器的类别比负载类别低,则接触器应降低一级容量使用。

(4)接触器主触头的额定工作电压应大于或等于负载电路的电压。

(5)接触器的主触头、辅助触头的数量必须满足控制要求。

### 任务3 热继电器

#### 4.3.1 热继电器结构及参数



热继电器

热继电器是一种用来对电动机等设备进行过载保护的电器。电动机等电器设备在运行过程中,由于种种原因,如长期过负荷等,都可能使其电流超过额定值,从而形成过载运行。长期过载运行将导致电动机等电器设备发热,使温升超过允许值,严重时将引起电器设备损坏。又因为在长期过载运行下,熔断器往往不会熔断,所以必须对电动机等电器设备进行过载保护。

热继电器的双金属片是由两种不同热膨胀系数的金属碾压而成的,由电阻丝组成的发热元件绕在双金属片外面。发热元件串联在电动机的主电路中,当电动机在额定负载下运行时,发热元件产生的热量不足以使双金属片产生足够的弯曲形变。一旦电动机过载,经过一定时间,双金属片就将因过热而产生足够大的弯曲形变,从而通过传动杆和活板将动断触点(由动触点和静触点组成)断开,通过控制电路的作用使电动机失电,达到过载保护的目。

热继电器在电路中只能作过载保护,不能作短路保护。因为双金属片从升温到发生弯曲直至分断动断触头需要一个过程,不可能在短路瞬间迅速分断电路。

热继电器的主要技术参数包括额定电压、额定电流、整定电流等。热继电器的额定电流是指允许通过的热元件的最大额定电流;热元件的额定电流是指该元件长期允许通过的电流值;热继电器的整定电流是指热继电器的热元件允许长期通过,但又刚好不致引起热继电器动作的电流值(见图 4-5)。

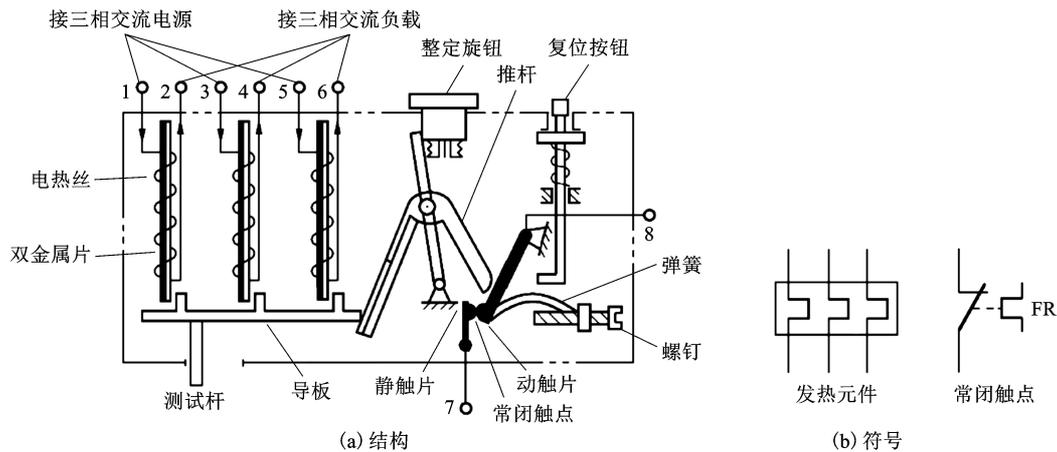


图 4-5 热继电器结构原理与符号

### 4.3.2 热继电器的选择

热继电器的选择按照下列原则进行。

(1) 一般情况下可选用两相结构的热继电器。对于电网电压均衡性较差、无人看管的电动机或与大容量电动机共用一组熔断器的电动机，宜选用三相结构的热继电器。而对于三相绕组作三角形连接的电动机，应采用有断相保护装置的三个热继电器作过载和断相保护。

(2) 热元件的额定电流等级一般应略大于电动机的额定电流。热元件选定后，将热继电器的整定电流调整到与电动机的额定电流相等，如果电动机的启动时间较长，可将热继电器的整定电流整定到稍大于电动机的额定电流。

(3) 对于工作时间较短、间歇时间较长的电动机或出于安全考虑不允许设置过载保护的电动机(如消防泵)，一般不设置过载保护。

(4) 双金属片式热继电器一般用于轻载、不频繁启动电动机的过载保护。对于重载、频繁启动的电动机，也可以选用过电流继电器进行过载或短路保护。

## 任务4 低压配电装置

### 4.4.1 低压配电装置的分类及配电等级

在低压电力网中，用来接受电力和分配电力的电气设备的总称，叫低压配电装置。其大体分为五个部分。

(1) 电路控制设备。有各种手动、自动开关。

(2) 测量仪器仪表。其中指示仪表有电流表、电压表、功率表、功率因数表等。计量仪表有有功电度表，无功电度表、以及与仪表相配套的电流互感器、电压互感器等。

(3) 母线以及二次线。母线包括配电变压器低压侧出口至配电室(箱)的电源线和配电盘上汇流排(线)。二次线包括测量信号，保护、控制回路的连接线。

(4)保安设备包括熔断器、继电器、触电保安器等。

(5)配电盘包括配电箱、配电柜、配电盘、配电屏等，是集中安装开关、仪表等设备的成套装置。

一个供电回路通过配电装置分配成几个供电回路过程的次数称为配电级数，通过几次分配就称作几级配电。对于一个配电装置而言，总进线开关与分支配出开关合起来算作一级配电，这与其总进线开关是断路器还是隔离开关无关。

由变电所 380 V 低压出线柜至建筑物配电柜，这是一级；由配电柜至各楼层照明或动力配电箱，这是二级；由楼层照明或动力配电箱至终端用电设备，这是三级。

一般配电级数不宜过多，过多会使系统可靠性降低，但也不宜太少，否则故障影响面太大。民用建筑常见的是采取三级配电，规模特别大的也有四级。

常用配电箱(柜)的代号见表 4-5。

表 4-5 常用配电箱柜的代号

编号	名称	编号	名称	编号	名称
AA	高压配电柜(低压柜部分)	AP	低压电力配电箱柜	AT	双电源自动切换箱柜
AL	低压照明配电箱柜	AX	电源插座箱	AFC	火警报警控制器箱
AW	计量箱柜	UAP	UPS 动力配电柜	UPD	UPS 输出配电柜
PM	精密配电柜列头柜	ALE	应急照明配电箱柜	APE	应急电力配电箱柜
AH	高压开关柜	AM	高压计量柜	AJ	高压电容柜
AF	低压负荷开关箱柜	ACC 或 ACP	低压电容补偿柜	ARC	低压漏电断路器箱柜
AC	控制屏台箱柜	AR	继电保护箱柜	AS	操作信号箱柜
AE	励磁箱柜	AD	直流配电箱柜	ARC	低压漏电断路器箱柜
AK	刀开关箱柜	ABC	设备监控器箱	ADD	住户配电箱
ATF	信号放大器箱	AVP	分配器箱	AXT	接线端子箱

#### 4.4.2 低压配电装置的结构

配电室是指带有低压负荷的室内配电场所，主要为低压用户配送电能，主要的低压配电箱(柜)包括进线柜、出线柜、计量柜、PT 柜、隔离柜、母线联络柜、电容器柜等。

分配电能的箱体叫做配电箱，主要用于对用电设备实施控制、配电，并且对线路的过载、短路、漏电起保护作用。配电箱安装在各种场所，如学校、机关、医院、工厂、车间、家庭等，有动力配电箱、照明配电箱等。

动力配电箱，进线 380 V 电压，交流三相进线，主要作为电动机等动力设备的配电，动力配电断路器选择配电型、动力型(短时过载倍数中、大)。

照明配电箱，进线 220 V 电压，交流单相进线，或进线 380 V 电压，交流三相进线，照明配电断路器一般选择配电型、照明型(短时过载倍数中、小)。

## 1. 开关柜

开关柜是一种成套开关设备和控制设备，它作为动力中心和主配电装置，主要用来对电力线路、主要用电设备实施控制、监视、测量与保护，常设置在变电站、配电室等处，如图4-6所示。

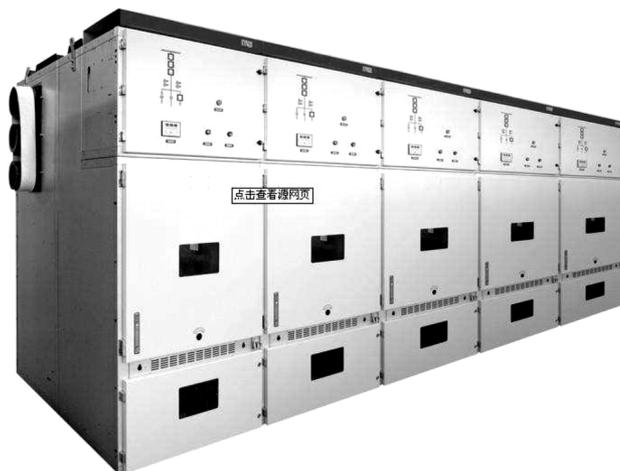


图4-6 KYN28-12 金属铠装开关柜

## 2. 智能配电箱

智能配电箱的特点如下。

(1) 远程控制。在配电箱内采用微机处理程序，根据无线电遥控、电话遥控及用户要求实现远程控制，如图4-7所示。



图4-7 智能配电箱

(2) 功能齐全。除拥有原配电箱的隔离断开、过载、短路、漏电保护功能外，还实现了人性化操作控制。并具备了定时、程序控制、监控、报警及声音控制、指纹识别等功能。

(3) 硬件配合。相应的断路器与漏电保护器均按照设计要求安装到配电箱内；电路控制板采用继电器、晶闸管与晶体管作为输出，对电器进行控制；输入采用模块化接口，有模拟量、开关量两种方式；面板控制采用触摸方式，遥控器采用无线电或者红外线方式进行控制。

(4) 布线方式。由于采用集中控制,原有的穿线必须换掉或者增加控制信号,因此配管必须增大型号。

### 3. 配电箱(柜)

(1) 配电箱(柜)的结构。

配电箱和开关柜除了功能、安装环境、内部构造、受控对象等不同外,最显著的区别还在于外形尺寸不同:配电箱体积小,可暗设在墙内,也可矗立在地面;而开关柜体积大,只能装置在变电站、配电室内。

配电箱按用途不同可分为动力配电箱和照明配电箱两种,动力配电箱主要用于对动力设备配电,但也可以兼向照明设备配电;照明配电箱主要用于照明配电,但也可以给一些小容量的单相动力设备包括家用电器配电。

照明配电箱的主要电器元件及其保护功能如下。

1) 微型断路器(MCB): 用作进线主开关或出线分开关,对配电线路提供过载和短路保护。

2) 隔离开关: 通常用做进线开关,做电源分、合隔离之用。

3) 漏电保护器: 一般选用漏电动作电流为 30 mA,能够对人身触电进行安全保护。

4) 浪涌保护器(SPD): 用于限制从电源线路传导的雷电过电压。

(2) 配电箱(柜)安装工艺要求。

配电箱(柜)上的电器、仪表应符合电器、仪表排列间距要求。紧固件均采用镀锌件。

二次配线均采用加套管编序,线径符合厂家标准。分层配电箱接线应考虑干线进出。开关接线端子应与导线截面匹配。配电箱(柜)装有计量仪表的导线(如多芯铜线),须采用套管或线鼻压接,并做好搪锡。电器安装后的配线须排列整齐,用尼龙带绑扎成束或敷于专用线槽内,并卡固在板后或柜内安装架处,配线应留适当长度。

配电箱(柜)所装的各种开关、继电器,当处于断开状态时,可动部分不宜带电;垂直安装时,上端接电源,下端接负荷;水平安装时,左端接电源,右端接负荷(指面对配电装置)。

配电箱(柜)电源指示灯,应接在总电源开关前侧。配电箱(柜)内的配线须按设计图样相序分色。

配电箱(柜)内的电源母线,应有颜色分相标志,见表 4-6。

表 4-6 颜色分相标志

相序	标色	相序	标色
L1	黄	N	淡蓝
L2	绿	PE	黄/绿
L3	红		

所有铜母线连接处都应做搪锡处理,裸露部分均喷黑漆,并贴色标。

配线整齐、清晰,导线绝缘良好。导线穿过铁制安装孔、面板时要加装橡皮或塑料护套。配电箱(柜)内的 N 线、PE 线必须设汇流排,汇流排的大小必须符合有关规范要求,导

线不得盘成弹簧状。

凡是两根以上电缆(包括有 $\pi$ 接的电缆)进一个开关的配电箱,总开关上端需要设过度处理装置。过度处理装置的规格必须与系统图中的电缆规格相匹配。

配电箱(柜)内的PE线不得串接,与活动部件连接的PE线必须采用铜质涮锡软编织线穿透明塑料管,同一接地端子最多只能压一根PE线,PE线截面应符合施工规范要求。

消防设备的配电箱(柜)及配电回路,必须有红色明显标识。

配电柜应靠墙安装,且前开门,暗装箱为前配线,明装箱为后配线。

### 4.4.3 低压保护装置

低压配电系统保护装置主要有以下几种。

(1)过负荷保护是为了防止线路发生过负荷而设置的保护装置,如热继电器、热脱扣器、熔断器(照明及无冲击负载线路或设备)。

(2)短路保护是当线路或设备发生短路故障时,避免线路、设备损坏或故障范围扩大而设置的保护装置,如熔断器、电磁式过电流继电器、脱扣器。

(3)欠压、失压保护,如欠压、失压脱扣器。

(4)接地故障保护是为了防止人身间接触电伤害和电气火灾危险而设置的保护装置,如漏电保护器。

低压保护装置按保护对象可分为低压进线保护装置、低压出线保护装置、低压电动机保护装置、低压电容器保护装置、低压母联保护装置、低压备自投保护装置、低压发电机后备保护装置等。这些产品一般均具有速断、过电流、过电流反时限、过负荷、低电压、过电压、母联备自投、进线备自投、复合电压闭锁过电流、PT断线等完善的保护功能,适用于低压配电系统。

### 4.4.4 电度表及接线方式

#### 1. 电度表的选用

电度表是计算电量(电能)的测量仪表,又称电能表。电度表按其使用的电路可分为直流电能表和交流电能表。交流电能表按其相线又可分为单相电能表、三相三线电能表和三相四线电能表。

正确选用电度表,首先是正确选择额定电压、额定电流和准确度,电度表的额定电压应与负载额定电压相符。电度表的最大电流应大于或等于负载的最大电流。电度表的准确度分为0.5级、1.0级、2.0级和3.0级。所谓准确度一般是指在额定电压、标定电流、额定频率和功率因数为1的条件下,基本误差不能超过标准规定相应值。使用时可根据使用要求选择适合准确度的电度表。

#### 2. 单相电度表的接线

单相电度表的接线盒有四个端子,即相线(火线)的一“进”一“出”和中心线(零线)的一“进”一“出”,如图4-8所示。

#### 3. 三相电度表的接线

三相电度表有三相三线制和三相四线制之分,三相三线制用于中性点不接地系统,三相四线制用于中性点接地系统,接线方法分别如图4-9和图4-10所示。



环网柜

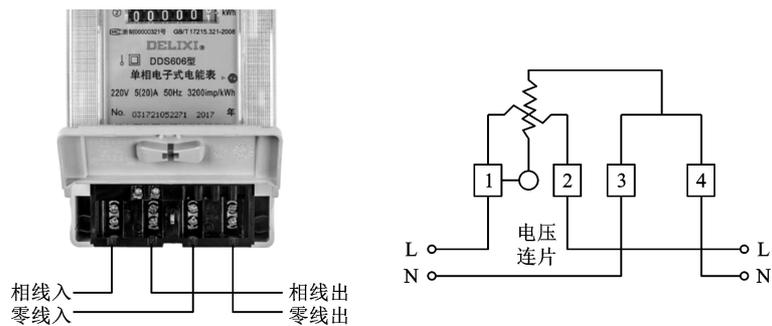


图 4-8 单相电度表实物图及其接线

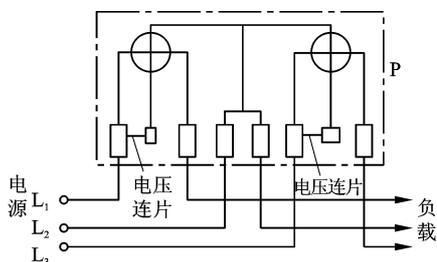


图 4-9 三相三线制电度表原理图及接线

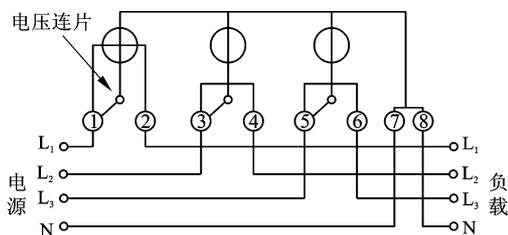


图 4-10 三相四线制电度表原理图及接线

## 任务 5 变压器

### 4.5.1 变压器的基本结构和工作原理

#### 1. 变压器的用途

变压器是一种静止的电气设备。它能根据电磁感应原理，把某数值的交流电压变换为频率相同而大小不同的交流电压。

在输电系统中，为减少电能输电线路上的损耗并节约电线材料，可采用高压输电，输电电压一般为 110 kV、220 kV、500 kV。但是，由于受到发电机本身结构及所用绝缘材料的限制，不可能直接产生这样高的电压，因此，在输电时要用变压器将电压升高。

电能输送到用电区域后，为了保证安全用电和满足用电设备的电压要求，必须用变压器将电压降低。例如，工厂的动力用电，其高压为 35 kV、10 kV 等，低压为 380 V、220 V 或 36 V、24 V 等。

变压器除可用于改变电压外，还可用于改变电流、变换阻抗及产生脉冲等。

#### 2. 变压器的基本结构

虽然变压器种类繁多，用途各异，但变压器的基本结构大致相同。变压器主要是由一个闭合的软磁铁芯和两个套在铁芯上相互绝缘的绕组所构成的，如图 4-11 所示。与交流电源



电力变压器原理与结构

相接的绕组叫做一次绕组，与负载相接的绕组叫做二次绕组。根据需要，变压器的二次绕组可以有多个，以提供不同的交流电压。

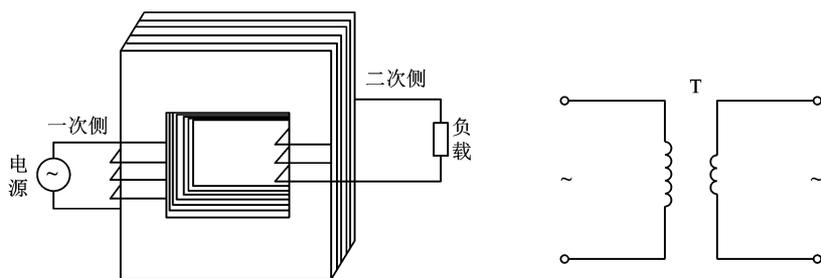


图 4-11 变压器的基本结构和符号

铁芯是变压器的磁路部分，绕组是变压器的电路部分。根据变压器铁芯和绕组的配置情况，变压器有芯式和壳式两种形式。

### 3. 变压器的工作原理

通常，凡与一次侧有关的各量，都在其符号的右下角标以“1”；而与二次侧有关的各量，都在其符号的右下角标以“2”。如一、二次电压，电流和匝数，功率分别为  $u_1$ 、 $u_2$ ， $i_1$ 、 $i_2$ ， $N_1$ 、 $N_2$ ， $P_1$ 、 $P_2$  等。

#### (1) 变压器的变压原理。

如图 4-12 所示，当变压器一次绕组接上交流电源，二次绕组接上负载阻抗  $Z_1$  时，变压器便在负载下运行起来。

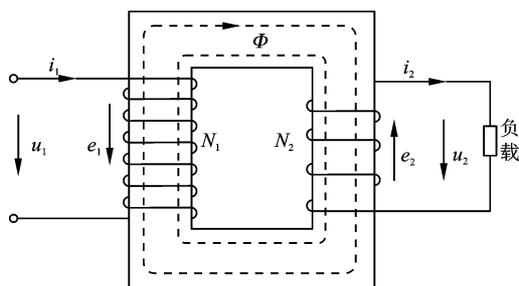


图 4-12 单相变压器原理

变压器一次绕组在交流电压  $U_1$  的作用下，在一次绕组内便产生一个交变电流  $i_1$ ，这个电流在铁芯中产生一个交变磁通，由于一、二次绕组同绕在一个铁芯上，所以交变磁通在穿过一次绕组的同时也穿过二次绕组，根据互感原理，在变压器二次侧会感应出交变电动势  $e_2$ ；如果二次绕组接上用电设备，便有电压  $U_2$  输出，即产生了变压器二次电流  $i_2$ 。经过公式推导，可得：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (4-1)$$

式中： $E_1$ 、 $E_2$  分别为一、二次电动势(V)； $U_1$ 、 $U_2$  分别为一、二次电压的有效值(V)； $N_1$ 、 $N_2$  分别为一、二次绕组的匝数； $n$  为一次侧、二次侧的电压比或匝数比。

式(4-1)表明，变压器一、二次绕组的电压比等于它们的匝数比。当  $n > 1$  时， $N_1 > N_2$ ， $U_1 > U_2$ ，这种变压器是降压变压器；当  $n < 1$  时， $N_1 < N_2$ ， $U_1 < U_2$ ，这种变压器是升压变压器。可见，只要选择一、二次绕组的匝数比，就可达到升压或降压的目的。

#### (2) 变压器的变流原理。

变压器在变压过程中只起能量传递的作用，无论变换后的电压是升高还是降低，电能都不会增加。根据能量守恒定律，在忽略损耗时，变压器的输出功率  $p_2$  应与变压器从电源中获得的功率  $p_1$  相等，即  $p_1 = p_2$ 。于是，当变压器只有一个二次绕组时，应有下述关系：

$$I_1 U_1 = I_2 U_2 \quad (4-2)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n} \quad (4-3)$$

式(4-3)说明，变压器工作时，其一次侧、二次侧电流比与一次侧、二次侧的电压比或匝数比成反比，而且一次电流随着二次电流的变化而变化。

变压器是根据电磁感应原理而工作的，它只能改变交流电压，而不能使直流电变压，因为直流电的大小和方向不随时间变化，在铁芯内产生的磁通也是恒定不变的，因而就不能在变压器二次绕组中感应出电动势，所以变压器对直流电不起变压作用。

**【例 4-1】** 某单相变压器的电压为 220 V、36 V，副边并接有两盏 36 V、100 W 的白炽灯。若变压器原绕组匝数为 950，则副绕组匝数是多少？当副边灯泡点亮时，变压器原、副绕组电流各为多少？

**解：**副绕组匝数为：

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} \times N_1 = \frac{36}{220} \times 950 = 155$$

灯泡点亮时，变压器副绕组电流

$$I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{100+100}{36} = 5.6 \text{ A}$$

原绕组电流为：

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \times I_2 = \frac{155}{950} \times 5.6 = 0.91 \text{ A}$$

### 4.5.2 变压器的运行特性

对于负载来讲，变压器相当于一个电源。对于电源，我们所关心的是它的输出电压与负载电流的大小关系，即所谓的变压器的外特性。为了适应不同负载的需要，可以根据运行情况，对变压器的输出电压进行必要的调整，从而保证供电质量。

#### 1. 变压器的外特性

当电源电压和负载的功率因数等于常数时，二次端电压随负载电流变化的规律，即  $u_2 = f(I_2)$ ，曲线称为变压器的外特性(由曲线)。变压器的外特性曲线可以用实验的方法求得，如图 4-13 所示为几条功率因数不同的变压器外特性曲线。

由图 4-13 所示的外特性曲线可见，功率因数对变压器外特性的影响是很大的，负载的

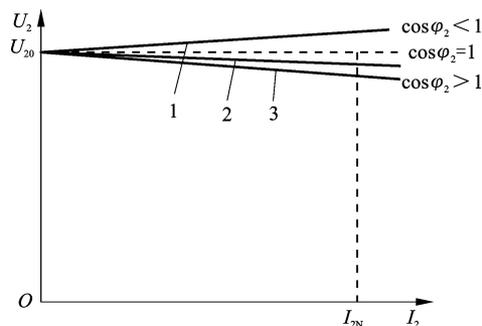


图 4-13 变压器外特性曲线

1—容性负载；2—阻性负载；3—感性负载

功率因数确定之后，变压器的外特性曲线也就随之确定了。

## 2. 变压器的电压调整率

从负载用电的角度来看，我们总希望电源电压是稳定的。但在一般情况下，当负载波动时，变压器的输出电压也是波动的。负载变动时，二次绕组输出电压的变化程度可以用电压调整率来描述。变压器从空载向额定负载（即  $I_2$  从 0 增大到  $I_{2N}$ ）运行时，二次绕组输出电压的变化量  $\Delta U$  与空载额定电压  $U_{2N}$  的百分比，称为变压器的电压调整率，用  $\Delta U\%$  表示为：

$$\Delta U\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{\Delta U}{U_{2N}} \times 100\% \quad (4-4)$$

式中： $U_{2N}$  为变压器二次绕组的额定电压（V）； $U_2$  为变压器输出额定电流时二次绕组的输出电压（V）。

电压调整率与变压器参数及负载性质有关。对于电力变压器，由于其一、二次绕组的电阻和漏抗都很小，额定负载时，电压调整率约为 4%~6%。但当负载功率因数下降时，电压调整率也会明显增大。因此，提高企业供电的功率因数，也有减小电压波动的作用。

电压调整率表征电网电压的稳定性，是变压器的主要性能指标之一，它在一定程度上反映了供电的质量。我国电力技术政策规定：35 kV 以上的电压，允许偏差为  $\pm 5\%$ ；10 kV 以下的高压供电和动力供电，允许偏差为  $\pm 7\%$ ；低压照明设备，允许偏差为  $-10\% \sim +5\%$ 。

## 3. 变压器的额定值

额定值是制造厂根据国家技术标准，对变压器正常可靠工作所做的使用规定，额定值通常标注在铭牌上，也称铭牌值。变压器的铭牌如图 4-14 所示。

### (1) 型号。

型号表示变压器的特征和性能。如 SL9-1000/10，其中 SL9 是基本型号（S 表示三相，L 代表铝线，9 为设计序号），1000 是指变压器的额定容量为 1000 kV·A，10 表示变压器高压绕组额定线电压为 10 kV。

### (2) 额定电压。

一次绕组的额定电压是指根据变压器的绝缘等级和允许发热条件规定的，加到一次绕组上的电源线电压额定值。二次绕组的额定电压是指一次绕组加上额定电压后，变压器在空载运行时二次绕组的电压值。

型号: SL9-1000/10		变压器			
相数: 3		冷却方式: 油浸自冷			
接线组别: Y, yn0		频率: 50 Hz			
容量	高压		低压		阻抗电压
kVA	V	A	V	A	V
50	10 500	58	400	1445	4.50
	10 000				
	9 500				

图 4-14 变压器的铭牌

### (3) 额定电流。

额定电流是指变压器正常运行时, 发热量不超过允许值的条件下所规定的满载电流值。

在变压器运行时, 超过了额定电流就处于过载运行。如果变压器长期过载运行, 绕组会产生高温, 严重影响变压器的使用寿命, 因此变压器不允许随意过载。

### (4) 额定容量。

额定容量是指变压器二次绕组输出的额定视在功率, 单位为伏安 ( $V \cdot A$ ) 或千伏安 ( $kV \cdot A$ ), 用符号  $S_N$  表示。

单相变压器表达式为:

$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (4-5)$$

三相变压器表达式为:

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (4-6)$$

## 4.5.3 特种变压器

较为常见的特种变压器有互感器、自耦变压器、电焊变压器等。

### 1. 互感器

电力系统中, 高电压和大电流不便于测量, 通常用特种专用的变压器把电流变小或把电压降低后再进行测量。这种特种专用的变压器就称为互感器, 统称为仪用变压器。利用互感器进行测量有以下优点。

(1) 使测量电路和仪表与高压隔离, 保证人身和测量仪表的安全。

(2) 便于将测量仪表标准化, 使用不同的互感器可以扩大仪表的量程, 提高测量的准确度。

(3) 可以减少测量中的能量损耗。

互感器分为电压互感器和电流互感器两种。

#### (1) 电压互感器。

电压互感器是一种电压变换电器, 可隔离高电压, 通常是将高电压变成低电压, 以取得测量和保护用的低电压信号, 副边绕组的额定电压是固定的, 为 100 V。电压互感器的额定电压等级有 6000 V/100 V、10000 V/100 V 等。使用过程中, 一次绕组并联在被测电路中, 接测量的高电压端; 二次绕组根据测量目的的不同, 接电压表、功率表或电能表的电压线圈, 如图 4-15 所示。

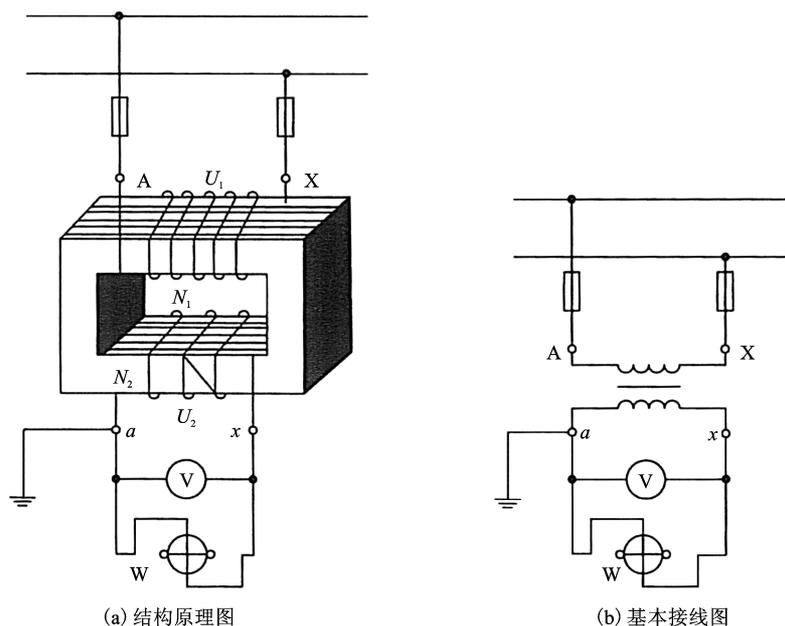


图 4-15 电压互感器

在使用电压互感器时，应注意以下三点。

- 1) 电压互感器在运行时，二次绕组不可短路。
- 2) 电压互感器的铁芯和二次绕组的一端必须可靠接地，目的是防止高压绕组绝缘被损坏时，铁芯和二次绕组带上高压而造成事故。
- 3) 电压互感器的准确度等级与其使用的额定容量有关。

## (2) 电流互感器。

电流互感器是一种电流变换电器，能隔离高电压和大电流，通常是将大电流变成小电流，以取得测量和保护用的小电流信号，副边绕组的额定电流是固定的，为 5 A。电流互感器的额定电流等级有 30 A/5 A、75 A/5 A、100 A/5 A 等。使用过程中，一次绕组串联在被测电路中，流过被测电流；二次绕组则根据测量目的的不同，连接电流表、电能表的电流线圈或电流继电器，如图 4-16 所示。

为了测量的准确和安全，在使用电流互感器时，应注意以下三点。

- 1) 电流互感器在运行中二次绕组绝对不能开路。
- 2) 电流互感器的铁芯和二次绕组要同时可靠接地，以免高压侧绝缘击穿时，损坏仪表或造成人身伤害。
- 3) 二次测负载阻抗要小于规定的阻抗，互感器准确度等级要比所接仪表的准确度高两级。

## 2. 自耦变压器

普通变压器一、二次绕组之间由磁通联系起来，称之为互感现象，也可以称为互耦现象。根据自感现象制成的变压器，称为自感变压器，也称为自耦变压器。自耦变压器的特点如下。

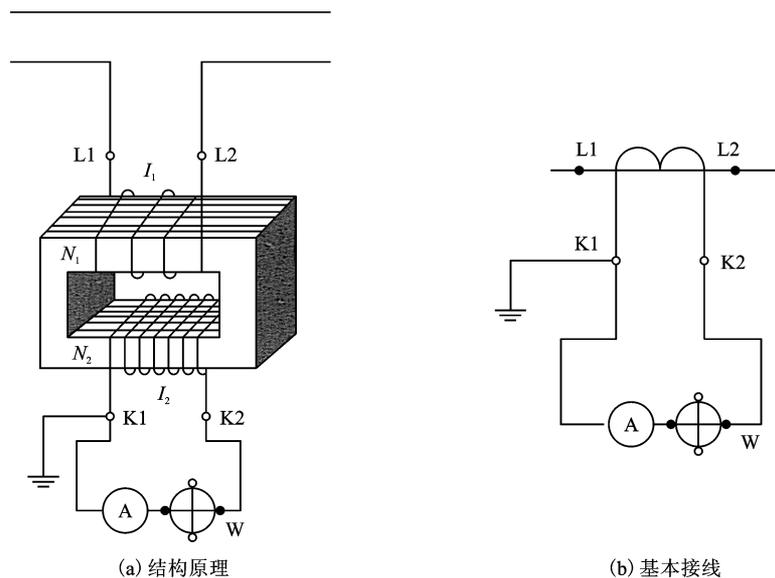


图 4-16 电流互感器

其一、二次绕组之间不仅有磁的联系，而且也有电的直接联系。

自耦变压器的结构与普通变压器相似，也是由铁芯和一、二次绕组两部分组成的；所不同的是，它的一、二次绕组是共用一个线圈的。

自耦变压器在使用时，要求正确接线，以保证安全。对于单相自耦变压器，要求把一、二次绕组的公用端接零线。三相自耦变压器的中性点则必须可靠接地。另外，自耦变压器连接电源之前，一定要把输出电压手柄转回到零位或所需要的电压挡位上。

自耦变压器的主要缺点是一、二次绕组的电路直接连接在一起，高压侧的电气故障会波及到低压侧。所以，接在低压侧的电器设备必须有防止过高电压的措施。而且规定，自耦变压器不准用作安全照明的变压器。

### 3. 电焊变压器

电焊变压器在生产实际中应用很广泛，主要是以结构简单、成本低廉、制造容易、维修方便、经久耐用而著称。交流电弧焊机的主要部分是电焊变压器，它实际上是一台特殊的降压变压器。

电弧焊是靠电弧放电的热量来熔化金属的，电焊条就是用来熔化的金属。焊接时的起弧电压为 60~75 V，起弧后电压降至 30~35 V。当焊条碰在工件上时，会产生短路，短路电流不应过大，也不应过小。为了适应不同的焊接要求，焊接电流应能够在较大的范围内进行调节。

### 4.5.4 变压器的安装准备及运行

目前使用比较普遍的 10 kV 配电变压器是油浸式变压器，但进入高层建筑内的配电变压器则要求为干式变压器。一般配电变压器单台容量不宜超过 1000 kVA，均为整体运输，整体安装。

### 1. 安装前的准备与检查

(1) 变压器安装前的准备工作。

- 1) 清理施工现场,以保证安装和各项试验安全顺利地进行。
- 2) 准备好变压器就位、吊芯检查及安装所用的工具。
- 3) 对于容量较大且需要滤油的变压器,应准备好滤油设备及防火用具。
- 4) 为保证安装和试验顺利进行,应准备好具有足够容量的临时电源。

(2) 变压器安装前的检查。

1) 外观检查。

- ① 核对变压器铭牌上的型号、规格等有关数据,应与设计图纸的要求相符。
- ② 变压器外部不应有机械损伤,箱盖螺栓应完整无缺,变压器应密封良好,无渗油、漏油现象。

③ 油箱表面不得有锈蚀,各附件油漆完好。

④ 套管表面无破损,无渗油漏油现象。

⑤ 检查变压器轮距是否与设计轨距相符。

⑥ 检查变压器油面是否在相应气温的刻度上。

2) 绝缘检查。

① 用 2500 V 兆欧表测量变压器高压对低压、对地的绝缘电阻值,阻值在 450 MΩ 以上。

② 绝缘油耐压数值在 25 kV 以上。

### 2. 变压器的装卸搬运与就位安装

(1) 变压器的装卸搬运。

为保证变压器安全地运到工地并顺利就位,在变压器的装卸和运输过程中应注意以下事项。

1) 采用吊车装卸起吊时,应使用油箱壁上的吊耳,严禁使用油箱顶盖上的吊环。吊钩应对准变压器中心,吊索与铅垂线的夹角不得大于 30°,若不能满足,应采用专用横梁挂吊。

2) 当变压器吊起约 30 mm 时,应停车检查各部分是否有问题,变压器是否平衡等,若不平衡,应重新找正。确认各处无异常,方可继续起吊。

3) 变压器装到拖车上时,其底部应垫以方木,且应用绳索将变压器固定,防止运输过程中发生滑动或倾倒。

4) 在运输过程中,车速不可太快,特别是上、下坡和转弯时,车速应放慢,一般为 10~15 km/h,以防因剧烈冲击和严重振动而损坏变压器内部绝缘构件。

5) 变压器短距离搬运可利用底座滚轮在搬运轨道上牵引,前进速度不应超过 0.2 km/h,牵引的着力点应在变压器重心以下。

(2) 变压器的就位安装。

变压器就位安装时应注意以下事项。

1) 变压器推入室内时,应注意检查高、低压侧方向与变压器室内的高低压电器设备的装设位置是否一致。

2) 变压器基础轨道应水平,轨距应与变压器轮距相吻合。装有瓦斯继电器的变压器,应使其顶盖在沿瓦斯继电器气流方向有 1%~1.5% 的升高坡度(制造厂规定不需安装坡度者除外)。

3) 装有滚轮的变压器,就位后应将滚轮加以固定。

4) 高、低压母线中心线应与套管中心线一致。母线与变压器套管连接,应防止套管中的连接螺栓跟着转动。

5) 在变压器的接地螺栓上接上地线,如要变压器的接线组别是 Y/Y0,则还应将接地线与变压器低压侧的零线端子相连。变压器基础轨道亦应和接地干线连接,并应连接牢固。

6) 在变压器顶部工作时,不得攀拉变压器的附件,要严防工具材料跌落而损坏变压器附件。

### 3. 变压器投入运行前的检查

#### (1) 通电前的要求。

通电前应对变压器进行全面检查,看其是否符合运行条件,如不符合应进行处理。其检查内容如下。

1) 检查变压器各处,应无渗油、漏油现象。

2) 油漆完整良好,母线相色正确。

3) 变压器接地良好。

4) 套管完整清洁。

5) 分接开关置于运行要求挡位。

6) 高、低压引出线连接良好。

7) 二次回路接线正确,试操作情况良好。

8) 全部电气试验项目结束并合格。

9) 变压器上无遗留的工具、材料等。

#### (2) 变压器的冲击试验。

全电压冲击试验由高压侧投入,接于中性点接地系统的变压器在进行冲击合闸时,其中性点必须接地。

变压器第一次通电后,持续时间应不少于 10 min,如变压器无异常情况,即可继续进行。要求 5 次冲击无异常情况,保护装置不应误动作。

冲击试验通过后,变压器便可带负荷运行。在试运行中,变压器的各种保护和测温装置等均应投入,并定时检查、记录变压器的温升、油位、渗漏等情况。

如变压器冲击合闸正常,且带负荷运行 24 h,并无任何异常情况,即可认为试运行合格。

## 任务 6 电动机

### 4.6.1 三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机由两个基本组成部分即定子和转子构成。其基本结构如图 4-17 所示。

#### (1) 定子。

三相异步电动机的定子由机座、定子铁芯和定子绕组等组成。

1) 机座。其主要作用是固定和支撑定子铁芯,要求有足够的机械强度和刚度,并能满足通风散热的需要。中、小型三相异步电动机一般采用铸铁机座,大型三相异步电动机一般采用钢板焊接机座。



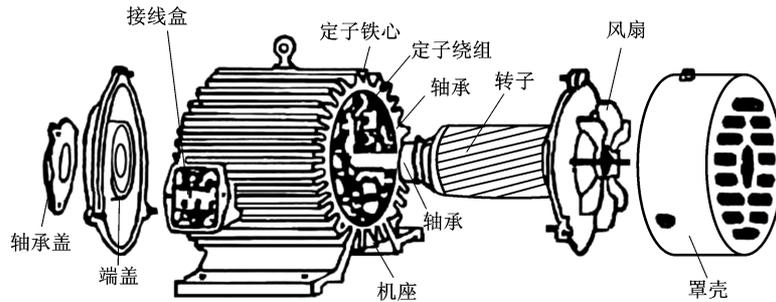


图 4-17 三相异步电动机的基本结构

2) 定子铁芯。其作用是成为电机磁路的一部分和放置定子绕组。为了减少磁场在铁芯中引起的涡流损耗和磁滞损耗，铁芯一般采用导磁性良好的硅钢片叠装压紧而成，硅钢片两面涂有绝缘漆，厚度一般为  $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。定子铁芯内圆上均匀分着形状相同的槽，槽内放置定子绕组。

3) 定子绕组。定子绕组是定子的电路部分，其主要作用是接三相电源，产生旋转磁场。三相异步电动机的定子绕组由三个独立的绕组组成，三个绕组的首端分别用  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  表示，其对应末端分别用  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  表示，六个端点都从机座上的接线盒中引出。

根据电力电网的线电压和各相绕组允许的工作电压，六个端点可以连接成星形或三角形。三相异步电动机的接法在其铭牌上已经注明，实际使用时应根据规定连接。

## (2) 转子。

三相异步电动机的转子主要由转子铁芯、转子绕组和转轴组成。

1) 转子铁芯。转子铁芯也是主磁路的一部分，通常由  $0.5 \text{ mm}$  厚的硅钢片冲压而成。

转子铁芯外圆周上有许多均匀分布的槽，槽内安放转子绕组。转子铁芯为圆柱形，固定在转轴或转子支架上。

2) 转子绕组。其作用是产生感应电流以形成电磁转矩，它分为笼型和绕线转子两种结构。

3) 转轴。转轴的作用是支撑转子，传递转矩，并保证定子与转子之间的气隙均匀度。转轴的材料一般为 45 号优质碳素结构钢。

4) 气隙。三相异步电动机的气隙很小，中、小型电动机一般为  $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ 。气隙的大小与异步电动机的性能有很大关系。为了降低空载电流，提高功率因数，增强定子和转子之间的相互感应作用，三相异步电动机的气隙应很小，但是又不能过小，否则会导致装配困难和运行不安全。

## 4.6.2 工作原理

### 1. 旋转磁场的产生

为了方便讨论问题，设三相对称绕组 ( $U_1-U_2$ 、 $V_1-V_2$ 、 $W_1-W_2$ ) 的每相绕组均由一匝线圈组成。它们的首端 ( $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ ) 或末端 ( $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ ) 在空间上彼此相隔  $120^\circ$ ，若将其末端接成一点，把三个首端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  接到三相对称电源上，即为星形连接，三相对称绕组中便通入了三相对称电流。三相对称电流的波形如图 4-18 所示。

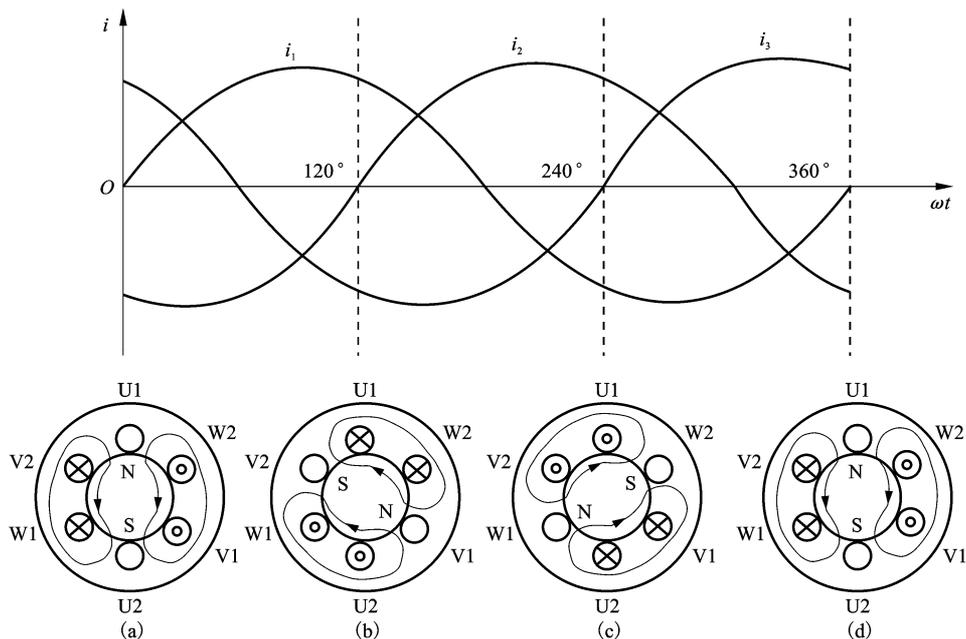


图 4-18 三相异步电动机旋转磁场的产生

一般规定，当电流为正半周时，电流从绕组的首端流向末端，即从首端流进去，从末端流出来。为了分析对称三相交流电流产生的合成磁场，下面通过研究几个特定的瞬间来分析整个过程。

当  $\omega t=0$  时， $i_1=0$ ，U 相绕组无电流； $i_2$  为负值，V 相中的电流实际方向与规定的参考方向相反，即电流是从末端 V2 流入，从首端 V1 流出； $i_3$  为正值，W 相中的电流实际方向与规定的参考方向一致，即电流是从首端 W1 流入，从末端 W2 流出。运用右手螺旋定则，可确定这一瞬间的合成磁场，如图 4-18(a) 所示。由图可见，合成磁场的方向此刻是自上而下，相当于一个 N 极在上、S 极在下的两极磁场。

当  $\omega t=120^\circ$  时， $i_1$  为正值，电流从 U1 流入，从 U2 流出； $i_2=0$ ； $i_3$  为负值，电流从 W2 流入，从 W1 流出。用同样的方法可得出此时的合成磁场，如图 4-18(b) 所示。由图可以看出，合成磁场的方向按顺时针方向旋转了  $120^\circ$ 。

当  $\omega t=240^\circ$  时， $i_1$  为负值， $i_2$  为正值， $i_3=0$ ，此时的合成磁场又沿顺时针方向旋转了  $120^\circ$ ，如图 4-18(c) 所示。

当  $\omega t=360^\circ$  时， $i_1=0$ ， $i_2$  为负值， $i_3$  为正值，其合成磁场再次顺时针方向旋转了  $120^\circ$ ，如图 4-18(d) 所示。此时，电流流向与  $\omega t=0$  时一样，合成磁场与  $\omega t=0$  时相比，共转了  $360^\circ$ 。由此可见，随着定子绕组中三相电流的不断变化，它所产生的合成磁场也不断地向一个方向旋转，当正弦交流电变化一周时，合成磁场在空间中也正好旋转一周，因此称之为旋转磁场。

上述产生的旋转磁场的旋转速度称为同步转速  $n_1$ ，同步转速与电源频率  $f_1$  和磁极对数  $p$  的关系可以用数学表达式表示为：

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (4-7)$$

式中： $n_1$  为旋转磁场的同步转速 (r/min)； $p$  为磁极对数； $f_1$  为电源频率 (Hz)。

在我国，工频交流电的频率是 50 Hz。由式 (4-7) 可以计算出：一对磁极时，同步转速  $n_1 = 3000$  r/min；两对磁极时， $n_1 = 1500$  r/min；三对磁极时， $n_1 = 1000$  r/min。

根据以上分析，定子绕组通入三相交流电时，会在气隙中产生旋转磁场，假定磁场旋转的转向为顺时针方向，工作原理如图 4-19 所示。

开始通电时，转子静止，磁场沿顺时针方向转动，相当于转子按逆时针方向运动，转子绕组做切割磁力线运动，产生感应电动势，由于转子绕组是自行闭合 (短路) 的，因此绕组内有感应电流流过，使之在磁场中受到电磁力的作用而产生顺时针方向的电磁力矩。这样，转子在电磁力矩的作用下就顺时针旋转起来了。

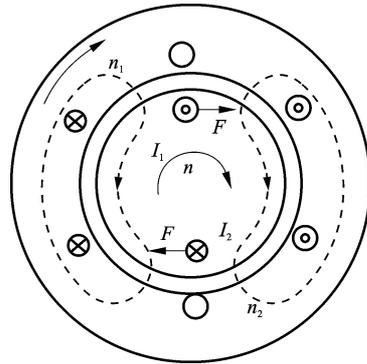


图 4-19 三相异步电动机的工作原理

## 2. 转子的转向和转速

### (1) 转向

由三相异步电动机的工作原理可见，电动机转子的转向与旋转磁场的转向是一致的。由于旋转磁场的转向取决于电源的相序，所以对调三相电源线中的任意两相电源线，电动机就可反转。

### (2) 转速

三相交流异步电动机中，转子的转速一般要小于旋转磁场的转速，这样才能使转子旋转时，随时切割磁力线而受到电磁力的作用。当转子的转速与旋转磁场的转速相同时，转子绕组不切割磁力线，其感应电势、感应电流为零，电磁力矩将无法产生。所以，转子转速必须小于旋转磁场的转速，即小于同步转速。异步电动机即因此而得名。为了说明转子的转速与同步转速间的关系，在异步电动机中引入了转差率的概念。旋转磁场的同步转速  $n_1$  与转子转速  $n$  之差称为转差，用  $\Delta n$  表示。转差与同步转速的比值称为转差率，即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4-8)$$

转差率是异步电动机的一个重要参数。异步电动机转子转速  $n$  的最小值是 0，最大值为同步转速  $n_1$ 。 $n=0$  时， $s=1$ ； $n=n_1$  时， $s=0$ 。可见，转差率  $s$  的取值为 0~1。转差率的大小对异步电动机的其他参数有着直接影响。一般三相异步电动机在空载时， $s$  在 0.005 以下；在额定工作状态时， $s$  为 0.02~0.06。

## 4.6.3 三相异步电动机的特性

### 1. 电磁转矩

电磁转矩是决定三相异步电动机输出机械功率大小的重要参数，也是电动机的一项重要性能指标。

由三相异步电动机的工作原理可知，驱动电动机旋转的电磁转矩是由转子电流  $I_2$  与旋转

磁场相互作用而产生的。因此，电磁转矩的大小与旋转磁场的磁通中、转子电流  $I_2$  及转子的功率因数  $\cos\phi_2$  有关，即

$$T = K_T \phi I_2 \cos\phi_2 \quad (4-9)$$

式中： $T$  为电磁转矩(N·m)； $K_T$  为电动机的电磁转矩系数； $\phi$  为旋转磁场的磁通(Wb)； $I_2$  为转子电流(A)； $\cos\phi_2$  为转子的功率因数。

## 2. 三相异步电动机的机械特性

当电源电压  $U_1$  和转子电路参数为定值时，转速  $n$  和电磁转矩  $T$  满足关系  $n=f(T)$ ，这称为三相异步电动机的机械特性。三相异步电动机的机械特性曲线如图 4-20 所示。

### (1) 三个重要转矩

1) 额定转矩。三相异步电动机稳态运行时，转速保持不变。这时，在忽略电动机本身的机械损耗转矩(如轴承摩擦等)的情况下，可以认为电磁转矩  $T$  与轴上的输出转矩即机械负载转矩  $T_2$  相等，经推导有：

$$T \approx T_2 = 9550 \frac{P_2}{n} \quad (4-10)$$

式中： $P_2$  为电动机轴上输出的机械功率(kW)； $n$  为电动机转速(r/min)。

额定转矩  $T_N$  是电动机在带动轴上的额定机械负载时产生的转矩。这时电动机处于额定状态，其输出功率、转速和转差率分别为额定值  $P_N$ 、 $n_N$  和  $s$ 。根据式(4-9)，额定转矩  $T_N$  为：

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (4-11)$$

2) 最大转矩  $T_m$ 。 $T_m$  是三相异步电动机所能产生的最大电磁转矩。由理论分析可知， $T_m$  与电源电压  $U_1$  的平方成正比。不同  $U_1$  时的机械特性曲线如图 4-21 所示。由图可见，对于同一负载转矩  $T_2$ ，当电源电压  $U_1$  下降时，电动机转速也随之下降。如果电源电压  $U_1$  继续下降，使负载转矩  $T_2$  超过电动机的最大转矩  $T_m$ ，电动机将停止转动，转速  $n=0$ 。这时电动机的电流会马上升高到额定电流的若干倍，电动机将因过热而烧毁，这种现象称为“闷车”或“堵转”。

为了保证电动机在电源电压发生波动时仍能可靠地运行，一般规定最大转矩  $T_m$  应为额定转矩  $T_N$  的数倍，用  $\lambda_m$  表示，称为过载系数，即

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} \quad (4-12)$$

过载系数  $\lambda_m$  表示了电动机允许的短时过载运行能力，是异步电动机的一个重要指标。 $\lambda_m$  越大，则电动机适应电源电压波动的能力和短时过载的能力就越强。一般三相异步电动机

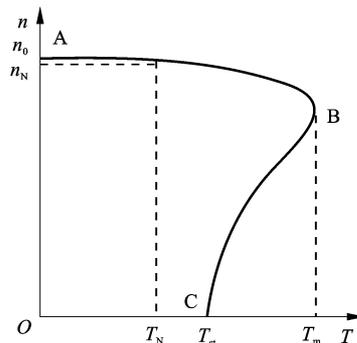


图 4-20 三相异步电动机的机械特性曲线

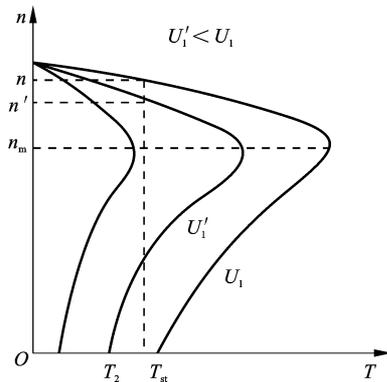


图 4-21 电源电压对电磁转矩的影响

机的过载系数  $\lambda_m$  为 1.8~2.5。

3) 启动转矩  $T_{st}$ 。电动机启动瞬间  $n=0, s=1$ , 所对应的电磁转矩  $T_{st}$  称为启动转矩。 $T_{st}$  与电源电压  $U_1$  的平方以及转子电阻  $R_2$  成正比。

只有在  $T_{st}$  大于负载转矩  $T_2$  时, 电动机才能启动。 $T_{st}$  越大, 电动机带负载启动的能力就越强, 启动时间也越短。 $T_{st}$  与  $T_N$  的比值称为启动系数, 用  $\lambda_s$  表示, 即

$$\lambda_s = \frac{T_{st}}{T_N} \quad (4-13)$$

一般笼型转子异步电动机的  $\lambda_s$  为 0.8~2。

#### (2) 电动机的稳定运行

由以上分析可知, 只要启动转矩  $T_{st}$  大于负载转矩  $T_2$ , 电动机就能启动旋转。由图 4-20 所示的机械特性曲线可见, 电动机启动后, 其转速由零开始沿曲线  $CB$  段加速上升, 电磁转矩  $T$  随着转速的升高而不断增大, 使得加速度也不断增大。经过  $B$  点后, 电磁转矩  $T$  随着转速的升高而减小, 加速度也逐渐减小。当  $T=T_2$  时, 电动机就在曲线  $AB$  部分以某一稳定转速稳定运行。

由机械特性曲线可见, 若负载转矩增大, 则电动机转速下降, 电磁转矩上升; 当电磁转矩与负载转矩重新达到平衡时, 电动机以一低转速稳定运行。反之, 若负载转矩减小, 则电动机转速上升, 电磁转矩减小; 当电磁转矩与负载转矩相等时, 电动机就以一较高转速稳定运行。因此, 在机械特性曲线的  $AB$  区域内, 当负载转矩变化时, 电动机能自动调节电磁转矩, 使之适应负载转矩的变化, 保持稳定运行,  $AB$  段称为稳定运行区。若负载转矩增大到超过了最大电磁转矩, 电动机将越过  $B$  点而沿  $BC$  段运行。在  $BC$  段, 电磁转矩随着转速的下降而减小, 最终使电动机停转。所以,  $BC$  段称为不稳定运行区。

三相异步电动机的机械特性曲线  $AB$  部分可近似认为是一条略向下倾斜的直线, 随着负载的变化, 电动机转速变化很少, 这种机械特性称为硬特性。反之, 若随着负载的变化, 电动机转速变化很大, 则这种机械特性称为软特性。

### 4.6.4 异步电动机的铭牌及技术参数

#### 1. 铭牌

每台异步电动机的机座上都钉有一块铭牌, 上面标出了该电动机的主要技术数据。只有了解铭牌上数据的意义, 才能正确选择、使用和维修电动机。一台三相异步电动机的铭牌见表 4-7。

表 4-7 三相异步电动机的铭牌

型号	Y180L-8	功率	11 kW	电压	380 V
电流	25.1 A	频率	50 Hz	转速	746 r/min
接法	$\Delta$	工作方式	连续	绝缘等级	B
防护形式	IP44(封闭式)			产品编号	
	×××电机厂			×年×月	

三相异步电动机的型号表明了电动机的类型、用途和技术特征。如 Y 系列的三相异步电

动机 Y355M2-4, 其型号组成中各符号表示的意义如下。

Y, 产品代号, 表示异步电动机。

355M2-4, 规格代号, 表示中心高 355 mm, 中号机座铁芯长度为 2 号, 磁极数为 4 极。

## 2. 技术参数

(1) 额定电压: 指在额定运行状态下运行时, 规定加在电动机定子绕组上的线电压值, 单位为 V 或 kV。

(2) 额定电流: 指在额定运行状态下运行时, 流入电动机定子绕组中的线电流值, 如果铭牌上标有两个电流值, 则表示定子绕组在两种不同接法时的线电流, 其单位为 A 或 kA。

(3) 额定功率: 指电动机在额定状态下运行时, 转子轴上输出的机械功率, 单位为 W 或 kW。

(4) 额定频率: 指在额定状态下运行时, 电机定子侧电压的频率, 单位为 Hz。我国电网的额定频率为 50 Hz。

(5) 额定转速: 指额定运行时电动机的转速, 单位为 r/min。

(6) 接线: 指电动机定子三相绕组的接法。电动机定子三相绕组有星形连接和三角形连接两种接线方式。具体采用哪种接线方式, 取决于各相绕组能承受的电压设计值。一般 3 kW 以下的电动机, 定子三相绕组为星形连接; 4 kW 以上的电动机, 则为三角形连接。

(7) 绝缘等级与温升: 绝缘等级表示电动机所用绝缘材料的耐热等级; 温升表示电动机发热时允许升高的温度。

## 4.6.5 异步电动机的启动、调速及制动

### 1. 启动

(1) 启动电流。

在三相异步电动机定子绕组刚接通电源的瞬间, 转子转速  $n=0$ , 旋转磁场以同步转速  $n_1$  的转速旋转, 转子导体与旋转磁场之间的相对切割速度最大, 转子绕组中将产生很大的感应电动势和电流, 使定子绕组中的电流也相应地迅速增大, 因此, 启动时转子绕组和定子绕组都将出现很大的电流, 定子的启动电流  $I_{st}$  通常是额定电流  $I_N$  的 5~7 倍, 即  $I_{st}=(5\sim 7)I_N$ 。虽然电动机的启动电流很大, 但由于电机的启动时间很短(2~15 s 左右), 随着转速的上升, 电流很快就会下降, 因此不会引起电动机过热, 对电动机本身也没有什么影响。

但若异步电动机频繁启动, 则热积累的结果, 会引起电动机过热而影响使用寿命。同时, 很大的启动电流会使电网电压降低, 影响其他用电设备的正常运行。因此, 对容量较大的电动机应采取适当的启动方法来减小启动电流。

(2) 异步电动机的启动方法。

常用的异步电动机的启动方法有以下几种:

1) 直接启动。直接启动是直接给电动机加上额定电压进行启动, 又称为全压启动。

在电动机的容量较小, 相应的启动电流也不大, 对电网电压影响较小, 启动时对其他用电设备的工作影响不大的情况下, 允许电动机直接启动。

2) 降压启动。对于容量较大或频繁启动的电动机, 为了减小启动电流, 一般采用降压启动。其方法是在启动时, 先降低加在定子绕组上的电压, 以减小启动电流, 启动结束后, 再加上额定电压运行。由于电磁转矩与电压的平方成正比, 降压启动将使启动转矩显著减小,

因此只适用于空载或轻载启动。常用的降压启动方法有以下两种。

①星形-三角形(Y- $\Delta$ )启动。正常工作时,定子绕组是三角形连接的电动机,可以采用这种方法降压启动。即在启动时,将定子绕组连接成星形,待转速上升到接近额定转速时,再换成三角形连接。

目前,由于4 kW以上的三相笼型异步电动机都采用三角形连接,因此这种降压启动方法得到了广泛应用。

②自耦变压器降压启动。电源电压接在三相自耦变压器的原边绕组上,电动机定子绕组接在副边绕组(部分绕组)上,这样电动机便在较低的电压下启动。待转速上升到接近额定转速时,自耦变压器脱离电源和电动机,电动机定子绕组直接与电源连接,全压运行。

(3)绕线式异步电动机启动。

采用转子串联电阻启动法启动时,先把电阻器调到最大,然后接通电源开关,电动机就开始转动起来。由于转子电路串有较大电阻,因此限制了转子电路的电流,从而使定子绕组的启动电流也较小。随着转速不断增大,逐步减小电阻器的电阻,直到启动结束,外接电阻全部切除完毕,转子绕组则被短接起来。

这种启动方法不仅可以减小启动电流,还能增大启动转矩,具有良好的启动特性,常用于卷扬机、起重机等要求启动转矩较大的机械设备中。

## 2. 调速

为适应生产的需要,改变电动机的转速以满足生产机械要求的过程,称为电动机的调速。根据异步电动机的转差率公式,异步电动机的转速  $n$  为:

$$n = (1-s) \frac{60f_1}{p} \quad (4-14)$$

由式(4-14)可见,转速的调整可通过改变电源频率  $f_1$ 、定子绕组的磁极对数  $p$  或转差率  $s$  来实现,即变频调速、变极调速和改变转差率调速。其中变频调速的调速性能良好,具有较大的调速范围,调速平滑,机械特性较硬,是近代交流调速发展的主要方向之一。

## 3. 制动

正在运行的电动机,断开电源后,由于转子本身惯性的作用,不会立即停止转动,还要经过一段时间才能停转。为了提高生产效率以及从安全角度考虑,有的机械要求电动机能准确及时地停转。为此,就必须对电动机进行制动控制。三相异步电动机的制动可分为机械制动和电气制动两大类。机械制动是利用机械装置使电动机在电源切断之后迅速停止转动的方法;电气制动是电动机在停转过程中,产生一个和电动机实际旋转方向相反的电磁力矩,作为制动力矩,从而使电动机停止转动的方法。电气制动方法很多,如反接制动、能耗制动、电容制动和回馈制动等。

## 小结

常用的低压电器设备有低压断路器、接触器、热继电器、变压器、电动机和低压配电装置等。低压断路器主要用于保护低压交直流电路的线路及电气设备，避免过电流、短路和欠电压等不正常情况的损害。接触器可快速切断交流与直流主回路，并可频繁地接通与关断大电流控制电路的装置，所以经常运用于电动机作为控制对象。热继电器主要用来对异步电动机进行过载保护。

变压器是一种能量传递装置，除用于改变电压外，还可用于改变电流、变换阻抗及产生脉冲。

三相异步电动机由定子和转子两个基本组成部分构成，其旋转磁场由三相对称定子电流产生。

## 技能训练

### 实训 1：拆装电器设备

(1) 实训目的。

①在掌握低压电器设备工作原理的基础上，熟悉低压电器设备的结构组成和电器设备选用的参数。

②明确电气安全操作规程，具有良好的团队合作精神。

(2) 实训准备。

各类型电器设备、螺丝刀。

(3) 实训内容。

①拆装电器设备。

②写出所拆装电器设备的结构组成、作用及特性。

(4) 提交成果。

①所拆装电器设备的结构组成、作用及特性。

②所查阅的产品样本摘录。

### 实训 2：低压配电箱的施工安装

(1) 实训目的。

①熟悉低压配电箱线路中常用电器元件的结构。

②掌握低压配电箱线路中常用电器元件的基本原理与作用。

(2) 实训准备。

低压配电箱体、各类型电器设备、螺丝刀、螺钉旋具、尖嘴钳、剥线钳、斜口钳、压线钳、万用表、兆欧表等。

(3) 实训步骤。

①识读低压配电箱接线系统图，并画出安装接线图。

②根据系统图中的元器件，将电器元件的规格型号、数量等列在如下表格中(表4-8)。

表4-8

序号	名称	型号规格	数量	备注
1				
2				

③固定安装器件。

④根据电路图进行各元器件的接线。

(4)注意事项。

①元器件安装位置应正确，符合工艺要求。

②配电箱内的接线应规则、整齐，接线端子螺丝必须紧固。

③各回路进出线长度合适，中间不得有接头。

④配电箱的金属外壳和安装底板必须做可靠接地。

⑤各出线端应标明线路去向。

⑥安装结束，必须将配电箱内的杂物清理干净。

## 思考与练习题

### 一、选择题

(1)接触器主要用于( )。

- A. 过负荷保护  
B. 控制照明电路  
C. 频繁控制负荷  
D. 代替刀开关

(2)热继电器在电动机运转时起( )保护作用。

- A. 短路  
B. 过载  
C. 欠压、失压  
D. 过电压

(3)断路器之所以能灭弧，主要是因为它具有( )。

- A. 灭弧室  
B. 绝缘油  
C. 快速机构  
D. 并联电容器

(4)负载增大时，变压器的一次绕组电流将( )。

- A. 增大  
B. 不变  
C. 减小  
D. 无法判断

(5)变压器一次、二次绕组中不能改变的物理量是( )。

- A. 电压  
B. 电流  
C. 阻抗  
D. 频率

(6)相异步电动机的同步转速决定于( )。

- A. 电源频率  
B. 磁极对数  
C. 电源频率和磁极对数  
D. 电源电压

(7)自动空气开关的热脱扣器主要用作( )。

A. 过载保护      B. 断路保护      C. 短路保护      D. 失压保护。

(8) 交流接触器线圈电压过低将导致( )。

A. 线圈电流显著增大      B. 线圈电流显著减小  
C. 铁心涡流显著增大      D. 铁心涡流显著减小

## 二、简答题

(1) 如何区分接触器的主触点、辅助常开与常闭触点、线圈?

(2) 热继电器原理是什么? 在电路中起什么作用?

(3) 观察家里或宿舍的配电箱、电度表箱, 里面有哪些电气元件? 作用是什么?

(4) 了解一下你家里或宿舍的 220 V 交流电是附近哪个变压器变压后配电来的?

(5) 简述变压器的变压及变流原理。

(6) 简述三相异步电动机的工作原理。

(7) 某电力设备电动机为 J02-42-4 型, 额定功率为 15 kW, 电压为 380 V, 电流为 28.5 A, 起动电流为额定电流的 7 倍, 需有短路和过载保护, 应选用何种型号和规格的断路器?

(8) 已知 Y180L-6 型异步电动机的额定功率  $P_N = 15 \text{ kW}$ , 额定转速  $n = 970 \text{ r/min}$ , 试求这台电动机的额定转矩  $T_N$ 。

(9) 写出异步电动机的转速  $n$  的公式。它和哪些因素有关?

## 项目5 控制电路

### 项目描述

本项目主要讲授了最基本的三相异步电动机的点动和连续控制电路，以及三相异步电动机的正反转控制电路，要求能看懂简单的原理图，并能正确安装与调试。

### 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1)掌握三相异步电动机的点动控制电路； (2)掌握三相异步电动机的连续控制电路； (3)掌握三相异步电动机的正反转控制电路； (4)理解建筑施工设备、水暖电设备的电气控制电路	(1)具有三相异步电动机的点动和连续控制电路安装和调试能力； (2)具有三相异步电动机的正反转控制电路安装和调试能力； (3)能够安装和调试简单的建筑施工设备、水暖电设备的电气控制电路	(1)具有安全用电观念，做到安全操作； (2)具有绿色环保意识，在保证安全的前提下，力求节约原材料； (3)讲究安装工艺质量，具有严谨细致、专注负责、精益求精的工匠精神和团队合作精神； (4)思政元素：匠技、环保、合作

### 案例引入

建筑工地上的混凝土搅拌机、升降机、塔吊等的控制柜，建筑水暖电设备如水泵控制柜里面安装了断路器、接触器、热继电器、按钮等低压电气设备，这些元件按一定的电气连接形成具有不同功能的控制电路，你能分析这些电路的工作原理，并正确安装调试吗？

## 任务1 电动机的基本控制电路

### 5.1.1 三相异步电动机启停控制

#### 1. 电动机点动控制

点动控制是指按下按钮，电动机就得电运转；松开按钮，电动机就失电停转。电气设备工作时常常需要进行点动调整，如车刀与工件位置的调整，就需要用点动控制电路来完成。点动正转控制线路是由按钮、接触器来控制电动机运转的最简单的正转控制线路，电气控制原理图如图5-1所示。

如图5-1所示，点动控制线路中，闸刀开关QS作电源隔离开关；熔断器FU<sub>1</sub>、FU<sub>2</sub>分别作主电路、控制电路的短路保护。由于电动机只有点动控制，运行时间较短，主电路不需要接热继电器，启动按钮SB控制接触器KM线圈得电、失电，接触器KM的主触点控制电动机

M 的启动与停止。

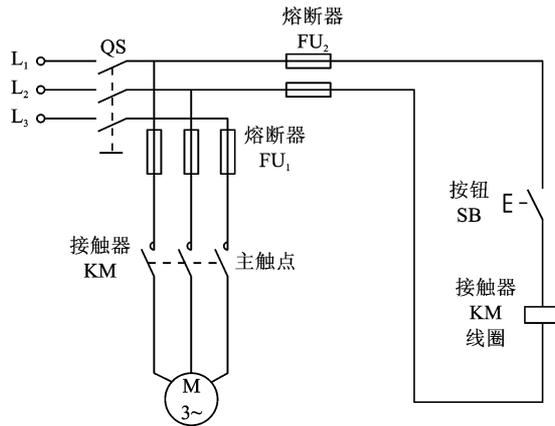


图 5-1 点动控制电气原理图

电路工作原理：先合上电源开关 QS，再按下面的提示完成。

启动：按下启动按钮 SB→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点闭合→电动机 M 启动运行。

停止：松开按钮 SB→接触器 KM 线圈失电→KM 主触点断开→电动机 M 失电停转。

值得注意的是，停止使用时，应断开电源开关 QS。

## 2. 电动机连续控制

在要求电动机启动后能连续运转时，采用点动正转控制线路显然是不行的。为实现连续运转，可采用如图 5-2 所示的接触器自锁控制线路。它与点动控制线路相比较，主电路由于电机连续运行，因此要添加热继电器进行过载保护，而在控制电路中又多串联了一个停止按钮 SB<sub>1</sub>，并在启动按钮 SB<sub>2</sub> 的两端并连了接触器 KM 的一对常开辅助触点。



自锁控制工作原理

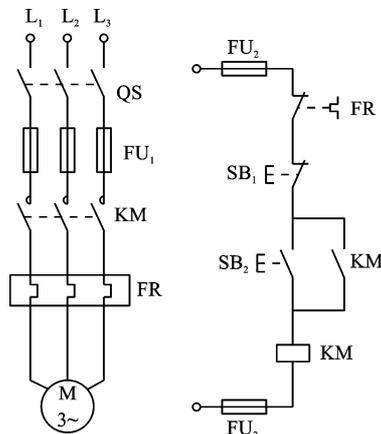


图 5-2 接触器控制的电动机单向连续控制

电路工作原理：先合上电源开关 QS，再按下面的顺序完成(见图 5-3)。

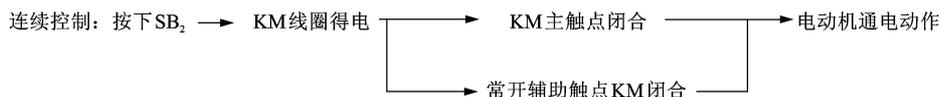


图 5-3 电动机连续工作启动顺序图

当松开  $SB_2$  时，由于 KM 的常开辅助触点闭合，控制电路仍然保持接通，所以 KM 线圈继续得电，电动机 M 实现连续运转。这种利用接触器 KM 本身常开辅助触点而使线圈保持得电的控制方式叫作自锁。与启动按钮  $SB_2$  并联起自锁作用的常开辅助触点称为自锁触点。停止操作顺序如图 5-4 所示。

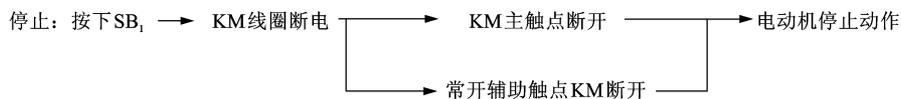


图 5-4 电动机连续工作停止顺序图

当松开  $SB_1$  时，其常闭触点恢复闭合，因接触器 KM 的自锁触点在切断控制电路时已断开，解除了自锁，此时  $SB_2$  也是断开的，所以接触器 KM 不能得电，电动机 M 也不会动作。

(1) 短路保护。主电路和控制电路分别由熔断器  $FU_1$  和  $FU_2$  实现短路保护。当控制回路和主回路出现短路故障时，能迅速有效地断开电源，实现对电器和电动机的保护。

(2) 过载保护。由热继电器 FR 实现对电动机的过载保护。当电动机出现过载且超过规定时间时，热继电器双金属片过热变形，推动导板，经过传动机构，使动断辅助触点断开，从而使接触器线圈失电，电机停转，实现过载保护。

(3) 欠压保护。当电源电压由于某种原因而下降时，电动机的转矩将显著下降，使电动机无法正常运转，甚至引起电动机堵转而烧毁。采用具有自锁的控制线路可避免出现这种事故。因为当电源电压低于接触器线圈额定电压的 75% 左右时，接触器就会释放，自锁触点断开，同时动合主触点也断开，使电动机断电，起到保护作用。

(4) 失压保护。电动机正常运转时，电源可能停电，当恢复供电时，如果电动机自行启动，很容易造成设备和人身事故。采用带自锁的控制线路后，断电时由于自锁触点已经打开，因此恢复供电时电动机不能自行启动，从而避免了事故的发生。

欠压和失压保护作用是按钮、接触器控制连续运行的控制线路的一个重要特点。

### 3. 三相异步电动机点动、连续控制

要求电动机既能连续运转又能点动控制时，需要两个控制按钮，如图 5-5 所示。当连续运转时，要采用接触器自锁控制线路。当实现点动控制时，又需要把自锁电路解除，要采用复合按钮，它工作时常开和常闭触点是联动的，当按钮被按下时，常闭触点先动作，常开触点随后动作；而松开按钮时，常开触点先动作，常闭触点再动作。

电路工作原理：先合上电源开关 QS，再按下面的顺序完成(见图 5-6、图 5-7)。

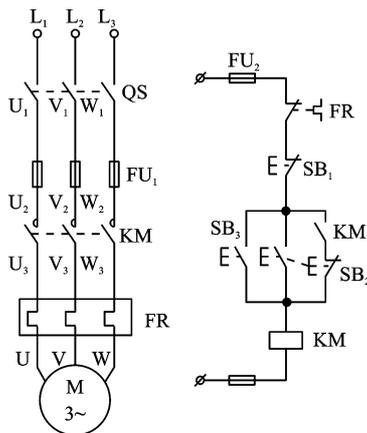


图 5-5 三相异步电动机点动、连续控制线路

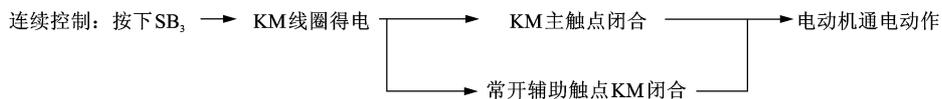


图 5-6 连续控制启动顺序图

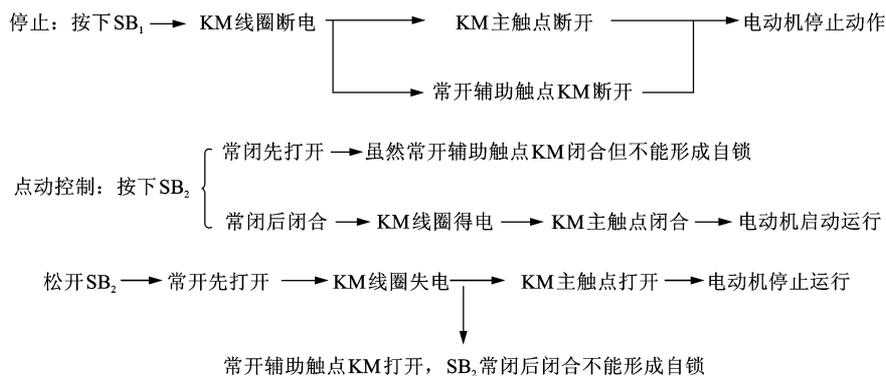


图 5-7 点动和连续控制停止顺序图

## 5.1.2 三相异步电动机正反转控制

### 1. 不带联锁的三相异步电动机的正反转

三相异步电动机的正反转运行需要通过改变通入电动机定子绕组的三相电源相序来实现,即把三相电源中的任意两相对调接线时,电动机就可以反转,如图 5-8 所示。

在图 5-8 中,  $KM_1$  为正转接触器,  $KM_2$  为反转接触器,它们分别由  $SB_2$  和  $SB_3$  控制。从主电路中可以看出,这两个接触器的主触点所接通电源的相序不同,  $KM_1$  按 U-V-W 相序接线,  $KM_2$  则按 W-V-U 相序接线。相应的控制线路有两条,分别控制两个接触器的线圈。

电路工作过程:先合上电源开关 QS,再按下面的提示完成。

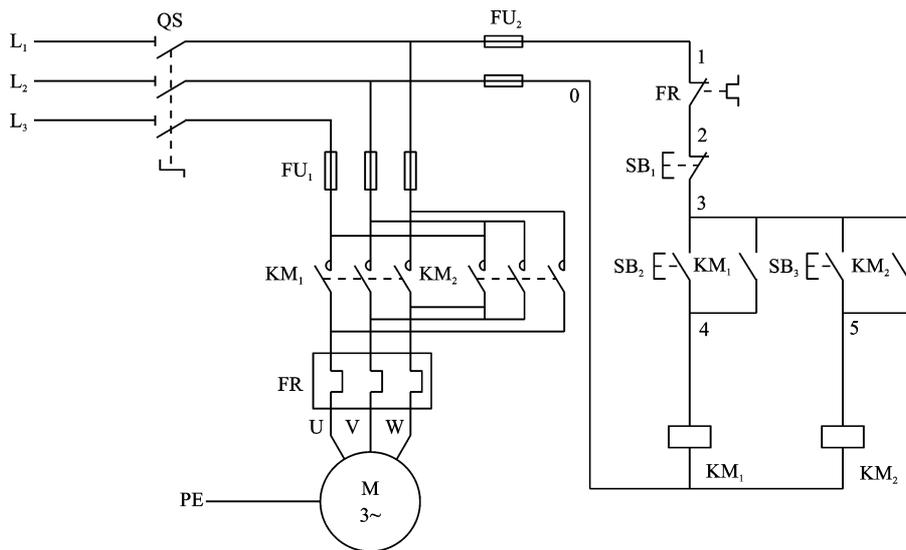


图 5-8 三相异步电动机的正反转电气原理图

(1) 正转控制(见图 5-9)。

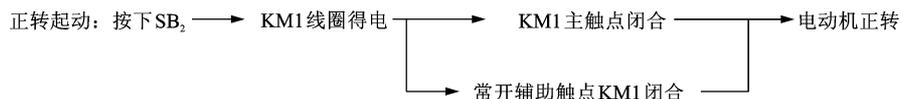


图 5-9 正转控制顺序图

(2) 反转控制(见图 5-10)。

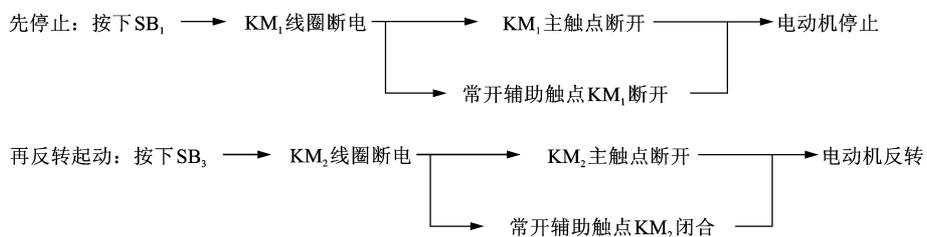


图 5-10 反转控制顺序图

接触器控制正反转电路操作不便，必须保证在切换电动机运行方向之前先按下停止按钮，然后按下相应的启动按钮，否则将会发生主电源侧电源短路的故障。为克服这一不足，提高电路的安全性，需采用联锁控制。

## 2. 具有联锁控制的电动机正反转电路

联锁控制就是在同一时间里两个接触器只允许一个工作的控制方式，也称为互锁控制。实现联锁控制的常用方法有接触器联锁、按钮联锁和复合联锁控制等。如图 5-11 所示，即

为具有正反联锁控制的电动机正反转控制电路原理图，主电路同图 5-8。由图可见，联锁控制的特点是将本身控制支路元件的常闭触点串联到对方控制电路的支路中。

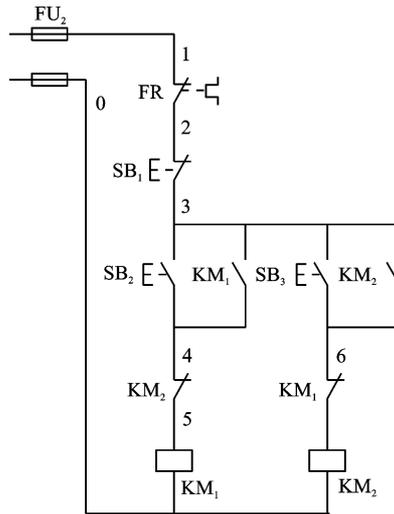


图 5-11 具有联锁正反转电气原理图

电路的工作原理：首先合上开关 QS，再按下面的提示完成。

(1) 正转控制(见图 5-12)。



图 5-12 正转启停控制顺序图

(2) 反转控制(见图 5-13)。

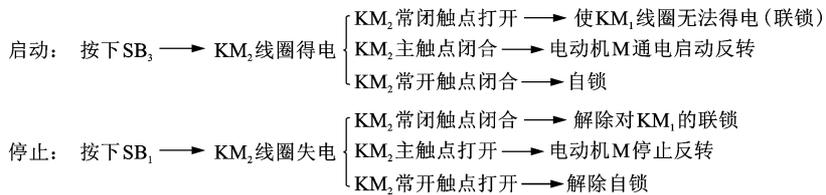


图 5-13 反转启停控制顺序图

由此可见，通过 SB<sub>2</sub>、SB<sub>3</sub> 控制 KM<sub>1</sub>、KM<sub>2</sub> 动作，改变接入电动机的交流电的三相顺序，就能改变电动机的旋转方向。

## 任务2 建筑设备控制电路案例

建筑电气控制的应用包括建筑施工设备,如混凝土搅拌机、振动器、散装水泥装置、电动葫芦、施工升降机、塔式起重机的控制等,还包括建筑水电设备如给水泵、排水泵、消防泵、防排烟风机、空调系统、锅炉房设备的控制等。

本任务仅对混凝土搅拌机和高位水箱给水方式的电气控制电路进行简单分析。

### 5.2.1 混凝土搅拌机

混凝土搅拌机是把水泥、砂石骨料和水混合并拌制成混凝土混合料的机械。混凝土搅拌机主要由以下部分组成。

- (1) 上料系统。上料系统的作用是将水泥、砂、石等物料投入到搅拌筒中。
- (2) 搅拌系统。搅拌系统的作用是将混凝土物料搅拌均匀,并送出搅拌筒。
- (3) 供水系统。
- (4) 电气控制系统。电气系统负责对各部分的运行过程进行控制。
- (5) 底盘。底盘的作用是支撑搅拌机的各部分。

如图5-14所示是混凝土搅拌机电气控制原理图。图中的 $M_1$ 为搅拌电动机,接触器 $KM_1$ 和 $KM_2$ 控制它的正反转; $M_2$ 为上料电动机,接触器 $KM_3$ 和 $KM_4$ 控制它的正反转。这是典型的电动机正反转控制电路的应用案例。

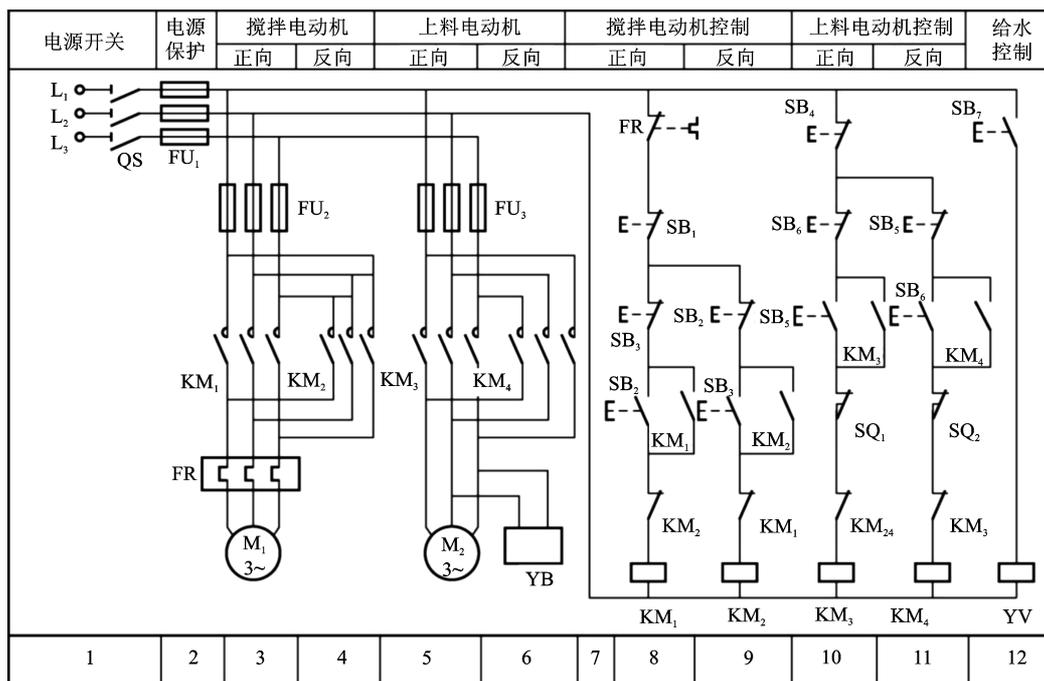


图5-14 混凝土搅拌机电气控制原理图

(1)料斗上升与下降过程。

按下 $SB_5$ ，接触器 $KM_3$ 线圈通电，辅助常开触点闭合，形成自锁；辅助常闭触点断开，形成互锁；主触点 $KM_3$ 闭合，抱闸装置 $YB$ 松闸，电动机 $M_2$ 通电运行，料斗上升。

料斗上升到预定位置撞动限位开关 $SQ_1$ ，控制电路断电，接触器 $KM_3$ 线圈失电，解除自锁与互锁，电动机 $M_2$ 停转， $YB$ 断电抱闸，此时料斗卸料。

按下按钮 $SB_6$ ，接触器 $KM_4$ 线圈通电，辅助常开触点闭合，形成自锁；辅助常闭触点断开，形成互锁； $KM_4$ 主触头闭合， $YB$ 松闸，电动机 $M_2$ 反转，料斗下降。

当料斗下降到预定位置撞动限位开关 $SQ_2$ 时，控制电路断电，电动机停转，料斗下放完成。

(2)反转出料过程。

在电动机正在搅拌的情况下，按下按钮 $SB_3$ ，由于机械联锁，接触器 $KM_1$ 线圈失电，主触点 $KM_1$ 断开，电动机 $M_1$ 不能正转；同时接触器 $KM_2$ 线圈通电， $KM_2$ 主触点闭合，电动机 $M_1$ 反转运行，出料。

(3)给水系统控制过程。

搅拌机给水系统由具有机械自锁功能的按钮 $SB_7$ 控制，给水时按下按钮 $SB_7$ ，电磁阀 $YV$ 通电，给水系统给水；在不需要给水时，再次按下 $SB_7$ ，解除自锁， $YV$ 断电，水阀关闭，停止供水。

## 5.2.2 高位水箱给水方式的电气控制

如图5-15所示为两台泵互为备用时，备用泵手动投入控制的电路图。图中的 $SA_1$ 和 $SA_2$ 是万能转换开关(LW<sub>5</sub>系列)，如是单台泵控制，则只用一个转换开关就可以了。万能转换开关的操作手柄一般是多挡位的，触点数量也较多。其触点的闭合或断开在电路图中是采用展开图来表示的，即操作手柄的位置用虚线表示，虚线上的黑圆点表示操作手柄转到此位置时，该对触点闭合；如无黑圆点，表示该对触点断开。其他多挡位的转换开关也都采用这种展开图表示法。

图5-15中的 $SA_1$ 和 $SA_2$ 操作手柄各有两个位置，触点数量各为4对，实际用了3对。手柄向左扳时，触点①和②、③和④是闭合的，触点⑤和⑥是断开的，为自动控制位置，即由水位控制器发出的触点信号，控制水泵电动机的启动和停止。手柄向右扳(或不动)时，为自动控制位置，反之，为手动控制位置，即手动启动和停止按钮，控制水泵电动机的启动和停止。需要说明的是，大多数设备，都离不开手动控制，目的是在设备检修时用，所以，都要安装手动控制环节。

图5-15可以划分为水位控制开关接线图、水位信号回路图、两台泵的主回路图和两台泵的控制回路图。水泵需要运行时，电源开关 $QS_1$ ， $QS_2$ ， $S$ 均要合上，因为是互为备用，所以转换开关 $SA_1$ 和 $SA_2$ 总有一个放在自动位，另一个放在手动位。设 $SA_1$ 放在自动位(左手位)，触点①和②、③和④为闭合的，触点⑤和⑥为断开的，1<sup>#</sup>泵为常用机组； $SA_2$ 放在手动位(不动)，2<sup>#</sup>泵为备用机组。

工作原理分析：若高位水箱(或水池)水位在低水位时，浮标磁铁下降，对应于 $SL_1$ 处， $SL_1$ 常开触点闭合，水位信号电路的中间继电器 $KA$ 线圈通电，其常开触点闭合，一对用于自锁，一对通过 $SA_{1,1,2}$ 使接触器 $KM_1$ 通电，1<sup>#</sup>泵投入运行，加压送水，当浮标离开 $SL_1$ 时，

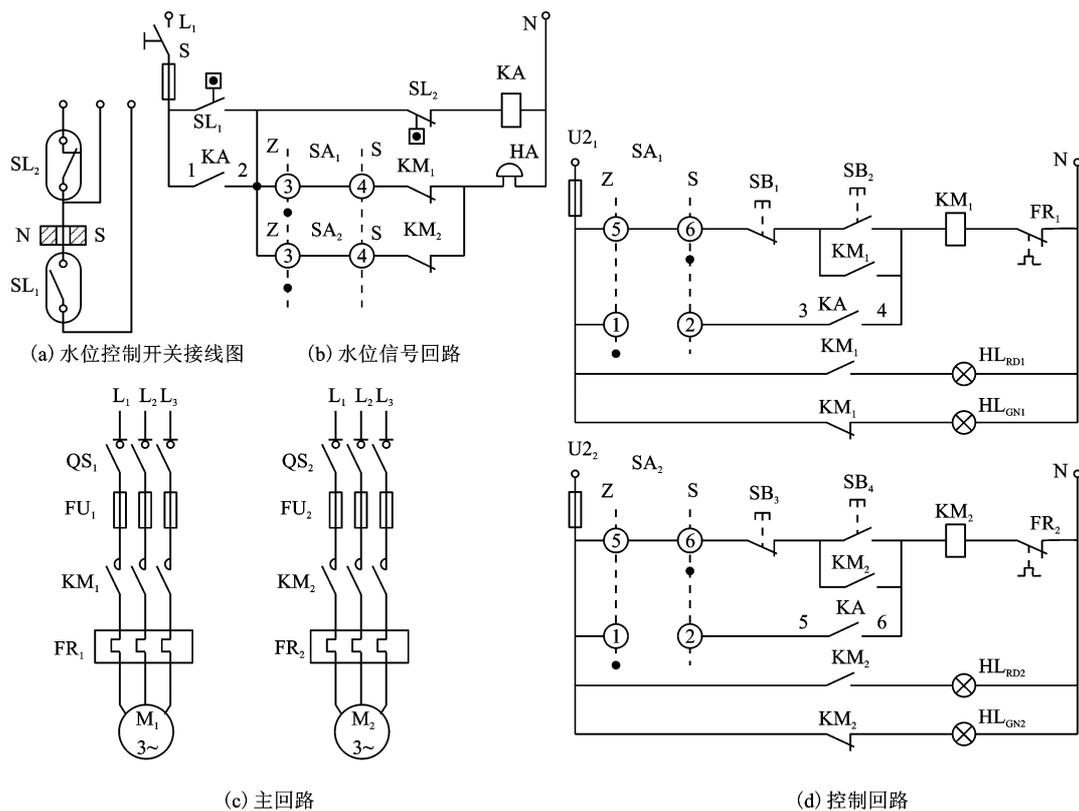


图 5-15 备用泵手动投入控制电路图

SL<sub>1</sub> 断开。当水位到达高水位时，浮标磁铁使 SL<sub>2</sub> 常闭触点断开，继电器 KA 失电，接触器 KM<sub>1</sub> 失电，水泵电动机停止运行。

如果 1<sup>#</sup>泵在投入运行时发生过载或者接触器 KM<sub>1</sub> 接收信号后不动作等故障，KM<sub>1</sub> 的辅助常闭触点恢复，通过 SA<sub>1</sub>3, 4 使警铃 HA 响。值班人员知道后，要将 SA<sub>1</sub> 放在手动位，准备检修；将 SA<sub>2</sub> 放在自动位，接受水位信号控制。警铃 HA 因 SA<sub>1</sub>3, 4 断开而不响。

### 小结

本项目介绍了建筑电气控制中最基本的电路，包括三相异步电动机的点动和连续运行控制电路，以及三相异步电动机的正反转控制电路，要求能看懂原理图，能安装和调试简单的建筑施工设备、水暖电设备的电气控制电路。

## 技能训练

### 1. 实训目的

- (1) 在掌握低压电器设备工作原理的基础上,熟悉低压电器设备,掌握接触器联锁(电气联锁)和按钮联锁(机械联锁)在电气控制电路中的作用。
- (2) 熟悉电气电路的故障分析及排除故障的方法。
- (3) 明确电气实训安全操作规程,接线要规范,具有良好的团队合作精神。

### 2. 实训准备

三相交流电源套;三相笼型异步电动机一台;自动断路器一个;熔断器五套;交流接触器三个;热继电器一个;控制按钮三个;电工工具及导线若干。具体型号可由学生或老师根据实验室情况自主选定。

### 3. 实训内容

- (1) 接线。按如图 5-18 所示接线,先接主电路,再接控制电路。

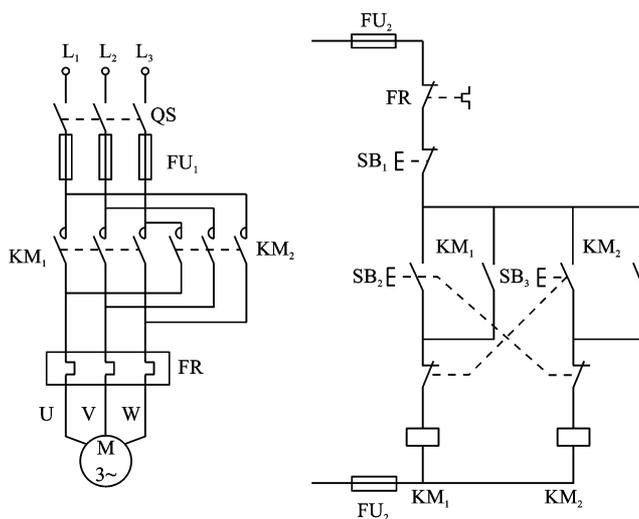


图 5-16 三相异步电动机正反转控制电路

- (2) 接线检查无误后,进行通电试验。
- (3) 合上开关,接通三相交流 220 V 电源。
- (4) 按下  $SB_2$  使电动机启动旋转,观察并记录电动机的转向、自锁和连锁触头的通断状态。
- (5) 按下按钮  $SB_1$ ,观察并记录电动机 M 的运转状态、自锁和连锁触头的通断状态。
- (6) 再按下  $SB_3$ ,观察并记录电动机 M 的转向、自锁和连锁触头的通断状态。
- (7) 重新接通电源,按下  $SB_2$  启动电动机,再按下  $SB_3$ ,观察电动机状态有何变化;或先按  $SB_3$  再按  $SB_2$  观察。
- (8) 实训中出现不正常现象时,应断开电源,分析故障,如一切正常,可请指导教师人为

地制造故障,由学生分析并排除故障,再试验。

#### 4. 提交成果

- (1) 实训报告。
- (2) 对实验中自锁触头和联锁触头的功能的分标。

## 思考与练习题

### 一、选择题

- (1) 三相异步电动机采用 Y- $\Delta$  减压启动时,其启动电流是全压启动电流的( )倍。  
A.  $1/3$                       B.  $1/\sqrt{3}$                       C.  $1/2$                       D.  $1/4$
- (2) 三相异步电动机的连续运转控制线路中连续运转是通过( )实现的。  
A. 持续按钮操作                      B. 热继电器自动控制  
C. 交流接触器常开触点自锁                      D. 交流接触器常开触点互锁

### 二、简答题

- (1) 什么是自锁和互锁(联锁)? 双重连锁的电动机正反转电路与接触器正反转电路相比有什么优势?
- (2) 分析混凝土搅拌机电气控制电路的工作原理。
- (3) 简述高位水箱给水方式的电气控制过程。



模块三

---

变配电工程



## 项目6 建筑供配电系统

### 项目描述

主要讲授变配电所的设置，变电所的形式，变配电所的结构，高压配电装置，低压配电装置；建筑供配电系统的负荷计算；建筑供配电系统的无功功率的补偿。

### 教学目标

知识目标	能力目标	素质目标
(1) 掌握建筑供配电系统； (2) 了解变配电所结构； (3) 掌握高低压配电装置的组成； (4) 了解负荷计算的意义及计算方法	(1) 能选择高压配电装置； (2) 能选择低压配电装置； (3) 能选择变压器； (4) 熟练运用需要系数法计算负荷	(1) 以“规范意识、安全意识、绿色意识”学习建筑供配电系统； (2) 在建筑供配电系统学习中遵循规范标准，精耕细作； (3) 思政元素：安全意识、精耕细作

### 案例引入

建筑供配电系统就是解决建筑物所需电能的供应和分配的系统，是电力系统的组成部分。随着现代化建筑的出现，建筑的供电不再是一台变压器为几幢建筑物供电，而是一幢建筑物用一台乃至十几台变压器供电，供电变压器容量也增加了。另外，在同一幢建筑物中常有一、二、三级负荷同时存在，这就增加了供电系统的复杂性。通常对大型建筑或建筑小区，电源进线电压多采用 10 kV，电能先经过高压配电所，再由高压配电所将电能分送给各终端变电所。经配电变压器将 10 kV 高压降为一般用电设备所需的电压(220/380 V)，然后由低压配电线路将电能分送给各用电设备使用。

## 任务1 变配电所的结构

### 6.1.1 变配电所的设置

变配电所是电力网中的线路连接点，是用来变换电压、交换功率和汇集、分配电能的设施。它主要由高压配电装置、变压器、低压配电装置及测量、控制系统等构成，是电网的重要组成部分和电能传输的重要环节，对保证电网安全、经济运行具有举足轻重的作用。变配电所中用来承担输送和分配电能任务的电路，称为一次电路或电气主接线。高压配电装置如图 6-1 所示，低压配电装置如图 6-2 所示，变压器如图 6-3 所示，变配电所如图 6-4 所示。



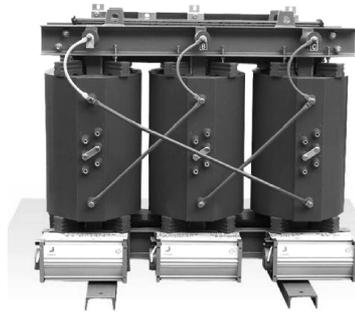
图 6-1 高压配电装置



图 6-2 低压配电装置



(a) 油浸式变压器



(b) 干式变压器

图 6-3 变压器



图 6-4 变配电所

变配电所的位置选择考虑的一般原则：①接近负荷中心，能降低电能消耗；②尽量靠近电源侧，保证电源线的进、出方便；③避开周围不利环境对变配电所的影响；④便于运输和今后的发展。

变电所的形式从变电所整体结构上可分为室内和室外两种。室外形式中有露天变电所和杆上变电所，以及将变压器及所有的电气设备装设在一个封闭式箱内的封闭式变电所（也称箱式变电所），如图 6-5 所示；室内形式按照设置的方式可分为独立式（一个独立的建筑体）和附属式（附设在建筑物内的某个位置）。



图 6-5 箱式变电所

## 6.1.2 变配电所的结构

### 1. 高压配电装置

高压配电装置包括：进线柜、计量柜、PT 柜（电压互感器柜）、出线柜、联络柜（不一定所有的高压配电装置都有）、隔离柜。



配电柜安装

各柜的作用如下。

(1)进线柜。从外部引进电源的开关柜，一般是从供电网络引入 10 kV 的电源并经开关柜送到 10 kV 的母线上。其组成有断路器、隔离开关、电流互感器、避雷器、带电显示、电压互感器、导线等。

(2)计量柜。计量有功功率和无功功率。其组成有电流互感器、VV 接线电压互感器、熔断器、带电显示。

(3)PT 柜。电压互感器柜，一般直接装设到母线上，进行电压测量，提供测量表计的电压或保护装置的信号；提供高压二次回路的电源，操作回路的电源。其组成有电压互感器、隔离开关、熔断器、避雷器。

(4)出线柜。母线分配电能的开关柜，将电源送至变压器。其组成有电流互感器、隔离开关、断路器、带电显示、接地刀闸。

(5)联络柜。联络分段母线。其组成有隔离开关、断路器、电流互感器、带电显示；

(6)隔离柜。用来隔离两端母线或是隔离供电设备与受电设备。给运行人员提供一个可见的端点，以便维护和检修。其组成有断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、带电显示。

## 2. 低压配电装置

低压配电装置有不同类型，不同规格由不同的元件组合。其组成有进线柜、补偿柜、母线出线柜、联络柜。

(1)进线柜。引入从变压器送来的低压电源，并输送到低压配电母线上。其组成有隔离开关、断路器、电流互感器、电流表、电压表。进线柜如图 6-6 所示。



图 6-6 低压进线柜

(2)补偿柜。因为用电设备大多数都是感性用电负荷(如日光灯、变压器、电动机等用电设备)，这些感性负荷使供电电源电压相位发生改变，即电流滞后于电压，因此电压波动大，无功功率增大，浪费大量电能。电容补偿柜可以补偿无功功率，提高电能质量，降低损耗。其组成有电容器、断路器、交流接触器、功率因数表、电容自动投入装置。

电容补偿柜如图 6-7 所示。



图 6-7 低压电容补偿柜

(3) 出线柜。也叫馈电柜或配电柜，是用来分配电能的设备(从母线到各个出线)，一般也安装有断路器、CT、PT、隔离开关等元器件。出线柜如图 6-8 所示。



(a) 抽屉式出线柜



(b) 固定式出线柜

图 6-8 低压出线柜

(4) 母线联络柜。也叫母线分断柜，是用来连接两段母线的设备(从母线到母线)，在单

母线分段、双母线系统中常常要用到母线联络柜，以满足用户选择不同运行方式的要求或保证故障情况下能有选择地切除负荷。其主要设备就是断路器。



线路与配电柜连接

## 任务2 建筑供配电的负荷计算

### 6.2.1 计算负荷的意义

低压供配电系统的设计中，负荷的统计计算是一项重要内容，负荷计算结果对供电容量报装、选择供配电设备及安全经济运行均起决定性的作用。负荷计算的目的是如下。

(1) 计算变配电所内变压器的负荷电流及视在功率，作为选择变压器容量的依据。

(2) 计算流过各主要电气设备（断路器、隔离开关、母线、熔断器等）的负荷电流，作为选择设备的依据。

(3) 计算流过各条线路（电源进线、高低压配电线路等）的负荷电流，作为选择线路电缆或导线截面的依据。

(4) 计算尖峰负荷，用于保护电器的整定计算和校验电动机的启动条件。

### 6.2.2 负荷计算的方法

我国目前普遍采用需要系数法和二项式系数法确定用电设备的负荷，其中：需要系数法是国际上普遍采用的确定计算负荷的方法，最为简便；而二项式系数法在确定设备台数较少且各台设备容量差别大的分支干线计算负荷时使用比较合理。

在建筑配电中，还常用负荷密度法和单位指标法统计计算负荷。在方案设计阶段可采用单位指标法；在初步设计及施工图设计阶段，宜采用需要系数法。

### 6.2.3 负荷计算原则

进行负荷计算时，应按下列原则计算设备功率。

(1) 对于不同工作制的用电设备的额定功率，应换算为统一的设备功率。

(2) 整流器的设备功率是指额定交流输入功率。

(3) 成组用电设备的设备功率，不应包括备用设备。

(4) 当消防用电的计算有功功率大于火灾时可能同时切除一般电力、照明负荷计算有功功率时，应按未切除的一般电力、照明负荷加上消防负荷计算低压总的设备功率，计算负荷。否则，计算低压总负荷时，不应考虑消防负荷。当消防负荷中有与平时兼用的负荷时，该部分负荷也应计入一般电力、照明负荷。

单相负荷应均衡分配到三相上，当单相负荷的总计算容量小于计算范围内三相对称负荷总计算容量的15%时，应全部按三相对称负荷计算；当超过15%时，应将单相负荷换算为等效三相负荷，再与三相负荷相加。

### 6.2.4 用电设备额定容量的确定

#### 1. 用电设备的工作方式

用电设备按其工作方式可分为三种。

- (1) 连续运行工作制(长期工作制)。
- (2) 短时运行工作制(短暂工作制)。
- (3) 断续运行工作制(重复短暂工作制)。

连续运行工作制(长期工作制): 在规定的环境温度下连续运行, 设备任何部分温升均不超过最高允许值, 负荷比较稳定。如通风机水泵、空气压缩机、皮带输送机、破碎机、球磨机、搅拌机、电机车等机械的拖动电动机, 以及电炉、电解设备、照明灯具等, 均属连续运行工作制的用电设备。

短时运行工作制(短暂工作制): 用电设备的运行时间短而停歇时间长, 在工作时间内, 用电设备的温升尚未达到该负荷下的稳定值就停歇冷却, 在停歇时间内其温度又会降低为周围介质的温度, 这是短暂工作的特点。如机床上的某些辅助电动机(如横梁升降、刀架快速移动装置的拖动电动机)及水闸用电动机等均属该类设备。这类设备的数量不多。

断续运行工作制(重复短暂工作制): 用电设备以断续方式反复进行工作, 其工作时间( $t$ )与停歇时间( $t_0$ )相互交替。工作时间内设备温度升高, 停歇时间温度又下降, 若干周期后, 达到一个稳定的波动状态。如电焊机和吊车电动机等均属该类设备。断续周期工作制的设备, 通常用暂载率 $\varepsilon$ 表征其工作特征, 取一个工作周期内的工作时间与工作周期的百分比值, 可表示为 $\varepsilon$ , 即

$$\varepsilon = \frac{t}{T} = \frac{t}{t+t_0} \times 100\%$$

式中:  $t$ ,  $t_0$  分别为工作时间与停歇时间, 两者之和为工作周期  $T$ 。

## 2. 用电设备额定容量的计算

在每台用电设备的铭牌上都有“额定功率” $P_e$ , 但由于各用电设备的额定工作方式不同, 不能简单地将铭牌上规定的额定功率直接相加, 必须先将其换算为同一工作制下的额定功率, 然后才能相加。换算至统一规定的工作制下的“额定功率”称为“设备额定容量”, 用  $P_N$  表示。

- (1) 长期工作制和短时工作制的设备容量:

$$P_N = P_e \quad (6-1)$$

- (2) 重复短暂工作制的设备容量。

① 吊车机组用电动机(包括电葫芦、起重机、行车等)的设备容量统一换算到  $\varepsilon = 25\%$  时的额定功率(kW)。若其铭牌暂载率  $\varepsilon_e$  不等于  $25\%$ , 应进行换算, 公式为:

$$P_N = P_e \times \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{25\%}} = 2P_e \sqrt{\varepsilon_e} \quad (6-2)$$

② 电焊机及电焊变压器的设备容量统一换算到  $\varepsilon = 100\%$  时的额定功率(kW)。若其铭牌暂载率  $\varepsilon_e$  不等于  $100\%$ , 应进行换算, 公式为:

$$P_N = P_e \sqrt{\varepsilon_e} = S_e \cos\varphi \sqrt{\varepsilon_e} \quad (6-3)$$

**【例 6-1】** 电焊机的容量为  $10 \text{ kW}$ ,  $\varepsilon = 45\%$ , 换算到  $\varepsilon = 100\%$  时的额定功率为:

$$P_N = 10 \sqrt{0.45} = 6.7 \text{ kW}$$

- (3) 电炉变压器的设备容量。

电炉变压器的设备容量是指在额定功率因数下的额定功率(kW), 即

$$P_N = P_e = S_e \cdot \cos j \quad (6-4)$$

(4) 照明设备的设备容量。

① 白炽灯、碘钨灯设备容量就等于灯泡上标注的额定功率(kW)。

② 荧光灯还要考虑镇流器中的功率损失(约为灯管功率的20%)，其设备容量应为灯管额定功率的1.2倍(kW)。

③ 高压水银荧光灯亦要考虑镇流器中的功率损失(约为灯泡功率的10%)，其设备容量应为灯泡额定功率的1.1倍(kW)。

④ 金属卤化物灯采用镇流器时亦要考虑镇流器中的功率损失(约为灯泡功率的10%)，其设备容量应为灯泡额定功率的1.1倍(kW)。

(5) 不对称单相负荷的设备容量。

当有多台单相用电设备时，应将它们均匀地分接到三相上，力求减少三相负载不对称情况。设计规程规定，在计算范围内，单相用电设备的总容量如不超过三相用电设备总容量的15%，则可按三相对称分配考虑；如单相用电设备不对称容量大于三相用电设备总容量的15%，则设备容量 $P_e$ 应按三倍最大相负荷的原则进行换算。

设备接于相电压或线电压时，设备容量 $P_e$ 的计算如下。

单相设备接于相电压时：

$$P_e = 3P_{e..m} \quad (6-5)$$

式中： $P_e$ 为等效三相设备容量； $P_{e..m}$ 为最大负荷所接的单相设备容量。

单相设备接于线电压时：

$$P_e = \sqrt{3}P_{e..l} \quad (6-6)$$

式中： $P_{e..l}$ 为接于同一线电压的单相设备容量。

### 6.2.5 负荷计算

负荷计算的方法有负荷密度法、单位指标法、需要系数法、二项式系数法。

实际民用建筑设计工程中负荷计算的实用方法中，常用的有负荷密度法、单位指标法、需要系数法。

(1) 在方案阶段，可采用单位指标法；在初步设计及施工图阶段，宜采用需要系数法；对于住宅，在设计各个阶段均可采用单位指标法。

(2) 用电设备台数较多，各台设备用电容量相差不悬殊时，宜采用需要系数法，一般用于支干线、配电所的负荷计算。

(3) 用电设备台数较少，各台设备容量相差悬殊时，宜采用二项式系数法，一般用于分支干线、配电屏(箱)的负荷计算。

#### 1. 计算负荷的估算

在民用建筑的方案设计阶段，必须对建筑内电力负荷进行估算，估算结果的准确与否，直接关系到建筑的变配电系统总体方案，变压器台数、容量的选择，以及配电设备、开关、导线的选择等，对建筑投资预算的影响很大。目前，我们习惯使用的负荷估算方法为负荷密度法和单位指标法。

(1) 负荷密度法。

所谓的负荷密度法就是根据国家电力政策、建筑物性质、负载性质等多方面的因素，使

用对已竣工工程的数据进行分析统计后确定的单位面积功率(负荷密度)数据(规范指标),对所设计系统的计算负荷进行估算的一种方法。其估算有功功率  $P_c$  的公式为:

$$P_c = \frac{P_0 S}{1000} \quad (6-7)$$

应综合考虑的因素有以下几种。

### ① 建筑物的性质。

建筑物的性质不同,标准不同,用电的单位面积功率也不同(可参见《民用建筑电气设计手册》)。

### ② 空调的形式。

一般来说,民用建筑中的电力负荷可分为空调、动力(主要为电梯、通风设备、水泵等)、照明(包括家用电器、插座等)三大类,它们占总负荷的比例分别为:空调负荷占40%~50%、照明负荷占35%~30%、动力负荷占25%~20%。

### ③ 照明负荷。

照明负荷约占总用电量的30%,设计时应按现行国家规定的标准来推算总负荷,再考虑一个同期系数。

各类建筑物单位面积推荐负荷指标( $W/m^2$ ):

住宅(或公寓)30~50;旅馆40~70;办公40~80;商业(一般为40~80,大中型为70~130);体育40~70;剧场50~80;医院(无中央空调40~60,有中央空调70~90);高等学校教学楼20~40;中小学12~20;展览馆50~80;演播室250~500;汽车库8~15。

以上指标包括了空调负荷,可作为初步设计估算,施工图设计时,若有中央空调,应按空调专业提出的负荷,其他的就只按照明和电器的使用来计算。

## 2. 按需要系数法确定计算负荷

需要系数考虑了以下的主要因素:

$$K_d = \frac{K_{\Sigma} K_L}{\eta_{wl} \eta}$$

式中:  $K_{\Sigma}$  为同时使用系数,为在最大负荷工作班某组工作着的用电设备容量与接于线路中的全部用电设备总额定容量之比;  $K_L$  为负荷系数,用电设备不一定满负荷运行,此系数表示工作着的用电设备实际所需功率与其额定容量之比;  $\eta_{wl}$  为线路供电效率;  $\eta$  为用电设备组在实际运行功率时的平均效率。

按需要系数法确定计算负荷的公式为:

有功功率计算负荷公式为:

$$P_c = K_d P_N \quad (6-8)$$

无功功率计算负荷公式为:

$$Q_c = P_c \tan \phi \quad (6-9)$$

视在功率计算负荷

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (6-10)$$

或

$$S_c = P_c / \cos \phi \quad (6-11)$$

计算电流公式为:



负荷分级与负荷计算

$$I_c = P_c / U_N \cos\phi \quad \text{或} \quad I_c = S_c / \sqrt{3} U_N \quad (6-12)$$

$K_d$  是通过测量统计确定的经验数值,其选择的正确与否对负荷的计算结果影响较大,在选择时还需结合具体情况,如建筑规模、档次、地区、习惯、用户要求等。

负荷计算时由负荷端逐级向电源端进行计算。

(1) 单台用电设备的计算负荷。

① 有功计算负荷。

考虑到单台用电设备总会有满载运行的时候,因此其计算负荷  $P_c$  为:

$$P_c = \frac{P_N}{\eta} \quad (6-13)$$

式中:  $P_N$  为换算到统一暂载率下的电动机的额定容量;  $\eta$  为用电设备在额定负载下的效率。

② 无功计算负荷:

$$Q_c = P_c \tan\phi \quad (6-14)$$

式中:  $\phi$  为用电设备功率因数角。

计算目的: 用于选择分支线导线及其上的开关设备。

(2) 用电设备组的计算负荷。

① 有功计算负荷:

$$P_c = K_d \sum P_N \quad (6-15)$$

式中:  $K_d$  为用电设备组的需要系数(可查有关手册);  $\sum P_N$  为用电设备组的设备额定容量之和,但不包括备用设备容量。

② 无功计算负荷:

$$Q_c = P_c \tan\phi \quad (6-16)$$

③ 视在计算负荷:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (6-17)$$

计算目的: 用于选择各组配电干线及其上的开关设备。

当  $K_d$  值有一定变动范围时,取值要作具体分析。如台数多时,一般取用较小值,台数少时,取用较大值;设备使用率高时,取用较大值,使用率低时,取用较小值。当一条线路内的用电设备的台数较小( $n < 3$  台)时,一般是将用电设备额定容量的总和作为计算负荷,或者采用较大的  $K_d$  值(0.85~1)。

(3) 确定多组用电设备在同一低压母线上的计算负荷

① 总有功计算负荷:

$$P_c = K_\Sigma \sum P_{ci} \quad (6-18)$$

② 总无功计算负荷:

$$Q_c = K_\Sigma \sum Q_{ci} \quad (6-19)$$

③ 总视在计算负荷:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (6-20)$$

$K_\Sigma$  的取值见相关表,一般取 0.8~0.9。

计算目的: 用于选择配电干线及其上的开关设备,或者用于低压母线的选择及变电所电

力变压器容量的选择。

**【例 6-2】** 学院教工住宅楼 2 栋，共 7 层，一层门面共 1000 m<sup>2</sup>，2~7 层为住宅，4 个单元，每单元 2 户，共 48 户。每户面积 125 m<sup>2</sup>，每户用电为 6 kW。由学校变电站采用一路 380 V/220 V 电缆供电。大楼设总配电箱，门面由总配电箱引一个回路，每单元各引一个回路，住宅每户在单元一层设单元总配电箱集中安装户电度表。试计算各段线路的计算负荷和计算电流。

**解：**查表门面用电指标为 60 W/m<sup>2</sup>， $K_d$  为 0.9， $\cos\phi$  取 0.80，则：

$$P_{c1} = K_d P_N = 0.9(60 \times 1000 / 1000) = 54 \text{ (kW)}$$

$$Q_{c1} = P_{c1} \tan\phi = 54 \times 0.76 = 41.04 \text{ (Kvar)}$$

查表住宅每单元  $K_d$  为 0.6， $\cos\phi$  取 0.80， $\tan\phi = 0.76$ 。

每单元用电负荷为：

$$P_{c21} = K_d P_N = 0.6(6 \times 12) = 43.2 \text{ (kW)}$$

查表住宅总用电  $K_\Sigma$  为 0.9，总用电负荷为：

$$P_{c2} = K_\Sigma P_N = 0.9(4 \times 43.2) = 155.5 \text{ (kW)}$$

$$Q_{c2} = P_{c2} \tan\phi = 155.5 \times 0.76 = 118 \text{ (Kvar)}$$

大楼总用电为：

$$P_c = (P_{c1} + P_{c2}) = (54 + 155.5) = 209.5 \text{ (kW)}$$

$$Q_c = (Q_{c1} + Q_{c2}) = (41.04 + 118) = 159.04 \text{ (kW)}$$

$$I_c = P_c / \sqrt{3} U_N \cos\phi = 403.4 \text{ (A)}$$

(4) 确定变电所变压器高压侧的计算负荷

$$P_c = P_c + \Delta PT \quad (6-21)$$

$$Q_c = Q_c + \Delta QT \quad (6-22)$$

式中： $P_c$ 、 $Q_c$ 、 $S_c$  分别为车间变电所中变压器高压侧的有功损耗(kW)、无功损耗(kW)及视在计算负荷(kVA)； $\Delta PT$ 、 $\Delta QT$  分别为变压器的有功损耗(kW)、无功损耗(kvar)。

计算目的：用于选择车间变电所高压配电线及其上的开关设备

在计算负荷时，车间变压器尚未选出，无法根据变压器的有功损耗与无功损耗的理论公式进行计算，因此一般按下列经验公式估算。

对目前使用的低损耗型电力变压器：

$$\Delta PT \approx 0.015 S_{ca.3} \text{ (kW)} \quad (6-23)$$

$$\Delta QT \approx 0.06 S_{ca.3} \text{ (kvar)} \quad (6-24)$$

式中： $S_{ca.3}$  为变压器低压母线上的计算负荷(kVA)。

(5) 确定变电所中高压母线上的计算负荷

$$P_{c\Sigma} = \Sigma P_c \quad (6-25)$$

$$Q_{c\Sigma} = \Sigma Q_c \quad (6-26)$$

式中： $P_{c\Sigma}$ 、 $Q_{c\Sigma}$  分别为变电站高压母线上所有变压器的有功损耗及无功损耗计算负荷之和。

计算目的：全厂总计算负荷的数值可作为向供电部门申请全厂用电的依据，并作为原始资料进行高压供电线路的电气计算，以及高压进线导线及进线开关设备的选择。

【例 6-3】一机修车间的 380 V 线路上，接有金属切削机床电动机 20 台，共 50 kW；另接通风机 3 台，共 5 kW；电葫芦 4 个，共 6 kW ( $FC_N=40\%$ )。试求计算负荷。

解：冷加工电动机组：查表可得  $K_d=0.16\sim 0.2$  (取 0.2)， $\cos\phi=0.5$ ， $\tan\phi=1.73$ 。

$$P_{ca(1)} = K_d \sum P_e = 0.2 \times 50 = 10(\text{kW})$$

$$Q_{ca(1)} = P_{ca(1)} \tan\phi = 10 \times 1.73 = 17.3(\text{kvar})$$

$$S_{ca(1)} = P_{ca(1)} / \cos\phi = 10 / 0.5 = 20(\text{kVA})$$

通风机组：查表可得  $K_d=0.7\sim 0.8$  (取 0.8)， $\cos\phi=0.8$ ， $\tan\phi=0.75$ 。

因此：

$$P_{ca(2)} = K_d \sum P_e = 0.8 \times 5 = 4(\text{kW})$$

$$Q_{ca(2)} = P_{ca(2)} \tan\phi = 4 \times 0.75 = 3(\text{kvar})$$

$$S_{ca(2)} = P_{ca(2)} / \cos\phi = 4 / 0.8 = 5(\text{kVA})$$

电葫芦：由于是单台设备，可取  $K_d=1$ ，查表可得  $\cos\phi=0.5$ ， $\tan\phi=1.73$ ，因此：

$$P_e = P_N \times \sqrt{\frac{\varepsilon_N}{25\%}} = 2P_N \sqrt{\varepsilon_n} = 2 \times 3 \times \sqrt{0.4} = 3.79(\text{kW})$$

$$P_{ca(3)} = P_e = 3.79(\text{kW})$$

$$Q_{ca(3)} = P_{ca(3)} \tan\phi = 3.79 \times 1.73 = 6.56(\text{kvar})$$

$$S_{ca(3)} = P_{ca(3)} / \cos\phi = 3.79 / 0.5 = 7.58(\text{kVA})$$

取同时系数  $K_\Sigma$  为 0.9，因此总计算负荷为：

$$P_{ca(\Sigma)} = K_\Sigma \sum P_{ca} = 0.9 \times 10 + 4 + 3.79 = 16.01(\text{kW})$$

$$Q_{ca(\Sigma)} = K_\Sigma \sum Q_{ca} = 0.9 \times 17.3 + 3 + 6.56 = 24.17(\text{kW})$$

$$S_{ca(\Sigma)} = \sqrt{P_{ca(\Sigma)}^2 + Q_{ca(\Sigma)}^2} = \sqrt{16.01^2 + 24.17^2} = 28.99(\text{kVA})$$

为了使一目了然，便于审核，实际工程设计中常采用计算表格形式，见表 6-1。

表 6-1 计算表格

序号	用电设备组名称	台数	设备容量/kW	$K_d$	$\cos\phi$	$\tan\phi$	计算负荷		
							$P_{ca}$	$Q_{ca}$ / kVar	$S_{ca}$ / kVA
1	机床组	20	50	0.2	0.5	1.73	10	17.3	
2	通风机组	3	5	0.8	0.8	0.75	4	3	
3	电葫芦	1	3.79 ( $\varepsilon=25\%$ )	1	0.5	1.73	3.79	6.56	
负荷总计		24	—	—	—	—	17.79	26.86	—
		取 $K_\Sigma = 0.9$				0.55	—	16.01	24.17

## 任务3 建筑供电系统无功功率的补偿

### 6.3.1 提高功率因数的意义

功率因数是交流电路的重要技术数据之一,有十分重要的意义。功率因数的高低,对于电气设备的利用率和对电能消耗的分析、研究等问题都有十分重要的意义。

所谓功率因数,是指任意二端网络(与外界有两个接点的电路)两端电压  $U$  与其中电流  $I$  之间的相位差的余弦。在二端网络中,消耗的功率是指平均功率,也称为有功功率,它等于电压×电流×电压电流间相位差的余弦。

由此可以看出,电路中消耗的功率  $P$ ,不仅取决于电压  $V$  与电流  $I$  的大小,还与功率因数有关。而功率因数的大小,取决于电路中负载的性质。对于电阻性负载,其电压与电流的位相差为  $0$ ,因此,电路的功率因数最大;而纯电感电路,电压与电流的位相差为  $\pi/2$ ,即电压超前电流;在纯电容电路中,电压与电流的位相差则为  $-\pi/2$ ,即电流超前电压。在后两种电路中,功率因数都为  $0$ 。对于一般性负载的电路,功率因数就介于  $0$  与  $1$  之间。

一般来说,在二端网络中,提高用电器的功率因数有两方面的意义:一是可以减小输电线路上的功率损失;二是可以充分发挥电力设备(如发电机、变压器等)的潜力。因为用电器总是在一定电压  $U$  和一定有功功率  $P$  的条件下工作,由公式  $P=UI\cos\Phi$  可知,功率因数过低,就要用较大的电流来保障用电器的正常工作。与此同时,输电线路上的输电电流增大,从而导致线路上焦耳热损耗增大。另外,在输电线路的电阻上及电源的内阻上的电压降,都与用电器中的电流成正比,增大电流必然增大在输电线路和电源内部的电压损失。因此,提高用电器的功率因数,可以减小输电电流,进而减小输电线路上的功率损失。

### 6.3.2 无功补偿措施

#### 1. 功率因数的计算

##### (1) 瞬时功率因数。

瞬时功率因数由功率因数表或相位表直接读出,或由功率表、电流表和电压表的读数按下式求出:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI} \quad (6-27)$$

式中:  $P$  为功率表测出的三相功率读数(kW);  $U$  为电压表测出的线电压读数(kV);  $I$  为电流表测出的相电流读数(A)。

瞬时功率因数的值代表着某一瞬间状态的无功功率的变化情况。

##### (2) 平均功率因数。

平均功率因数是指某一规定时间内,功率因数的平均值。其计算公式为:

$$\cos\varphi_{wm} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_r}{W_a}\right)^2}} \quad (6-28)$$

式中:  $W_a$  为某一时间内消耗的有功电能(kW·h), 可由有功电度表读出;  $W_r$  为某一时间内消耗的无功电能(kvar·h), 可由无功电度表读出。

我国电业部门每月向工业用户收取电费, 就规定电费要按月平均功率因数来调整。

对于正在进行设计的工业企业则采用下述的计算方法:

$$\cos\varphi_{um} = \frac{P_{av}}{S_{av}} = \frac{\alpha P_{ca}}{\sqrt{(\alpha P_{ca})^2 + (\beta Q_{ca})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta Q_{ca}}{\alpha P_{ca}}\right)^2}} \quad (6-29)$$

式中:  $P_{ca}$  为全企业的有功功率计算负荷(kW);  $Q_{ca}$  为全企业的无功功率计算负荷(kvar);  $\alpha$  为有功负荷系数, 一般为 0.7~0.75;  $\beta$  为无功负荷系数, 一般为 0.76~0.82。

### (3) 最大负荷时的功率因数

最大负荷时的功率因数是指在年最大负荷(即计算负荷)时的功率因数。根据功率因数的定义可以分别写出:

$$\cos\varphi_{ca} = \frac{P_{ca}}{S_{ca}} = \frac{P_{ca}}{\sqrt{P_{ca}^2 + Q_{ca}^2}} \quad (6-30)$$

式中:  $P_{ca}$  为全企业的有功功率计算负荷(kW);  $Q_{ca}$  为全企业的无功功率计算负荷(kvar);  $S_{ca}$  为全企业的视在计算负荷(kVA)。

## 2. 功率因数对供电系统的影响

(1) 系统中输送的总电流增大, 使得供电系统中的电气元件容量增大, 从而使启动控制设备、测量仪表等规格尺寸增大, 因而增大了初投资费用。

(2) 总电流的增大增加了电力网中输电线路上的有功功率损耗和电能损耗。

(3) 线路的电压损失增大, 影响了负荷端的异步电动机及其他用电设备的正常运行。

(4) 使电力系统内的电气设备容量不能充分利用。

综上所述, 电力系统功率因数的高低是一个十分重要的问题, 因此, 必须设法提高电力网中各种有关部分的功率因数。目前供电部门实行按功率因数征收电费, 因此功率因数的高低也是供电系统中的一项重要经济指标。

## 3. 功率因数的改善

(1) 提高自然功率因数。

提高自然功率因数的方法, 即采用降低各用电设备所需的无功功率以改善其功率因数的措施, 主要有以下五种。

①正确选用感应电动机的型号和容量, 使其接近满载运行。

②更换轻负荷感应电动机或者改变轻负荷电动机的接线。

③电力变压器不宜轻载运行。

④合理安排和调整工艺流程, 改善电气设备的运行状况, 限制电焊机、机床电动机等设备的空载运转。

⑤使用无电压运行的电磁开关。

(2) 人工补偿无功功率。

当采用提高用电设备自然功率因数的方法后, 功率因数仍不能达到《全国供用电规则》所要求的数值时, 就需要设置专门的无功补偿电源, 人工补偿无功功率了。

人工补偿无功功率的方法主要有以下三种。

- ①并联电容器补偿(目前民用建筑中主要采用此法)。
- ②同步电动机补偿。
- ③动态无功功率补偿。

用静电电容器(或称移相电容器、电力电容器)作无功补偿以提高功率因数,是目前广泛应用的一种补偿装置。电力电容器的补偿容量可用下式确定:

$$Q_c = \alpha P_c (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad (6-31)$$

式中:  $P_c$  为有功计算负荷(kW);  $\alpha$  为月平均有功负荷系数,一般取 0.7~0.75;  $\tan\phi_1$ 、 $\tan\phi_2$  分别为补偿前、后平均功率因数角的正切值。

补偿容量也可按下式计算:

$$Q_c = \alpha P_c q_c \quad (6-32)$$

式中:  $q_c$  为无功补偿率或者叫比补偿量,单位为 Kvar/Kw(可在设计手册查取)。

在计算补偿用电力电容器容量和个数时,应考虑到实际运行电压可能与额定电压不同,电容器能补偿的实际容量将低于额定容量,此时需对额定容量进行修正:

$$Q_c = Q_N \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 \quad (6-33)$$

式中:  $Q_N$  为电容器铭牌上的额定容量(kvar);  $Q_c$  为电容器在实际运行电压下的容量(kvar);  $U_N$  为电容器的额定电压(kV);  $U$  为电容器的实际运行电压(kV)。

例如将 YY10.5-10-1 型高压电容器用在 6 kV 的工厂变电所中作无功补偿设备,则每个电容器的无功容量由额定值 10 kvar 降低为:

$$Q_c = 10 \times \left( \frac{6}{10.5} \right)^2 = 3.27(\text{kvar})$$

显然,除了在不得已的情况下,这种降压使用的做法应避免。

在确定总补偿容量  $Q_c$  之后,就可根据所选并联电容器单只容量  $Q_{c1}$  决定并联电容器的个数:

$$n = Q_c / Q_{c1} \quad (6-34)$$

由上式计算所得的数值,对三相电容器应取相近偏大的整数;若为单相电容器,则应取 3 的整数倍,以便三相均衡分配。

三相电容器,通常在其内部接成三角形,单相电容器的电压,若与网络额定电压相等则应将电容器接成三角形接线,只有当电容器的电压低于运行电压时,才接成星形接线。

相同的电容器,接成三角形接线,因电容器上所加电压为线电压,所补偿的无功容量则是星形接线的三倍。若是补偿容量相同,采用三角形接线比星形接线可节约电容值的三分之二,因此在实际工作中,电容器组多接成三角形接线。

用户处的静电电容器补偿方式可分为个别补偿、分组(分散)补偿和集中补偿三种。

- ①个别补偿:将电容器直接安装在吸取无功功率的用电设备附近。
- ②分组(分散)补偿:将电容器组分散安装在各车间配电母线上。
- ③集中补偿:指电容器组集中安装在总降压变电所二次侧(6~10 kV 侧)或变电所的一次侧(6~10 kV 侧)或二次侧(380 V 侧)。

**【例 6-4】** 某工厂的计算负荷为 2400 kW,平均功率因数为 0.67。根据规定应将平均功

率因数提高到 0.9(在低压侧固定补偿),如果采用 BWF-0.38-40-1 型并联电容器,需装设多少个?并计算补偿后的实际平均功率因数。(取平均负荷系数  $\alpha=0.75$ )

解:  $\tan\phi_1 = \tan(\arccos 0.67) = 1.108$

$\tan\phi_2 = \tan(\arccos 0.9) = 0.484$

$Q_c = P_{av}(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$

$= 0.75 \times 2400 \times (1.108 - 0.484) = 1123.2(\text{kvar})$

$n = Q_c / Q_{c1} = 1123.2 / 40 \approx 30(\text{个})$ , 每相装设 10 个。

此时的实际补偿容量为  $30 \times 40 = 1200(\text{kvar})$ , 所以补偿后实际平均功率因数为:

$$\begin{aligned}\cos\phi_{av} &= \frac{P_{av}}{S_{av}} = \frac{\alpha P_{ca}}{\sqrt{(\alpha P_{ca})^2 + (\alpha P_{ca} \tan\phi_1 - Q_c)^2}} \\ &= \frac{0.75 \times 2400}{\sqrt{(0.75 \times 2400)^2 + (0.75 \times 2400 \times 1.108 - 1200)^2}} \\ &= 0.91\end{aligned}$$

## 小结

本项目主要讲授建筑变配电所的设置;建筑供配电系统(高压配电装置、低压配电装置、变压器);计算负荷的意义,负荷计算的方法,负荷计算的原则,用电设备额定容量的确定,用需要系数法进行负荷计算;提高功率因数的意义、无功补偿措施、无功因数的计算、电力电容器补偿容量的计算。

## 技能训练

实训 1: 参观供配电实训室,然后画出高压配电系统图和低压配电系统图

实训 2: 电流互感器安装接线、单相有功电度表安装接线、三相电度表安装接线

(1) 实训目的。

①在掌握供配电电气设备工作原理的基础上,熟悉掌握常用配电设备、器件的安装。

②明确电气安全操作规程,具有良好的团队合作精神。

(2) 实训准备。

常用低压配电设备(电流互感器、单相有功电度表、三相有功电度表、断路器等);电工用常用工具。

(3) 实训内容。

①安装电流互感器及接线。

②安装单相电度表及接线。

③安装三相电度表及接线

(4) 检查提交作业。

先自己检查安装质量,然后相互检查,最后老师检查。

## 思考与练习题

- (1) 高压配电装置包括哪些内容?
- (2) 低压配电装置包括哪些内容?
- (3) 进行负荷计算的意义是什么?
- (4) 负荷计算的方法有哪些?
- (5) 提高功率因数的意义是什么?
- (6) 人工补偿无功功率的方法有哪些?