

责任编辑：刘 洵 助理编辑：孟海江
封面设计：唐洵设计

新能源汽车专业系列教材

新能源汽车概论
新能源汽车电气技术
新能源汽车电器与控制技术
新能源汽车构造与检修
新能源汽车驱动电机及控制系统检修
新能源汽车电工电子技术
新能源汽车高压安全与防护
氢能与燃料电池汽车技术
新能源汽车动力电池技术
电动汽车结构原理与检修
智能网联汽车技术概论

新能源汽车专业系列教材

新能源汽车电工电子技术

主编◎向楠 姜继文 韩玉龙

北京交通大学出版社

安徽省高等学校省级质量工程项目立项优质教材
新能源汽车专业系列教材

新能源汽车 电工电子技术

主编◎向楠 姜继文 韩玉龙

ISBN 978-7-5121-5480-3



定价：56.00元



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

安徽省高等学校省级质量工程项目立项优质教材
新能源汽车专业系列教材

新能源汽车 电工电子技术

主编◎向楠 姜继文 韩玉龙



内 容 简 介

本教材内容顺应新能源汽车产业变革,立足于当前新能源汽车工业的发展,同时顺应职业院校汽车类人才培养目标的需求。教材内容借鉴传统燃油汽车的电工电子技术基本知识,融合新能源汽车技术,使学生掌握电路的基本理论知识和分析方法,具备新能源汽车电工电子的规范操作等专业能力,同时培养学生分析问题和解决问题的能力,为后续专业课的学习打下坚实的基础,培养能够适应新能源汽车行业快速发展的高素质、高技能、高水平人才。

本教材可供高等职业院校新能源汽车技术、智能网联汽车技术、汽车智能技术等汽车类专业教学使用,也可作为汽车行业相关从业人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车电工电子技术 / 向楠, 姜继文, 韩玉龙主编. — 北京: 北京交通大学出版社, 2025. 3. — ISBN 978-7-5121-5480-3

I. U469.7

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20252Q7D69 号

新能源汽车电工电子技术

XINNENGYUAN QICHE DIANGONG DIANZI JISHU

责任编辑: 刘 洵 助理编辑: 孟海江

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 三河市华骏印务包装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 17 字数: 392 千字

版 印 次: 2025 年 3 月第 1 版 2025 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1—3 000 册 定价: 56.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。



编写委员会

主 编

向 楠 姜继文 韩玉龙

副主编

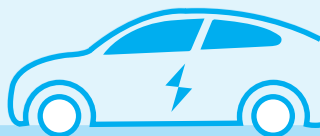
杨盛文 邢方红 刘阳阳

杨 广 程 勇

参编者

纪 远 李珺凯 郭乾隆

叶兴姚 刘晓宇



前言

在全球汽车产业加速向电动化、智能化转型的大潮中，新能源汽车电工电子技术的重要性日益凸显。为顺应时代发展，教材编写团队精心编撰《新能源汽车电工电子技术》教材，旨在为培养具备先进新能源汽车电工电子技术知识与实践能力的新型汽车人才提供有力支撑。

本教材以党的二十大精神为引领，紧扣“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念，以服务汽车产业转型升级为导向，系统阐述新能源汽车电工电子技术的基础理论、关键技术及前沿应用，为推动我国汽车产业迈向高端化、智能化、绿色化贡献力量。教材以“拓展阅读”的形式深度融合“课程思政”理念，将思政元素巧妙融入专业知识教学之中，强调科技创新、绿色环保、工匠精神的价值观念塑造，引导学生深刻理解并积极践行国家创新驱动发展战略，树立节能降耗、绿色出行的环保意识，培养其投身中国汽车工业振兴的责任感与使命感。

本教材采用“项目化任务驱动”模式，共有七个项目，包括探究直流电路、探究正弦交流电路、探究磁路及电磁器件、探究电动机、探究新能源汽车专用仪器仪表、探究模拟电子技术基础、探究数字电路基础。每个项目包括多个任务，每个任务由任务引入、任务准备、任务实施三大模块组成，突出了现代职业教育的实践性、探索性和协作性；每个项目均搭配拓展阅读，融入思政元素，紧紧围绕立德树人根本任务，坚持显性教育与隐性教育相统一，提高学生的道德修养。

教材编写团队主要由来自职业院校的老师 and 企业的专家构成。安徽国防科技职业学院向楠、姜继文、韩玉龙担任主编；安徽国防科技职业学院杨盛文、邢方红、刘阳阳，颖上技工学校杨广，合肥长安汽车有限公司程勇担任副主编；安徽国防科技职业学院纪远、李珺凯、叶兴姚、刘晓宇，颖上技工学校郭乾隆参与编写。在教材编写过程中，编写团队引用和参考了网上的资料、图片，以及文后所列参考文献中的部分内容，特向其作者表示万分感谢，同时也向出版社表示深深的谢意。由于水平有限，书中存在的缺点和疏漏，恳请广大读者批评指正。

此外，编者还为广大一线教师提供了服务于本教材的教学资源库，有需要者可致电教学助手 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com。

面对新能源汽车产业的广阔前景与挑战，我们期待本教材能成为培养新时代新能源汽车领域创新型、复合型人才的重要工具，为我国汽车产业实现高质量发展、达成“双碳”目标提供强有力的支持。

编 者

2024 年 9 月

目录



项目一 探究直流电路 001



任务一 走进电路及其基本物理量 003

- 一、电路 003
- 二、电路模型 004
- 三、电路的基本物理量 005

任务实施 ▶ 探究电路中的常见
物理量 008

任务二 电路的工作状态及电气设备 额定值 009

- 一、电路的三种工作状态 009
- 二、电气设备的额定值 010

任务实施 ▶ 新能源汽车电路故障排查 011

任务三 常用的电路元件 013

- 一、电阻元件 013
- 二、电感元件 015
- 三、电容元件 017

任务实施 ▶ 使用万用表检测电容 019

任务四 基尔霍夫定律 020

- 一、基尔霍夫电流定律 020
- 二、基尔霍夫电压定律 021
- 三、基尔霍夫定律的应用 022

任务实施 ▶ 探究基尔霍夫定律 024

任务五 安全用电常识 025

- 一、安全电压和电流 025
- 二、触电类型与防护措施 026
- 三、触电现场的处理与急救 027

任务实施 ▶ 模拟触电现场处理与急救 029

任务六 特殊电阻在汽车上的应用 030

- 一、特殊电阻 030
- 二、霍尔元件 031

任务实施 ▶ 探究特殊电阻在新能源
汽车上的应用 033

拓展阅读 034

课后习题 035



项目二 探究正弦交流电路 037



任务一 正弦交流电路的基本概念 039

- 一、正弦交流电的概念 039
- 二、表征正弦交流电的物理量 040
- 三、正弦交流电的表示法 043

任务实施 ▶ 探究正弦交流电 045

任务二 单一参数的正弦交流电路 047

- 一、纯电阻电路 047
- 二、纯电感电路 048



三、纯电容电路..... 050

任务实施▶照明电路配电板的安装 052

任务三 多参数组合的正弦交流电路... 054

一、RLC 串联电路..... 054

二、RLC 并联电路..... 057

三、多参数组合的正弦交流电路的
功率..... 058

任务实施▶日光灯电路接线与测量 061

任务四 三相交流电路 064

一、三相交流电动势的产生..... 064

二、三相电源的连接..... 065

三、三相负载的连接..... 067

四、三相电路的功率..... 069

任务实施▶三相负载的星形连接 071

拓展阅读 073

课后习题 075



项目三 探究磁路及电磁器件..... 077



任务一 磁路及电磁感应 079

一、磁场与电磁感应..... 079

二、磁路及磁路欧姆定律..... 082

任务实施▶电磁感应验证实验 084

任务二 铁磁材料 085

一、铁磁材料的磁性能..... 085

二、铁磁材料的分类..... 086

三、磁滞损耗和涡流损耗..... 087

任务实施▶寻找新能源汽车上的磁 089

任务三 变压器..... 090

一、单相变压器的结构..... 090

二、变压器的工作原理..... 091

三、变压器的额定值..... 094

四、几种特殊的变压器..... 095

任务实施▶制作小型变压器 098

任务四 电磁铁及继电器 100

一、电磁铁..... 100

二、直流电磁铁及其在汽车上的应用..... 101

三、继电器..... 102

任务实施▶差动变压器的验证 104

拓展阅读 108

课后习题 110



项目四 探究电动机 111



**任务一 直流电动机的结构、原理、
分类和特性**..... 113

一、直流电动机的结构..... 113

二、直流电动机的工作原理..... 114

三、直流电动机的分类..... 115

四、串励式直流电动机转矩
及工作特性..... 116

任务实施▶直流电动机的拆卸与装配 118

任务二 直流电动机的启动、制动、 反转和调速..... 120

- 一、直流电动机的启动..... 120
- 二、直流电动机的制动..... 121
- 三、直流电动机的反转..... 122
- 四、直流电动机的调速..... 123

任务实施►直流电动机控制原理检测 124

任务三 步进电动机..... 126

- 一、简单的反应式步进电动机的结构
和原理..... 126
- 二、步进电动机的工作原理..... 127
- 三、直流电动机在汽车上的应用..... 128

任务实施►三相异步电动机正反转 控制线路制作 131

任务四 三相异步电动机..... 133

- 一、三相异步电动机的结构..... 133
- 二、三相异步电动机的工作原理..... 135
- 三、三相异步电动机的转矩和特性..... 139
- 四、三相异步电动机的参数..... 141

任务实施►三相笼型异步电动机的 拆装 142

拓展阅读 145

课后习题 148

项目五 探究新能源汽车专用仪器仪表..... 149

任务一 新能源汽车专用兆欧表的 使用..... 151

- 一、新能源汽车专用兆欧表的
基本原理和结构..... 151
- 二、新能源汽车兆欧表的特点
及注意事项..... 153
- 三、新能源汽车兆欧表的使用方法..... 153

任务实施►使用新能源汽车兆欧表 155

任务二 新能源汽车专用万用表的 使用..... 157

- 一、新能源汽车专用万用表的
基本原理和结构..... 157
- 二、新能源汽车专用万用表的特点..... 158
- 三、新能源汽车专用万用表的使用
方法..... 160

任务实施►使用新能源汽车专用 万用表 162

任务三 新能源汽车专用示波器的 使用..... 163

- 一、新能源汽车专用示波器简介..... 163
- 二、新能源汽车专用示波器的
特点及注意事项..... 165
- 三、新能源汽车专用示波器的使用
方法..... 165

任务实施►使用新能源汽车专用 示波器 168

任务四 新能源汽车专用绝缘测试仪的 使用..... 169

- 一、新能源汽车专用绝缘测试仪简介..... 169
- 二、新能源汽车专用绝缘测试仪的
特点..... 171
- 三、新能源汽车专用绝缘测试仪的
使用方法..... 171



任务实施 ▶ 使用新能源汽车专用

绝缘测试仪 173

拓展阅读 174

课后习题 176



项目六 探究模拟电子技术基础 177



任务一 半导体的基本知识 179

一、半导体简介 179

二、PN 结的特性 181

任务实施 ▶ 探究半导体在新能源

汽车上的应用 183

任务二 晶体二极管 184

一、晶体二极管简介 184

二、晶体二极管的原理和特性 187

任务实施 ▶ 检测晶体二极管的特性 190

任务三 整流及滤波电路 191

一、整流电路 191

二、滤波电路 193

任务实施 ▶ 探究整流电路的特性 196

任务四 硅稳压管稳压电路 200

一、硅稳压二极管 200

二、稳压电路 201

任务实施 ▶ 探究稳压电路的作用 203

任务五 晶体三极管 205

一、晶体三极管简介 205

二、晶体三极管的原理和特性 206

任务实施 ▶ 测量三极管的型号及好坏 209

任务六 场效应管及其应用 211

一、场效应管简介 211

二、场效应管的应用 213

任务实施 ▶ 探究场效应管的特性 215

任务七 集成运算放大器及其应用 216

一、集成运算放大器的基本知识 216

二、集成运算放大器的应用 217

任务实施 ▶ 探究集成运算放大器在

新能源汽车中的应用 222

任务八 常用电压比较器在新能源汽车

电路中的应用 223

一、电压比较器的基本知识 223

二、电压比较器在汽车电子电路中的
应用 224

任务实施 ▶ 探究电压比较器的特性 226

拓展阅读 227

课后习题 228



项目七 探究数字电路基础 229



任务一 数字电路的基础知识 231

一、数字电路概述 231

二、数制和编码 232

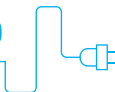
三、数字电路的特点及应用 233

任务实施 ▶ 分析数字电路特点 235

任务二 逻辑代数及运算规则	237	任务四 集成逻辑门电路	244
一、逻辑和逻辑代数	237	一、TTL 门电路	244
二、三种逻辑运算	238	二、CMOS 门电路	245
任务实施 ▶ 分析逻辑代数的特点	239	任务实施 ▶ 探究集成逻辑门的功能	247
任务三 基本逻辑门电路	240	任务五 触发器	248
一、二极管与门电路	240	一、RS 触发器	248
二、二极管或门电路	240	二、D 触发器	251
三、三极管非门电路	241	任务实施 ▶ 探究触发器的特点	255
任务实施 ▶ 测试异或门逻辑功能	242	拓展阅读	257
		课后习题	259



参考文献	260
-------------------	------------



项目二



探究正弦交流电路



项目描述

交流电路是电工学的重点内容之一，是学习电机、电器和电子技术的理论基础。现代工农业生产、国防和人们日常生活中广泛应用交流电。汽车发电机是汽车的主要电源，其功用是在发动机正常运转时（怠速以上），向所有用电设备（起动机除外）供电，同时向蓄电池充电。汽车上普遍采用低压直流 12 V 电源为整车电气系统供电，而此直流电都是由交流发电机产生后整流获得的。本项目主要介绍汽车电源交流电路基础知识及电路相关参数，为学习后续课程打下坚实基础。

项目目标

知识目标

- (1) 理解正弦交流电的三要素及表示方法。
- (2) 理解单一参数和多参数组合的正弦交流电路中电压与电流的关系，理解正弦交流电路功率的计算方法。
- (3) 理解 RLC 串并联电路谐振发生的条件及特点。
- (4) 了解三相交流电的供电方式，理解三相负载在不同的连接方式下线电压与相电压、线电流与相电流的关系。

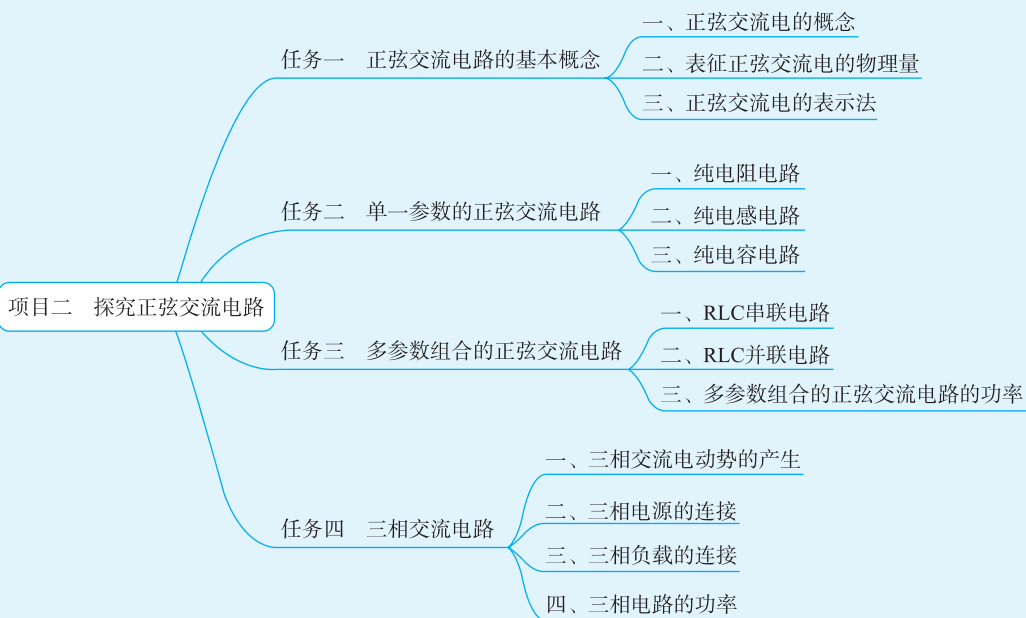
能力目标

- (1) 能够识读正弦交流电路，具备分析、计算正弦交流电路的能力。
- (2) 能够识读三相交流电路，具备分析三相负载连接方式的能力。
- (3) 能够计算不同的连接方式下三相交流电路的线电压与相电压、线电流与相电流、电路功率。

素质目标

- (1) 践行社会主义核心价值观，具有深厚的爱国情怀和中华民族自豪感。
- (2) 秉承严谨求实的工作态度，践行精益求精的工匠精神。
- (3) 有团队意识、质量意识、环保意识、创新意识，有良好的职业精神和职业素养。

思维导图



任务一

正弦交流电路的基本概念

任务引入

在工农业生产和日常生活中所用的电一般都是正弦交流电，正弦交流电因具有容易产生、传输经济、便于使用等优点，在生产和生活中得到广泛应用。那么，正弦交流电有哪些特征？如何进行分析计算？

任务准备

一、正弦交流电的概念

(一) 交流电的产生

一个简单的交流发电机模型如图 2-1-1 所示，主要组成部分为一对磁极和转子线圈。在外力作用下使转子线圈匀速转动，磁极的磁感线穿过线圈平面，磁通量不断变化，引起电流表指针变化。根据电磁感应定律，线圈中产生感应电动势，其大小和方向随时间呈规律变化，即交流电。

汽车交流发电机如图 2-1-2 所示，其组成结构复杂，存在多对磁极和转子，转子线圈匝数也较多，发电机输出电能的部分称为电驱，汽车交流发电机通常采用旋转磁极式，即电驱不动，磁极转动，由此产生交流电。

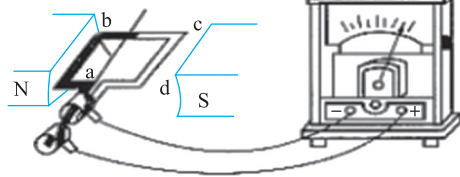


图 2-1-1 交流发电机模型



图 2-1-2 汽车交流发电机

(二) 正弦交流电

交流电是指大小和方向随时间做周期性交替变化的电动势、电压和电流，而按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电。

如图 2-1-3 所示波形图，图 2-1-3 (a) 为直流电波形，图 2-1-3 (b)、图 2-1-3 (c)、



图 2-1-3 (d) 为交流电波形, 其中图 2-1-3 (b) 为正弦交流电波形。

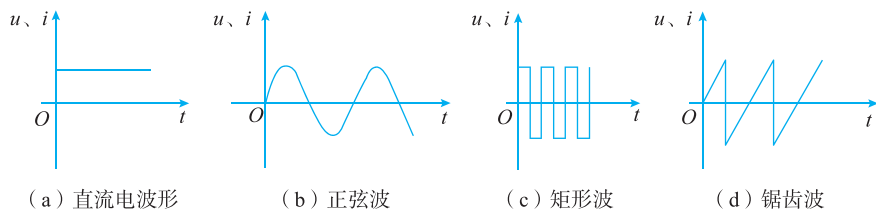


图 2-1-3 几种常见电压、电流随时间变化的波形图

二、表征正弦交流电的物理量

(一) 周期、频率和角频率

1. 周期

正弦交流电变化一周所需的时间叫周期, 用 T 表示, 单位是 s (秒)。

2. 频率

交流电在 1 s 内变化的周数, 称为交流电的频率, 用 f 表示, 单位是 Hz (赫兹)。周期和频率互为倒数关系:

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

3. 角频率

发电机线圈每秒钟经过的角度称为角频率, 用 ω 表示, 单位是 rad/s (弧度/秒)。由于正弦量在时间上经过一个周期时, 刚好在角度上变化了 2π (rad), 所以角频率与频率、周期之间存在:

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

角频率 ω 与频率 f 同样反映了正弦量变化的快慢, 频率越高, 角频率越大, 正弦量变化得越快。

想一想



我国工业用电的频率 (工频) 为 50 Hz, 日本、美国和加拿大的工频为 60 Hz。试计算出我国工频的周期和角频率。

(二) 瞬时值、最大值、有效值

1. 瞬时值

正弦交流电中的电动势、电压及电流统称为正弦量, 正弦量在任意时刻的值称为瞬时值, 分别用小写字母 e 、 u 、 i 表示。正弦规律即用时间的正弦函数表示(图 2-1-4), 正弦量电压的瞬时值一般表达式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2-1-3)$$

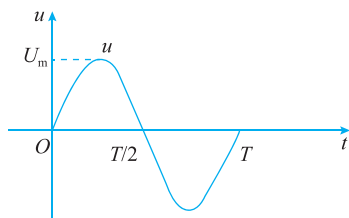


图 2-1-4 正弦交流电压波形图

2. 最大值

正弦量瞬时值的最大值称为幅值(又称峰值), 用带下标 m 的大写字母表示, 如 E_m 、 U_m 和 I_m 等。幅值反映了正弦量变化的幅度的大小, 幅值越大, 说明正弦量变化的幅度越大。

3. 有效值

在相同的电阻中, 分别通入直流电和交流电, 在一个交流周期内, 如果它们在电阻上产生的热量相等, 则用此直流电的数值表示交流电的有效值。有效值规定用大写字母 E 、 U 、 I 表示。

根据有效值的定义, 可得

$$Q = I^2 R T$$

$$Q = \int_0^T i^2 R \, dt$$

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

再将 $i = I_m \sin \omega t$ 代入, 积分可得

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, dt}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m \quad (2-1-4)$$

同理可得到正弦电压和电动势的有效值:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m \quad (2-1-5)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 E_m \quad (2-1-6)$$



想一想



生活用电 220 V 通常指的是其有效值, 试计算出其最大值是多少。

(三) 初相位

1. 相位

在电压的瞬时值表达式 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ 中, “ $\omega t + \varphi_u$ ” 称为正弦量的相位, 由于其单位是角度, 所以又称为相位角 (或相角), 不同的相位对应着不同的瞬时值。

2. 初相位简介

在电压的瞬时值表达式 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ 中, $t = 0$ 时的相位为 φ_u , 称为初相位, 它决定了正弦量在计时起点的大小。初相位与计时起点有关, 如图 2-1-5 所示, 计时起点取在 A 处, 电压的初相位 $\varphi_u = 0^\circ$; 计时起点取在 B 处, 电压的初相位 $\varphi_u = 90^\circ$ 。

【例 2-1】已知正弦电流 i 的幅值 $I_m = 5 \text{ A}$, 频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 初相位 $\varphi_i = -60^\circ$, 求: ① 该电流的周期和角频率; ② 电流 i 的函数表达式, 并画出波形图。

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

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

② $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) = 5 \sin(314t - 60^\circ) \text{ A}$, 电流波形图如图 2-1-6 所示。

【提示】对于任意一个正弦量, 若已知其最大值 (有效值)、角频率 (周期或频率) 和初相角, 就可以表示出正弦交流电正弦量的瞬时值, 于是正弦交流电的最大值、角频率和初相角叫作正弦交流电的三要素。

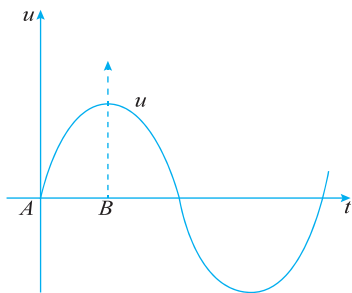


图 2-1-5 正弦电压的初相位

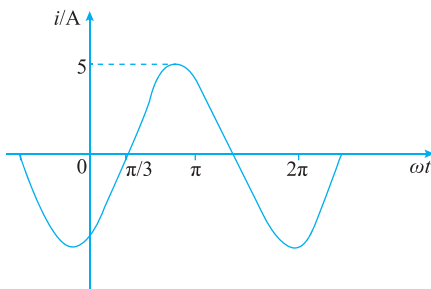


图 2-1-6 例 2-1 的电流波形图

(四) 相位差

两个同频率的正弦交流电的相位角之差叫相位差, 用 $\Delta\varphi$ 表示。例如, 已知

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1), \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

则 e_1 和 e_2 的相位差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2-1-7)$$

由式 (2-1-7) 可知, 两个同频率的正弦交流电的相位差等于它们的初相之差, 根据相位差公式, 有:

- (1) 若 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$, 则 e_1 超前 e_2 , 或者说 e_2 滞后 e_1 , 如图 2-1-7 (a) 所示;
- (2) 若 $\Delta\varphi = 0$, 称这两个交流电为同相, 波形如图 2-1-7 (b) 所示;
- (3) 若 $\Delta\varphi = 180^\circ$, 称这两个交流电为反相, 波形如图 2-1-7 (c) 所示。

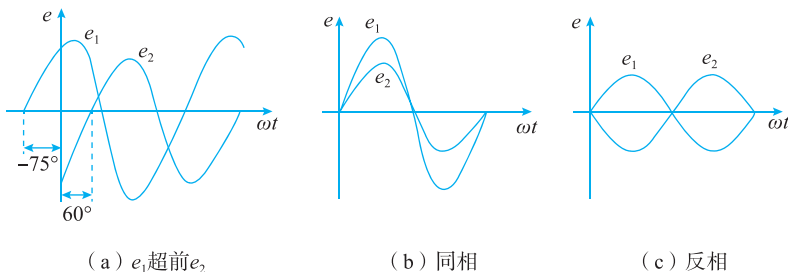


图 2-1-7 交流电的相位关系

【提示】 这里必须指出的是, 在比较两个正弦交流电之间的相位顺序时, 两个正弦量一定要同频率才有意义。

三、正弦交流电的表示法

正弦交流电常用的三种表示方法有波形图表示法 (即曲线法)、解析式表示法、相量图 (即矢量图) 表示法。在分析正弦交流电路, 对同频率正弦量进行加减运算时, 采用正弦交流电的相量图表示法更为简单。

(一) 波形图表示法

参考图 2-1-4, 在平面直角坐标系中, 以时间 t 或电角度 ωt 为横坐标, 以正弦量的瞬时值为纵坐标, 根据一系列的时间 t 或电角度 ωt 与对应的瞬时值, 做出 e 、 u 、 i 的波形图, 这种方法称为波形图表示法。图 2-1-4 即为正弦交流电压 u 的波形图。

(二) 解析式表示法

用三角函数解析式表示正弦交流电的方法为解析式表示法。正弦交流电的 e 、 u 、 i 解析式为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e) \quad (2-1-8)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2-1-9)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2-1-10)$$



(三) 相量图表示法

在一个直角坐标系中用绕原点旋转的矢量来表示正弦交流电的方法称为相量图表示法, 相量图表示法分为旋转矢量(最大值矢量)法和有效值矢量法两种。

1. 旋转矢量法

通常只用初始位置($t=0$)的有向线段 I_m (或有效值 I)来表示一个旋转正弦量。将表示随时间在平面上旋转的这一有向线段称为相量, 用大写字母上加“ $\cdot$ ”或加“ $\rightarrow$ ”符号来表示。如 $\dot{E}_m$ 、 $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$ 分别表示电动势、电压、电流的最大值相量。

2. 有效值矢量法

有效值矢量用 $\dot{E}$ 、 $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 表示。有效值相量也只画矢量的起始位置。

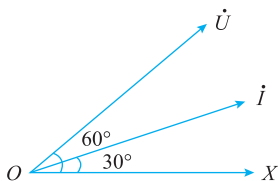


图 2-1-8 正弦交流电的相量表示法

如图 2-1-8 所示为正弦交流电的相量表示法(有效值矢量法), 有向线段的长度为正弦量的有效值, 其与横坐标正方向的夹角为正弦量的初相位。从图中不难看出, 电压的初相位为 60° , 电流的初相位为 30° , 电压超前电流 30° 。

【提示】相量图不仅能表示相量的大小和初相, 还能表示各相量的相位关系, 即超前、滞后的关系。需要注意的是, 只有正弦量才能用相量表示, 只有频率相同的正弦量才能画在同一相量图上, 可以用平行四边形法则进行加减运算。两个同频率正弦交流电的“和”与“差”频率不变。不同频率的正弦量不能画在一个相量图上进行比较、计算。

想一想

正弦交流电本身是矢量吗? 它和矢量之间是什么对应关系?



【例 2-2】已知 $u_1 = 20\sqrt{2} \sin 314t$ V, $u_2 = 15\sqrt{2} \sin(314t + 90^\circ)$ V, 求:

(1) 写出 $u = u_1 + u_2$ 的瞬时值表达式。

(2) 画出总电压 u 的相量图。

解: (1) 由已知条件可得总电压 u 的有效值和初相位:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{20^2 + 15^2} \text{ V} = 25 \text{ V}$$

$$\varphi = \arctan \frac{U_2}{U_1} = \arctan \frac{15}{20} \approx 36.9^\circ$$

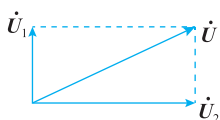


图 2-1-9 例 2-2 的电压相量图

则瞬时值表达式为

$$u = 25\sqrt{2} \sin(314t + 36.9^\circ) \text{ V}$$

(2) 总电压 u 的相量图如图 2-1-9 所示。

任务实施 探究正弦交流电

环境准备

在实训之前，需要在计算机上安装电路仿真软件 Multisim，连接示波器，绘制示波器测量记录表备用。

实施步骤

(1) 用电路仿真软件 Multisim 构建仿真电路，提供正弦交流信号源，如图 2-1-10 所示。

(2) 连接示波器，如图 2-1-10 所示。

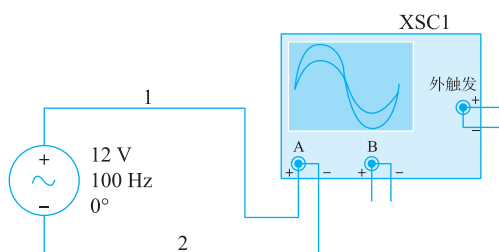


图 2-1-10 任务电路图

(3) 按表 2-1-1 设置正弦交流信号源参数，观察并记录示波器参数及波形。

表 2-1-1 正弦交流信号源参数

交流电源参数设置	示波器测量记录
电压: 10 V 频率: 100 Hz 初相位: 0°	最大值: _____ V 周 期: _____ s 绘制波形图:
电压: 10 V 频率: 1 kHz 初相位: 90°	最大值: _____ V 周 期: _____ s 绘制波形图:
电压: 10 V 频率: 10 kHz 初相位: 180°	最大值: _____ V 周 期: _____ s 绘制波形图:



任务评价

[illegible]

任务二

单一参数的正弦交流电路

任务引入

在交流电路中,除交流电源和电阻元件外,还常常包括电感和电容元件。除电源外,只含有单种元件的电路,称为单一参数电路(纯电阻电路、纯电感电路、纯电容电路)。掌握单一参数电路中的电压和电流的关系、功率计算是分析复杂交流电路的基础。

任务准备

一、纯电阻电路

(一) 电阻元件上电压和电流的关系

日常生活中所用的白炽灯、电饭锅、热水器等在交流电路中都可以近似看成纯电阻元件。如图 2-2-1(a) 所示,只考虑电阻负载的交流电路称为纯电阻电路。

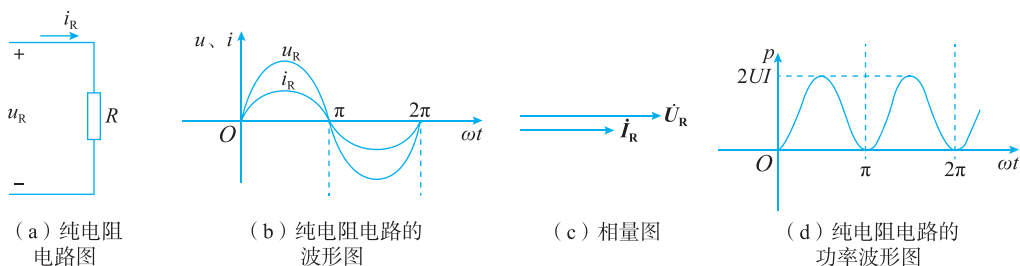


图 2-2-1 纯电阻电路

纯电阻电路中,电压和电流的频率、相位相同,它们的波形图如图 2-2-1(b) 所示,相量关系式 $\dot{U}_R = R\dot{I}_R$, 相量图如图 2-2-1(c) 所示。

纯电阻元件上电流和电压的瞬时值关系为

$$u_R = Ri_R \quad (2-2-1)$$

若设电流为参考正弦量,即 $i = I_m \sin \omega t$, 则 $u = Ri = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$, 可见电流和电压的最大值符合欧姆定律:

$$U_m = RI_m \quad (2-2-2)$$

电流和电压的有效值符合欧姆定律:

$$U = RI \quad (2-2-3)$$



(二) 纯电阻电路功率

1. 瞬时功率

纯电阻电路中，瞬时功率为电压与电流的瞬时值乘积，即

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t) \quad (2-2-4)$$

2. 有功功率

纯电阻电路的有功功率（平均功率）等于电压有效值与电流有效值的乘积，即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (2-2-5)$$

式中， P 、 U 、 I 、 R 的单位分别是 W 、 V 、 A 、 Ω 。

【提示】电阻消耗功率，是耗能元件。功率波形图如图 2-2-1 (d) 所示。



练一练

有一个额定值为 220 V、1 000 W 的电阻炉，接在 220 V 的交流电源上，求：

- (1) 通过电阻炉的电流和它的电阻；
- (2) 电阻炉连续使用 1 h 所消耗的电能。

二、纯电感电路

(一) 电感元件上电压和电流的关系

空心线圈是典型的线性电感元件，当忽略线圈内阻时，线圈电路可视为纯电感电路，电路图如图 2-2-2 (a) 所示。

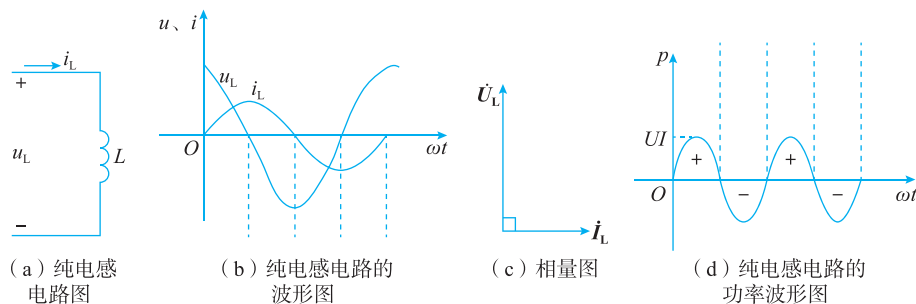


图 2-2-2 纯电感电路

电感元件上电压和电流的频率相同、相位不同，相位上电流滞后电压 90° ，它们的波

形图如图 2-2-2 (b) 所示, 电压和电流的相量图如图 2-2-2 (c) 所示。

由电磁感应定律可以得出电感元件电压和电流的瞬时值关系式为

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (2-2-6)$$

若设 i 为参考量, 设 $i = I_m \sin \omega t$, 将电流代入电压表达式得到

$$u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2-2-7)$$

纯电感电路中, 电感对交流电起阻碍作用, 其阻碍作用的大小用感抗 X_L 表示, 单位为 Ω , 且它与自感系数 L 和交流电的频率 f 存在以下关系:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (2-2-8)$$

纯电感电路中, 电压和电流的有效值数值关系符合欧姆定律, 有

$$U = \omega L I = X_L I \quad (2-2-9)$$

【提示】由式 (2-2-8) 可知, 感抗 X_L 与自感系数 L 和频率 f 成正比, 即自感系数越大或频率越高, 感抗越大, 又根据式 (2-2-9), 若在电压一定的条件下, 感抗越大, 则电流越小。当频率 $f \rightarrow \infty$ 时, $X_L \rightarrow \infty$, 电感相当于开路; 反之, $f = 0$ 时, 即直流时, $X_L = 0$, 电感相当于短路。所以电感具有“通直流、隔交流”“通低频、阻高频”的性质, 在电子技术中被广泛应用于滤波、高频扼流等方面。

想一想



感抗的单位与电阻的单位相同, 想想两者对于电流的阻碍作用的本质区别。

(二) 电感电路的功率

1. 瞬时功率

纯电感电路中, 瞬时功率为电压与电流的瞬时值乘积, 即

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \cdot I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t \quad (2-2-10)$$

2. 有功功率

如图 2-2-2 (d) 所示, 在第一个和第三个 $\frac{1}{4}$ 周期内, p 是正的 (u 和 i 正负相同), 在第二个和第四个 $\frac{1}{4}$ 周期内, p 是负的 (u 和 i 一正一负)。瞬时功率的正负可以理解为: 当瞬时功率为正值时, 电感元件处于受电状态, 此时电感从电源中取用电能; 当瞬时功率为负值时, 电感元件处于供电状态, 此时电感把电能归还给电源。于是在纯电感电路中,



有功功率（平均功率）为 0，即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0 \quad (2-2-11)$$

【提示】式（2-2-11）说明纯电感元件不消耗有功功率，是储能元件。

3. 无功功率

在纯电感电路中，电感不消耗有功功率，电感与电源之间存在着能量交换，这种能量交换的大小用无功功率 Q 表示，这里规定无功功率等于瞬时功率的幅值，即

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L} \quad (2-2-12)$$

Q_L 的单位是 var [乏（尔）] 或是 kvar [千乏（尔）]。

【提示】无功功率具有重要的现实意义。“无功”的含义是“交换”而不是消耗，是相对“有功”而言的，绝不能理解为“无用”。

想一想



若这个电感线圈的直流电阻不可忽略，其值为 $R = 100 \Omega$ ，此交流电路还是纯电感电路吗？是不是可以看成纯电阻和纯电感的串联电路呢？电压和电流的相位差还是 90° 吗？有功功率是多少？这个电感线圈对交流电的总阻碍作用是多少？

三、纯电容电路

（一）电容元件上电压和电流的关系

常用的电容器就是典型的电容元件，电容是一个储存电场能量的元件。在交流电路中，若只用电容做负载，且忽略介质损耗时，此电路称纯电容电路，如图 2-2-3（a）中所示。

电容元件上电压和电流的频率相同、相位不同，相位上电流超前电压 90° ，波形图如图 2-2-3（b）所示。电压和电流的相量图如图 2-2-3（c）所示。

电容元件对交流电有阻碍作用，阻碍作用的大小用容抗 X_C 表示，其与电容 C 和交流电的频率关系为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2-2-13)$$

式中，容抗 X_C 的单位是 Ω ；交流电源的频率 f 的单位为 Hz；电容器的电容 C 的单位为 F。电压和电流的有效值数值关系符合欧姆定律，即

$$U = X_C I \quad (2-2-14)$$

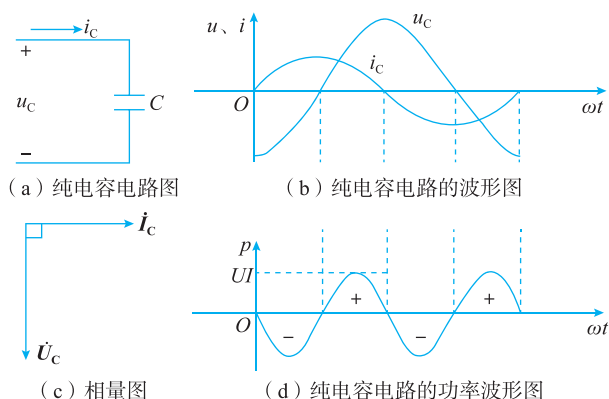


图 2-2-3 纯电容电路

【提示】由式(2-2-13)可知,容抗 X_C 与电容 C 和频率 f 成反比,即电容越大或频率越高,容抗越小,又根据式(2-2-14),若在电压一定的条件下,容抗越小,则电流越大。当频率 $f=0$ 时,即直流时, $X_C \rightarrow \infty$,电容相当于开路;反之,当 $f \rightarrow \infty$ 时, $X_C = 0$,电容相当于短路。所以电容具有“隔直流、通交流”“通高频、阻低频”的性质,在电子技术中被广泛应用于旁路、隔直、滤波等方面。

(二) 电容电路的功率

1. 瞬时功率

纯电容电路中,瞬时功率为电压与电流的瞬时值乘积,即

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t \quad (2-2-15)$$

2. 有功功率

如图2-2-3(d)所示,在第二个和第四个 $\frac{1}{4}$ 周期内,电压值在增高, p 是正的(u 和 i 正负相同),此时电容从电源取用电能而储存在自己的电场中,即电容元件的充电过程;在第一个和第三个 $\frac{1}{4}$ 周期内,电压值在下降, p 是负的(u 和 i 一正一负),此时电容将所储存的电能归还给电源,即电容的放电过程。于是在纯电容电路中,有功功率(平均功率)为0,即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0 \quad (2-2-16)$$

【提示】式(2-2-16)说明电容元件不消耗有功功率,是储能元件。

3. 无功功率

在纯电容电路中,电容不消耗有功功率,电容与电源之间存在着能量交换,这种能量交换的大小用无功功率 Q 表示,这里规定无功功率等于瞬时功率的幅值,即

$$Q_C = UI = I^2 X_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (2-2-17)$$



任务实施

照明电路配电板的安装



环境准备

在任务开始前，需要准备以下器材。

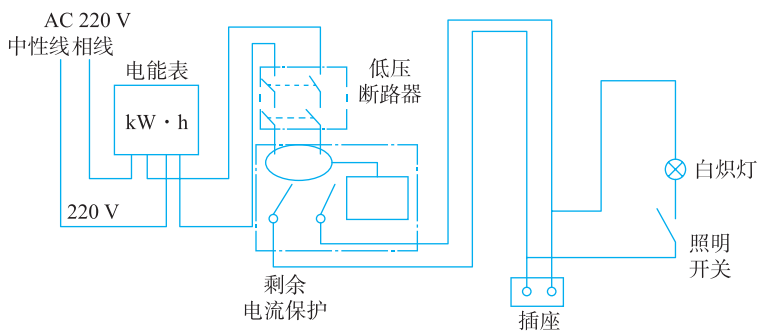
- (1) 单相电能表 1 个。
- (2) 普通开关 2 个。
- (3) 低压断路器 2 个。
- (4) 插座 2 个。
- (5) 白炽灯 2 个。
- (6) 接线板（网孔板）1 块。
- (7) 电工工具 1 套。
- (8) 导线若干。



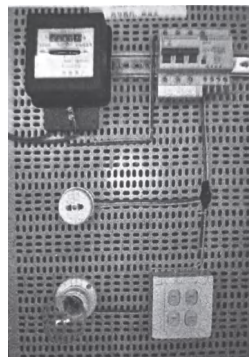
实施步骤

- (1) 学习单相电能表的接线方法。
- (2) 学习单相电能表的读数方法。

(3) 照明电路配电板电路原理如图 2-2-4（a）所示，参照原理图在网孔板上设计各器件的位置，并布线、检查电路。



（a）照明电路配电板电路原理



（b）照明电路配电板实物参照图

图 2-2-4 照明电路配电板电路

(4) 检查无误后送电测试电路，低压断路器合闸，合普通开关，观察白炽灯的亮灭情况，观察电能表的转动情况。

(5) 填写实训表格，交流总结。



任务三

多参数组合的正弦交流电路

任务引入

本任务讨论的是电阻、电感、电容的串联电路和并联电路，是正弦交流电路中的典型电路，本任务将在上个任务的基础上，讨论 RLC 串并联电路的伏安关系（大小和相位关系）及功率计算。由于电感和电容元件的存在，一般情况下电路两端的电压与电流是不同相的，但是在某些情况下，调节电路的参数或者改变电源的频率就能使电压与电流同相，此时电路呈现电阻电路的特性，称为谐振电路。当电路发生谐振时，会发生某些特殊的现象，在无线电工程、测量技术中得到广泛的应用，但谐振时又可能影响电力系统的正常工作，所以对于谐振的研究具有实际的意义。

任务准备

一、RLC 串联电路

图 2-3-1 (a) 所示为电阻、电感和电容串联的交流电路，图 2-3-1 (b) 是它的等效电路，图 2-3-1 (c) 为电路总电压与电流的相量关系图。设 $i = I_m \sin \omega t$ ，即以 $\dot{I}$ 为参考相量。

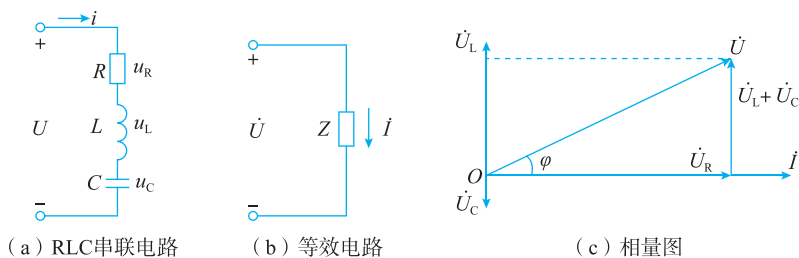


图 2-3-1 RLC 串联电路及其等效电路、相量图

(一) 电路电压 u 与电流 i 之间的关系

根据电流参考量，可得电压 u_R 、 u_L 、 u_C ：

$$\begin{cases} u_R = RI_m \sin \omega t \\ u_L = X_L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ u_C = X_C I_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (2-3-1)$$

根据基尔霍夫电压定律，任意时刻电压 u 的瞬时值有

$$u = u_R + u_L + u_C \quad (2-3-2)$$

根据相量图, 得到各电压之间的大小关系为

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2-3-3)$$

式中, $X_L - X_C$ 称为电抗 (X); 如图 2-3-1 (b) 所示, Z 为电路的等效阻抗, 即

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2-3-4)$$

式中 Z 的单位也是 Ω , 表明了串联电路对交流电总的阻碍作用, 称为电路的阻抗。

RLC 电路的阻抗三角形如图 2-3-2 所示, 其中 $|Z|$ 与 R 的夹角为阻抗角, 即为总电压与总电流的相位差 φ , 即

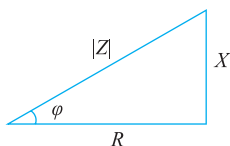


图 2-3-2 阻抗三角形

$$\varphi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{X}{R} \quad (2-3-5)$$

当电源的频率一定时, 总电压 u 与电流 i 的相位关系和有效值关系都取决于电路参数 R 、 L 、 C 。

在 RLC 串联电路中:

- (1) 当 $X = X_L - X_C > 0$ 时, $\varphi > 0$, 说明电压超前电流 φ 角, 电路呈现感性;
- (2) 当 $X = X_L - X_C < 0$ 时, $\varphi < 0$, 说明电压滞后于电流 φ 角, 电路呈现容性;
- (3) 当 $X = X_L - X_C = 0$ 时, $\varphi = 0$, 说明电压与电流同相位, 电路呈现电阻性。

(二) 串联谐振

1. 串联谐振的概念

从 RLC 串联电路的分析可知: 当 $X = X_L - X_C = 0$ 时, 电路相当于“纯电阻”电路, 其总电压 U 和总电流 I 同相, 即 $\varphi = 0$, 此时称电路为 RLC 串联谐振。

此时设电源的频率 $f = f_0$, 由 $X_L = X_C$, 可得 $2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$, 即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3-6)$$

f_0 称为串联电路的谐振频率。

想一想



某收音机的输入调谐电路中 $L = 260 \mu\text{H}$, 若要收听频率为 828 kHz (该频率就是串联谐振频率 f_0) 的北京广播电台的新闻广播, 应将调谐电容调整为多大?



2. 串联谐振的特点

- (1) 电路呈现电阻性：电流与电压同相位，电路呈电阻性。
- (2) 电流呈现最大：电路的阻抗 Z 最小，即 $Z = Z_0 = R$ ，故而电流最大，称为谐振电流 I_0 。
- (3) 品质因数：串联谐振时，

$$U_L = U_C = X_L I_0 = X_C I_0 = QU \quad (2-3-7)$$

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \quad (2-3-8)$$

串联电路发生谐振时，电感 L 与电容 C 上的电压大小都是电源电压的 Q 倍，所以串联谐振又叫作电压谐振。

3. 串联谐振的应用

串联谐振在无线电工程中应用较多，例如在收音机中选择电台信号的调谐电路，就是利用串联谐振的原理，如图 2-3-3 所示。电台发射不同频率的信号，通过收音机的互感作用产生各自频率的感应电动势，进而在 LC 串联电路中产生不同频率的电压信号。通过调节可变电容器 C 值的大小，可使 RLC 串联电路对某一频率 f_1 的信号发生谐振，则在电容两端将产生幅值较 e_1 幅值高得多的频率为 f_1 的电压信号；而对于其他频率的信号，由于电路不满足谐振条件，电路呈现较大的阻抗，电流很小，故电容两端非谐振频率的电压分量很小，与 f_1 的电压分量相比可以忽略。这样，通过调节 C 的数值，调谐电路就会得到某频率的电容电压的信号，再经过功放电路就能播放该波段频率的电台节目。

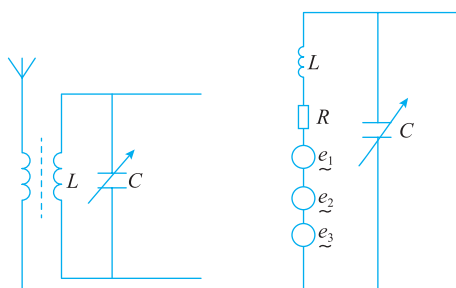


图 2-3-3 调谐回路及其等效电路图

得到某频率的电容电压的信号，再经过功放电路就能播放该波段频率的电台节目。

在电力系统中，应避免发生串联谐振。这是由于谐振时在电容或电感上产生幅值远大于电源电压的过电压，这将导致绝缘击穿，从而使线圈和电容器烧损。

可见，在实际中对串联谐振的使用应趋利避害。



练一练

已知一个线圈的参数为 $R = 6 \Omega$ 和 $X_L = 8 \Omega$ ，与 $X_C = 2 \Omega$ 的电容器串联后接在 220 V 的正弦交流电源上。求：

- (1) 电路中的电流 I ；
- (2) 电流与电源电压的相位差；
- (3) 线圈上的电压。

二、RLC 并联电路

电阻、电感和电容并联的交流电路如图 2-3-4 (a) 所示, 图 2-3-4 (b) 是它的等效电路, 图 2-3-4 (c) 为电路电压与电流的相量图。设 $u = U_m \sin \omega t$, 即以 $\dot{U}$ 为参考相量。

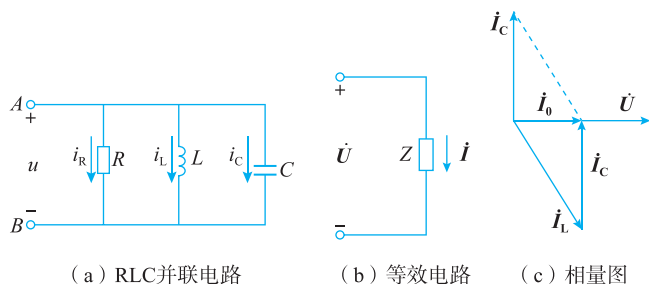


图 2-3-4 RLC 并联电路及其等效电路、相量图

(一) 电路电压 u 与电流 i 之间的关系

根据电压参考量, 可得电流 i_R 、 i_L 、 i_C :

$$\begin{cases} i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \\ i_L = \frac{U_m}{X_L} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ i_C = \frac{U_m}{X_C} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{cases} \quad (2-3-9)$$

根据基尔霍夫电流定律, 任意时刻电流 i 的瞬时值有

$$i = i_R + i_L + i_C \quad (2-3-10)$$

根据各元件有效值符合欧姆定律, 得

$$\begin{cases} I_R = \frac{U}{R} = GU \\ I_L = \frac{U}{X_L} = B_L U \\ I_C = \frac{U}{X_C} = B_C U \end{cases} \quad (2-3-11)$$

其中 $G = \frac{1}{R}$ 叫作电导, $B_L = \frac{1}{X_L}$ 叫作感纳, $B_C = \frac{1}{X_C}$ 叫作容纳, 单位均为 S (西 [门子])。

根据相量图, 得到各电流之间的大小关系为

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = U \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \quad (2-3-12)$$

式中 $B_C - B_L$ 称为电纳 (B), 单位为 S (西 [门子]); 如图 2-3-4 (b) 所示, Z 为电路



的等效阻抗, 即

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{U}{U\sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B^2}} \quad (2-3-13)$$

式中, Z 的单位是 Ω [欧(姆)]。

电压与电流的相位差 φ , 即

$$\varphi = \arctan \frac{I_C - I_L}{I_R} = \arctan \frac{B_C - B_L}{G} = \arctan \frac{B}{G} \quad (2-3-14)$$

在 RLC 并联电路中:

- (1) 当 $B = B_C - B_L < 0$ 时, $\varphi < 0$, 说明电压超前电流 φ 角, 电路呈现感性;
- (2) 当 $B = B_C - B_L > 0$ 时, $\varphi > 0$, 说明电压滞后于电流 φ 角, 电路呈现容性;
- (3) 当 $B = B_C - B_L = 0$ 时, $\varphi = 0$, 说明电压与电流同相位, 电路呈现电阻性。

(二) 并联谐振

1. 并联谐振的概念

从 RLC 并联电路的分析可知: 当 $B = B_C - B_L = 0$ 时, 其电压 U 和电流 I 同相, 即 $\varphi = 0$, 此时称电路为 RLC 并联谐振。此时设电源的频率 $f = f_0$, 即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3-15)$$

2. 并联谐振的特点

- (1) 阻抗最大、电路呈电阻性。

$$|Z_0| = \frac{L}{RC} \quad (2-3-16)$$

- (2) 电流呈现最小: 电路的阻抗 Z 最大, 电流最小。

$$I_0 = \frac{U}{|Z_0|} \quad (2-3-17)$$

(3) 谐振电流 $\dot{I}$ 和支路电流 $\dot{I}_0$ 和 $\dot{I}_C$ 的相量关系如图 2-3-4 (c) 所示。并联谐振各支路电流大于总电流, 所以并联谐振又称为电流谐振。

三、多参数组合的正弦交流电路的功率

(一) 有功功率 P

电路中的有功功率就是电阻 R 消耗的功率, 在 RLC 串联电路中, 其大小为

$$P = U_R I = UI \cos \varphi \quad (2-3-18)$$

(二) 无功功率 Q

电路中的无功功率反映的是电感和电容共同作用时交换的电能规模, 其大小为

$$Q = (U_L - U_C)I = UI \sin \varphi \quad (2-3-19)$$

(三) 视在功率 S

把电路中电流和总电压有效值的乘积定义为电路的视在功率, 用 S 表示, 即 $S = UI$, 单位为 $V \cdot A$ (伏安), $1 V \cdot A = 1 W$ 。

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-3-20)$$

如图 2-3-5 所示, P 、 Q 、 S 三者也构成直角三角形, 称为功率三角形。

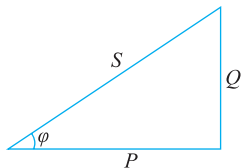


图 2-3-5 功率三角形

(四) 功率因数 $\cos \varphi$

1. 功率因数

有功功率与电源视在功率的比值称为功率因数, 用 $\cos \varphi$ 表示。

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} \quad (2-3-21)$$

2. 提高功率因数的方法

- (1) 在电感性负载两端并联一只电容量适当的电容器。
- (2) 选用变压器和电动机时容量不宜过大, 并尽量减少轻载和空载运行, 因为电动机和变压器轻载或空载时, 功率因数低; 满载时, 功率因数较高。
- (3) 加快老旧设备及高耗能电器产品的更新换代。

【提示】功率因数的大小表示电源功率被利用的程度。因为任何发电机、变压器都会受到温度和绝缘问题的限制, 所以使用时必须在额定电压和额定电流范围以内, 即额定视在功率以内。

想一想



当 $\cos \varphi$ 为多少时, $P = S$? 此时, 电路呈现什么性质?

【例 2-3】一台有铁芯的工频感应炉, 其额定功率 P_N 为 100 kW, 额定电压为 380 V, 功率因数为 0.707, 求:

- (1) 当电炉在额定条件运行时, 其额定视在功率 S_N 和无功功率 Q_N 是多少?
- (2) 设该电炉可等效为 R 与 L 串联, 求其参数。

解: (1)
$$S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi} = \frac{100}{0.707} \text{ kV} \cdot \text{A} \approx 141.4 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$\varphi = \arccos 0.707 \approx 45^\circ$$

因为电炉可等效为 RL 串联电路, 所以电炉为感性负载, 故阻抗角大于零。



$$Q_N = S_N \sin \varphi = 141.4 \times 0.707 \text{ kvar} \approx 100 \text{ kvar}$$

$$(2) \quad I_N = \frac{P_N}{U_N \cos \varphi} = \frac{100 \times 10^3}{380 \times 0.707} \text{ A} \approx 372 \text{ A}$$

$$R = \frac{P_N}{I_N^2} = \frac{100 \times 10^3}{372^2} \Omega \approx 0.72 \Omega$$

$$X_L = \frac{Q_N}{I_N^2} = \frac{100 \times 10^3}{372^2} \Omega \approx 0.72 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.72}{2\pi \times 50} \text{ H} \approx 2.3 \text{ mH}$$



任务实施

日光灯电路接线与测量



环境准备

日光灯曾经是应用较为普遍的一种照明灯具，其照明线路由电源、灯管、启辉器、镇流器、开关等组成。如图 2-3-6 所示为日光灯的原理接线图，当日光灯接入电路后，电源电压经过镇流器、灯丝，加在启辉器的 U 形金属片和静触头之间，引起辉光放电。放电时产生的热量使双金属片膨胀并向外伸张，与静触头接触，接通电路，使灯丝受热并发射出电子。与此同时，由于双金属片与静触头接触而停止辉光放电，双金属片逐渐冷却并向里弯曲，脱离静触头。在触头断开的瞬间，镇流器两端会产生一个比电源电压高得多的感应电动势。这个感应电动势加在灯管两端，使大量电子在灯管中流过。电子在运动中冲击管内的气体，发出紫外线。紫外线激发灯管内壁的荧光粉后，发出近似日光的可见光。

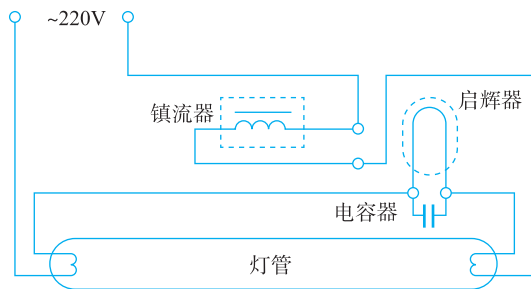


图 2-3-6 日光灯的原理接线图

镇流器还有两个作用：一是在灯丝加热时，限制灯丝所需的加热电流值，防止灯丝因加热过高而烧断，并保证灯丝的电子发射能力；二是在灯管启辉后，维持灯管的工作电压并将灯管的工作电流限制在额定值，以保证灯管能稳定工作。

由于镇流器的感抗较大，日光灯的功率因数较低，一般为 0.5 左右。过低的功率因数不利于电能的充分利用和负载的稳定运行，通常可并联合适的电容器来提高电路的功率因数（工程上，一般由总配电间并联电容器，提高单位电网的功率因数）。

注意：用功率表测量电路有功功率时，应注意正确选用功率表的电压、电流和功率量程，正确接线和读数。由于日光灯电路的功率因数较低，宜选用低功率因数功率表来进行测量。

任务需要以下仪器。

- (1) 单相调压器 1 台。
- (2) 交流电流表 1 只。
- (3) 万用表 1 只。
- (4) 单相功率表 1 只。
- (5) 电容箱 1 只。
- (6) 日光灯实验板 1 块。
- (7) 单刀开关 2 只。



(8) 测量电流用插头 1 只。

实施步骤

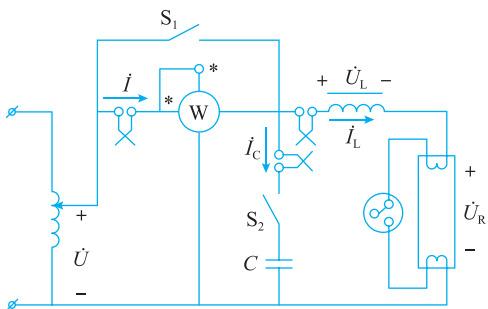


图 2-3-7 日光灯实验电路

1. 日光灯的接线

(1) 检查日光灯组件。用万用表欧姆档检查镇流器、灯管是否开路，启辉器、镇流器是否短路。更换不合格的配件。

(2) 接线。断开调压器的输入电源。如图 2-3-7 所示为日光灯实验电路，按图接线前插上灯管，检查灯座接触是否良好，排除灯座接触不良的故障。将调压器手柄置于零位，合上开关 S_1 （日光灯启辉电流较大，启辉时用单刀开关将功率

表的电流线圈短路，防止仪表损坏），断开电容器支路开关 S_2 。

(3) 试通电。经检查确认接线无误后，合上调压器输入电源，转动调压器手轮，逐步升高其输出电压，观察启辉器的启辉和灯管的点亮过程。如出现故障，断电进行故障检查，排除故障。

2. 数据测量

日光灯点亮后，将调压器的输出电压调到日光灯的额定电压 220 V，使日光灯正常工作，断开 S_1 ，测量电压 U 、 U_L 、 U_R ，电流 I_L 及功率 P ，记录在表 2-3-1 中。测量电流时，先选择好电流量程，再接好测量电流用插头，将该插头插入相应的插孔，即将电流表连入该支路。

3. 功率因数的提高

维持电源电压 U 为 220 V。合上电容支路开关 S_2 ，逐渐增加电容量 C ，使电路由感性变到容性。每改变电容一次，测出日光灯电路 U 、 U_L 、 U_R 各电压，各电流 I_L 、 I_C 、 I 及电路的功率 P ，并记录在表 2-3-1 中。

表 2-3-1 数据记录

项目	测量数据								计算数据
	U	C	U_L	U_R	I	I_L	I_C	P	$\cos \varphi$
不接电容器		—							
C 较小，电路感性									
C 较大，电路感性									
C 较大，电路容性									



任务四

三相交流电路

任务引入

汽车在减速或制动过程中，制动系统会将车辆的动能转变为热能，释放到大气中，而新能源汽车在上述过程中，可以将动能转换成三相交流电，然后经整流电路，将三相交流电转换成直流电对动力电池充电，以实现制动能量回收的目的。生活中常见两孔或三孔插座实则为单相电源，而工厂生产多使用三相交流电，二者有什么联系呢？三相交流电又是怎么产生的？

任务准备

一、三相交流电动势的产生

（一）三相交流发电机的结构

如图 2-4-1 所示为三相交流发电机的结构和原理，三相交流发电机由定子及转子两大部分所组成，定子铁芯的内壁均匀分布 6 个线槽，分别嵌入 3 个互相间隔 120° 的线圈，叫作三相绕组，三相分别用 U、V、W 表示。三相交流发电机的转子是一块永久磁铁，当转子由原动机带动匀速转动时，磁铁产生旋转磁场，三相绕组依次切割磁感线，产生三相对称正弦电动势。

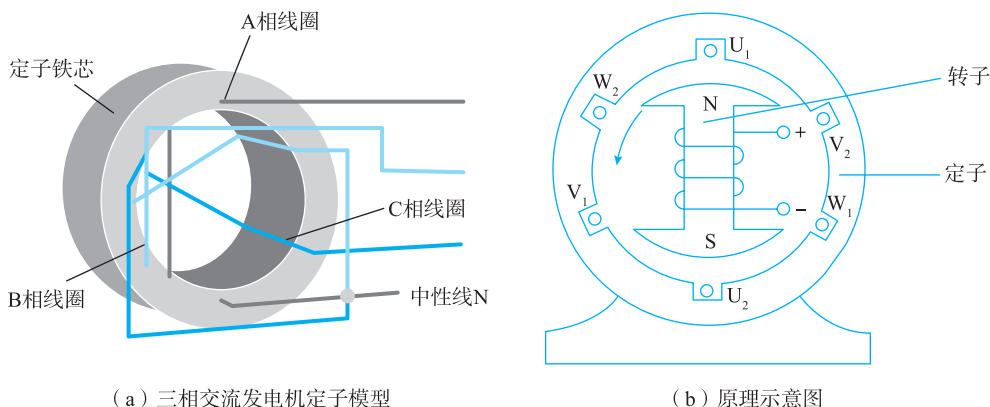


图 2-4-1 三相交流发电机

（二）三相交流电动势

三相绕组中产生的三相对称电动势的瞬时值分别表示为

$$\begin{cases} e_U = E_m \sin \omega t \\ e_V = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_W = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (2-4-1)$$

规定三相电动势的正方向是从绕组的末端→首端。若某一时刻 e 的数值为负, 则说明其方向是从首端→末端。它们的波形图及相量图如图 2-4-2 所示。

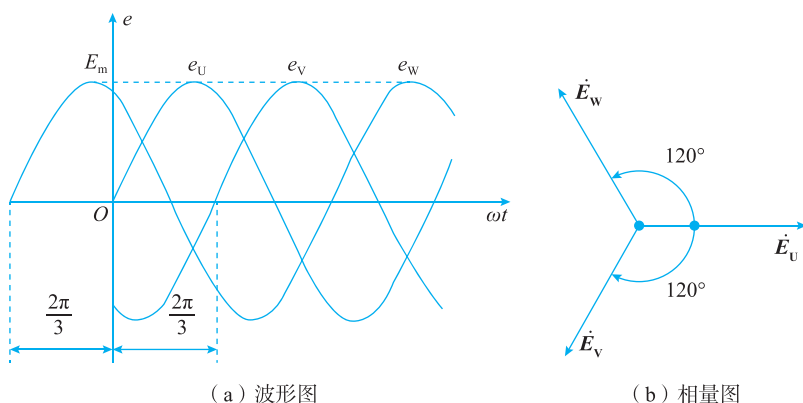


图 2-4-2 三相对称电动势的波形图和相量图

三相电动势的相量式为

$$\begin{cases} \dot{E}_U = E \angle 0^\circ \\ \dot{E}_V = E \angle -120^\circ \\ \dot{E}_W = E \angle 120^\circ \end{cases} \quad (2-4-2)$$

由上述内容可知, 三相电动势的特征为幅值相等、频率相同、相位互差 120° 。

通常把三相交流电到达正的最大值(或负最大值)的先后次序称为相序。例如上述的三相电动势依次滞后 120° , 其相序为 $U \rightarrow V \rightarrow W$ (顺相序); 反之为逆相序。电力系统通常用不同的颜色来区别电源的 U 、 V 、 W 三相, 黄色表示 U 相, 绿色表示 V 相, 红色表示 W 相。

二、三相电源的连接

三相发电机的三相绕组通常并不单独对外供电, 而是按照一定的方式连接在一起同时对外供电的, 三相电源常见的连接方式有星形(Y)连接和三角形(Δ)连接。

(一) 三相电源的星形连接

在集中供电方式下, 为了提高可靠性, 发电机三相绕组通常连接成星形, 即把三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连在一起, 构成星形连接, 如图 2-4-3 (a) 所示。连接 3 个末端的点称为中性点或零点, 用 N 表示。由 3 个电源绕组的首端 U_1 、 V_1 、 W_1 引出的 3 根输电线称为相线, 俗称火线。从中性点引出的输电线称为中性线或零线。这种采用 3 条相线和



1 条中性线组成的供电系统称为三相四线制供电系统，如图 2-4-3 (b) 所示。

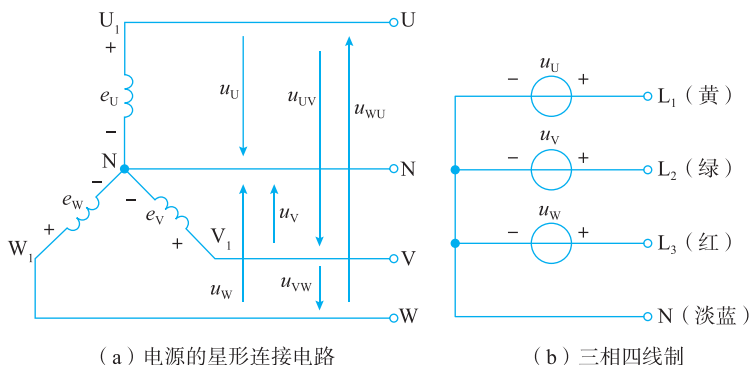


图 2-4-3 三相电源的星形连接

三相四线制供电系统可输送两种电压，分别为相电压 U_p 和线电压 U_L ，相电压 U_p 是指相线与中性线之间的电压，线电压 U_L 是指相线与相线之间的电压。各电压的参考方向规定如图 2-4-3 (b) 中所示，相电压的参考方向为绕组的始端指向末端（中性点），线电压的参考方向是用双下标来表示的。

线电压与相电压的相量图如图 2-4-4 所示，相电压用 $\dot{U}_U$ 、 $\dot{U}_V$ 、 $\dot{U}_W$ 表示，线电压用 $\dot{U}_{UV}$ 、 $\dot{U}_{VW}$ 、 $\dot{U}_{WU}$ 表示。各相电压和线电压之间的关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{UV} = \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{VW} = \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{WU} = \dot{U}_W - \dot{U}_U \end{cases} \quad (2-4-3)$$

由于三相电动势是对称的，故相电压也是对称的，相电压的相量式为

$$\begin{cases} \dot{U}_U = U_p \angle 0^\circ \\ \dot{U}_V = U_p \angle -120^\circ \\ \dot{U}_W = U_p \angle 120^\circ \end{cases} \quad (2-4-4)$$

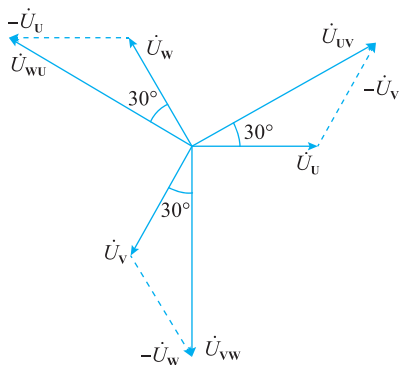


图 2-4-4 线电压与相电压的相量图

又因线电压也是对称的，在相位上比相应的相电压超前 30° ，故相电压与线电压在数

量关系上存在

$$U_L = \sqrt{3}U_p \quad (2-4-5)$$

【提示】电力电网的低压配电系统通常采用三相四线制供电方式，其中相电压 220 V、线电压 380 V，以满足不同用户的需要。

想一想



生活中哪些电器用相电压，哪些电器用线电压？家庭中的插座是什么样子的？每个插孔代表什么？

（二）三相电源的三角形连接

如果三相电源的每组绕组首尾依次相连，则称为三相电源的三角形连接。由于三角形连接的绕组容易形成环流，导致绕组过热，甚至烧毁，因此，三相发电机一般不采用三角形连接。若采用三角形连接，则要求连线前必须检查三相绕组的对称性及连接顺序。

三、三相负载的连接

日常生活中我们使用的大多数电器产品像白炽灯、电冰箱等，都使用单相交流电，这种负载称为单相负载，它接在三相电源的任一相上都能工作。还有一类负载，它必须接在三相电源上才能正常工作，如三相异步电动机等，这种负载称为三相负载。

三相负载可分为对称三相负载和不对称三相负载。各相负载的大小和性质相同，阻抗相等的叫对称三相负载，否则就叫不对称三相负载，三相负载的连接也有星形（Y）连接和三角形（Δ）连接两种。

（一）三相负载的星形连接

如图 2-4-5 所示，若将三相负载的始端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别接在电源的三根相线上，将各相负载的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连接在一起接中性线，这种连接方式叫作三相负载的星形连接。

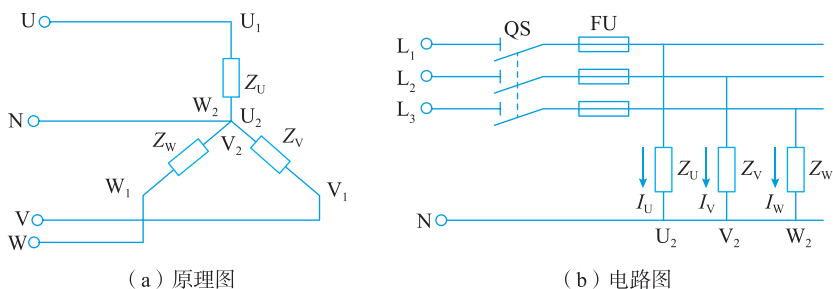


图 2-4-5 三相负载星形连接



1. 负载的相电压和线电压

负载的相电压 U_Y 。负载作 Y 形接法时，加在负载两端的电压称为负载的相电压。每相负载的相电压有效值都等于电源的相电压，即 $U_Y = U_P$ ，但各相的相电压的相位各差了 120° 。

负载的线电压就是电源的线电压 U_L 。各线电压大小相等，相位各差 120° ，且超前相应的相电压 30° 。

2. 负载的相电流和线电流

相电流指流过每一相负载的电流，用 I_P 表示。

若三相负载是对称的， $Z_U = Z_V = Z_W = Z$ ，则相电流也对称（即大小相等，频率相同，相位各差 120° ），其相量式为 $\dot{I}_{UN} = I_P \angle 0^\circ$ 、 $\dot{I}_{VN} = I_P \angle -120^\circ$ 、 $\dot{I}_{WN} = I_P \angle 120^\circ$ 。每一相的相电流有效值均为

$$I_P = \frac{U_P}{Z} \quad (2-4-6)$$

线电流是指流过火线中的电流（ I_U 、 I_V 、 I_W ），用 I_L 表示。 $I_P = I_L$ ，可以看出，三相负载对称时，线电流也是对称的。

想一想



你能根据基尔霍夫电流定律计算出流过中线的电流吗？当负载对称时，中线上有电流吗？中线可以去掉吗？当负载不对称时，中线上有无电流？中线的作用是什么？

3. 中线的电流及作用

中线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W \quad (2-4-7)$$

当负载对称（如三相电机、三相电炉）时，负载的相电流是对称的，中线电流 $I_N = 0$ ，三相四线制可以取消中线变成三相三线制。

当负载不对称时，三个负载的相电流则不再对称，三个相电流的“和矢量”不为零，即中线电流 $I_N \neq 0$ ，此时，中线是必需的。中线的作用是保证星形连接负载的相电压等于电源的相电压。

【提示】根据中线的作用，中线在安装的过程中要求必须牢固，不允许在中线上安装开关或熔丝。

（二）三相负载的三角形连接

如图 2-4-6 所示,把三相负载分别接在三相交流电源的两根相线之间的连接方法称为三角形 (Δ) 连接。

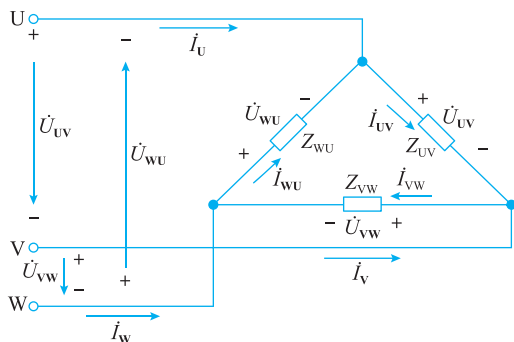


图 2-4-6 三相负载三角形连接

1. 负载的相电压

负载的相电压与电源的线电压相等。因此,无论负载对称与否,其相电压总是对称的:

$$\dot{U}_P = \dot{U}_L \quad (2-4-8)$$

2. 负载的相电流和线电流

当三相负载对称时,相电流也是对称的,即 $I_P = I_{UV} = I_{VW} = I_{WU} = U_L/Z$ 。

$$\dot{I}_{UV} = I_P \angle 0^\circ \quad \dot{I}_{UW} = I_P \angle -120^\circ \quad \dot{I}_{WU} = I_P \angle 120^\circ \quad (2-4-9)$$

假设三相负载为对称性的感性负载,每相负载上的电流均滞后对应的电压 φ 角,三个线电流也是对称的,线电流相位滞后于相应的相电流 30° ,数值上:

$$I_L = \sqrt{3}I_P \quad (2-4-10)$$

四、三相电路的功率

功率在用电设备中是一个基本参数,明确三相电路功率的概念和测量方法具有十分重要的意义。

（一）三相负载总的有功功率

三相交流电路可以看作三个单相交流电路组成的电路,因此,三相负载总的有功功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2-4-11)$$

如果三相负载对称,则不论负载为星形连接还是三角形连接,都有



$$P = 3U_p I_p \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi \quad (2-4-12)$$

(二) 三相负载总的无功功率

总无功功率也等于三相负载的无功功率之和，即

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2-4-13)$$

如果三相负载对称，则不论负载为星形连接还是三角形连接，都有

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi \quad (2-4-14)$$

(三) 三相电路的视在功率

三相电路的视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_p I_p = \sqrt{3} U_L I_L \quad (2-4-15)$$

应当注意，在电源电压不变的情况下，同一个负载星形连接和三角形连接时所消耗的功率是不同的，三角形连接时的功率是星形连接时的三倍，即

$$P_{\Delta} = 3P_Y \quad (2-4-16)$$



任务实施

三相负载的星形连接



环境准备

在实训之前,要先熟悉三相交流电路的基本知识,了解三相电路的供电方式,区分对称三相负载和不对称三相负载,了解三相调压器的作用及使用方法,进一步熟悉电压表及电流表的使用方法。三相电路中的电源和负载有对称和不对称两种情况,本实训仅研究三相电源对称情况下负载作星形连接的工作情况。用三个相同的白炽灯作为三相负载构成三相负载星形连接,其原理如图 2-4-7 所示。

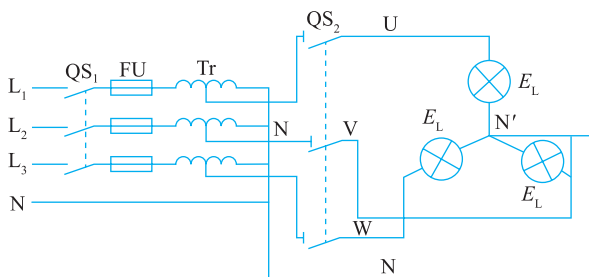


图 2-4-7 三相负载星形连接的原理图



实施步骤

- (1) 按图所示电路原理接线。
- (2) 检查接线无误后,将三相调压器手柄旋到输出电压为零的位置,闭合三相电源闸刀开关 QS_1 和 QS_2 。
- (3) 调节三相调压器的输出手柄,使输出的相电压 $U_p = 220\text{ V}$ 。
- (4) 用电压表分别测量负载对称(采用三个均为 60 W 的灯泡作为对称负载)、负载不对称(采用三个分别为 25 W、40 W、60 W 的灯泡作为不对称负载)两种情况下加在各个灯泡上的电压及中性点间的电压,观察灯泡的发光情况(正常、过亮、过暗、不亮),并列表进行记录。
- (5) 拆除中线后,重复步骤(4)的过程,并进行记录。
- (6) 将调压器输出电压降为零,切断三相电源开关。



任务评价

[illegible]

“大国工匠年度人物”崔兴国：一颗匠心 万千精彩

崔兴国，中共党员，1991年参加工作，第十三届全国人大代表，大国工匠年度人物，全国技术能手，享受国务院政府特殊津贴，曾获全国装备制造业调整和振兴规划立功竞赛先进个人、全国机械工业质量模范、四川质量奖提名奖、四川工匠、东方电气集团劳动模范、东方电气集团首席技师、德阳市首席技师等荣誉称号。

匠心筑梦 登顶水电“珠峰”的奋斗者

三十余载春秋，崔兴国扎根一线，砥砺耕耘，把汗水挥洒在三峡、溪洛渡、白鹤滩等重大水电工程中，参与并见证了中国水电技术从“跟跑”“并跑”到“领跑”的跨越式发展。

三峡工程是饱含中华民族百年情结的伟大工程。2003年8月，重量超过450吨的三峡左岸首台转轮的平衡任务交到崔兴国手中。面临着技术要求高和任务周期短的双重压力，崔兴国带领团队顶着酷暑，七天七夜连续攻关，最终攻克了转轮静平衡难题，圆满完成了三峡首台转轮装配任务。

白鹤滩机组代表着水电装备制造的“珠穆朗玛峰”。为了完成转轮静平衡任务，实现转轮静平衡试验“零残余”目标，崔兴国充分发挥多年来积累的大型水轮机装配经验，采用精准导向工装和扶正调整技术，突破了一系列难题。白鹤滩巨型转轮在“零配重”的基础上实现了“零残余”目标，各项参数指标优于精品标准，引领世界巨型水电进入了摆度“个位数”时代。白鹤滩首批机组于2021年6月28日投产发电。

在不断向常规水轮发电机组的“珠峰”攀登的同时，崔兴国也带领团队实现了抽水蓄能机组装配技术的行业领先。长龙山抽水蓄能电站属于超高水头、高转速、大容量抽水蓄能电站，而球阀是抽水蓄能机组的核心部件，也是研制难度最高的部件，对密封的要求非常高，行业基本标准1分钟允许有60毫升的渗漏量。崔兴国经过大量试验，通过多种装配方法的创新和应用，做到了长龙山球阀的“四零渗漏”，金属之间的密封达到“滴水不漏”，同时，原来8个月的装配周期压缩到了2个月。

匠心独运 树立行业标杆的开拓者

“求实、创新、人和、图强”的企业精神磨砺了崔兴国勇于跨越、追求卓越的秉性，锻造了崔兴国敢为人先、砥砺创新的特质。崔兴国在攻克世界单机容量最大的百万千瓦巨型水轮机、国内700米水头段大型水泵水轮机、全球直径最大的17万千瓦轴流转桨式水轮机等发电设备核心部件装配试验难关的过程中，取得了一项又一项技术突破，填补了一个又一个行业空白。

崔兴国自主设计制造的“通用可调节式”贯流式机组装配工装，得到了广泛推广和应用，使所有产出的贯流式机组导水机构同心度、水平度、导叶开档尺寸及一次交检合格率大幅提高。崔兴国先后完成超高水头抽水蓄能机组球阀装配关键技术、球阀压力试验集成



控制技术、大型水轮机静平衡关键技术开发应用等 22 个创新攻关项目，获得专利授权 62 项，为技术进步提供了强劲动力。

匠心传承 身为范育桃李的传道者

对崔兴国而言，工匠精神不只体现在对技术创新无止境的追求中，让技艺与匠心代代传承，培养出一批高素质技能人才，更是崔兴国几十年如一日的热忱与执着。

当年，刚参加工作的崔兴国用了三年时间跟着不同的师傅干遍了水轮机所有装配部套的分装。崔兴国说，“每一个有长处且愿意帮助你的人，无关年龄，都是自己的师父。回忆往昔岁月，师父们虽然沉默少言，但都以身作则，默默用行动传道授业。”如今，培植年轻一代骨干力量，崔兴国也承载着“师父”二字的重量。

30 余年来，崔兴国毫无保留地将自己掌握的知识技能和诀窍传授给团队成员和身边的青年人。谈起自己的徒弟，崔兴国的脸上总是泛起爱意和希望的光芒。崔兴国结合自己的工作经验和成长经历，总结出“以干代练”“交叉带徒”“互为师徒”等培养方式。在崔兴国的团队，所有成员都会参与交班时的集体讨论，崔兴国谓之“沉浸式教学”，深浅对错并不重要，真正倡导的是参与和思考。

面对无数的荣誉和赞美，崔兴国都淡然处之。崔兴国早已将个人融入国家水电事业发展的长河之中，崔兴国曾说：“我们赶上了中国水电事业发展的好时代，更因为企业的信任和团队的力量，才取得今天的成绩。”

崔兴国制定的“球阀制造专项计划”和“转轮制造专项计划”将球阀和转轮的产量提到了新高。面对新的挑战，崔兴国目光坚定，胸有成竹。“我们要通过智能制造手段的应用，推动产品实现方式再创新，进一步消除产品制造的堵点难点，形成质量和效率的良性互动。”

课后
习题

- 在交流电路中，电感的感抗等于（ ）。
A. $X_L = \omega L$ B. $X_L = 1/(\omega L)$ C. $X_L = L$ D. $X_L = \omega$
- 一个电热器接在 10 V 的直流电源上，产生的功率为 P 。把它改接在正弦交流电源上，使其产生的功率为 $P/2$ ，则正弦交流电源电压的最大值为（ ）。
A. 7.07 V B. 5 V C. 14 V D. 10 V
- 三相四线制中，中线的作用是（ ）。
A. 保证三相负载对称 B. 保证三相功率对称
C. 保证三相电压对称 D. 保证三相电流对称
- 我国工业交流电采用的标准频率是_____ Hz。
- 正弦交流电的三要素是_____、_____和_____。
- 由发电机绕组首端引出的输电线称为_____，由电源绕组尾端中性点引出的输电线称为_____。
- 三相电源的连接方式有_____和_____。
- 三相四线制供电系统中，负载可从电源获取_____和_____两种不同的电压值。
- 把 $C = 10 \mu\text{F}$ 的电容器接到 $u = 120\sqrt{2} \sin(100\pi t - 60^\circ)$ V 电源上，试求：电容的容抗、电流的有效值和电路的无功功率。
- 试述提高功率因数的意义和方法。

