



国家电网公司  
STATE GRID  
CORPORATION OF CHINA

# 国家电网公司

# 继电保护培训教材

国家电力调度通信中心 编著

## (上册)



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn



国家电网公司  
STATE GRID  
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

# 继电保护培训教材

国家电力调度通信中心 编著

(上册)



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是国家电网继电保护培训教材，共分八章，内容包括：专业基础理论、电力系统运行及故障分析、输电线路保护及重合闸、元件保护、电力系统安全自动装置、二次回路、继电保护整定计算基础、继电保护相关知识，另外还有事故分析案例作为附录。

本书可作为从事电力系统继电保护工作的运行、维护、管理、设计、研发和教学人员的专业参考书和培训教材，也可供相关专业技术人员和高校电力专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

国家电网公司继电保护培训教材/国家电力调度通信中心编著.  
北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8389-7

I. 国… II. 国… III. 电力系统-继电保护-技术培训-教材  
IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 009758 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009年4月第一版 2009年5月北京第三次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 51.25印张 1276千字  
印数6001—9000册 上、下册定价共 150.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 《国家电网公司继电保护培训教材》

## 编 委 会

主 任：张智刚

副主任：李明节 陈国平 王玉玲

主 编：高中德 舒治淮 王德林

编 委：许正亚 支叶青 周丽芳 王 芊 傅洪全

胡晓丽 姜 瑾 刘正梅 曹 良 廖小君

杨先义 薛 峰 陈建民 孙集伟 韩学军

邱金辉 严国平 裘愉涛 张 洪 姚 旭

徐宇新 王 伟 倪腊琴

# 前 言

本书是在国家电网公司《继电保护岗位技能培训大纲》基础上，编写的一本继电保护岗位技能培训教材。全书是在国家电网公司领导亲切关怀下，在国家电力调度通信中心继电保护处直接主持领导下完成的。在编写过程中得到了华东网调、华北网调、辽宁省调、江苏省调、浙江省调、河北省调、甘肃省调、湖南省调、四川省调、江苏省电力公司生产技能培训中心、四川省电力培训中心、常州供电公司、苏州供电公司、盐城供电公司和南瑞继保电气有限公司等单位的大力支持与帮助。

本书在编写中尽力做到由浅入深、由易到难；各公式的推导严密完整，物理概念的阐述清晰准确。力求使具有专科及以上学历的电力系统专业毕业的学生能够自学并且学懂。

理论与实践紧密结合是本书的一大特点。在理论上本书有一定的广度与深度。本书除用较多篇幅解释了继电保护的基础理论外，还论述了继电保护理论研究中的一些新成果，分析并收集了继电保护研发中的一些新技术。同时考虑到继电保护是一门实践性很强的应用学科，所有的理论分析都应该落实到应用的实际。因此本书还用了大量篇幅论述了各种保护、安全自动装置的具体实现方法及其在使用中的大量问题。同时本书还用较多篇幅论述了继电保护工作者在现场工作中遇到的很多实际问题以及应该掌握的岗位技能知识。所以本书可以作为从事电力系统继电保护工作的运行、维护、管理、设计、研发和教学人员的专业参考书和培训教材以及相关专业技术人员的参考工具书。同时本书也可以作为高等学校电力系统专业师生的教学、研究参考书。

本书第一章由支叶青、周丽芳编写；第二章由许正亚编写；第三章由高中德、王芊编写；第四章由傅洪全、胡晓丽、周丽芳编写；第五章由姜瑾、刘正梅编写；第六章由曹良编写；第七章由廖小君编写；第八章由廖小君、杨先义编写；附录由薛峰编写。全书由高中德统稿。王德林、陈健民、孙集伟、韩学军、邱金辉、严国平、裘愉涛、张洪、姚旭、徐宇新、王伟、倪腊琴等分别对各章节进行了审核并参加了全书的评审工作。

对本书所引用的公开发表的国内外有关研究成果的作者、各制造厂家生产装置中公开发表的技术成果的作者，编者表示衷心的感谢！

编著者

2009年2月

# 目 录

前言

## 上 册

第一章 专业基础理论 .....	(1)
第一节 单相交流电路分析与计算 .....	(1)
一、正弦交流电的基本概念 (1) 二、正弦交流电的相量表示法 (3) 三、单 一元件的交流电路 (4) 四、 <i>RLC</i> 串并联交流电路 (9) 五、交流电路的功率 及功率因数的提高 (13)	
第二节 三相交流电路分析与计算 .....	(16)
一、对称三相交流电源 (16) 二、三相交流电源的连接 (17) 三、三相交流 电路分析 (20)	
第三节 非正弦周期电流电路 .....	(25)
一、非正弦周期信号 (25) 二、非正弦周期函数的分解 (27) 三、非正弦周 期量的有效值、平均值及电路的平均功率 (27) 四、对称三相电路中的高次 谐波 (29)	
第四节 线性动态电路的时域分析 .....	(32)
一、换路定律及初始值计算 (32) 二、 <i>RC</i> 串联电路的过渡过程 (33) 三、 <i>RL</i> 串联电路的过渡过程 (35) 四、一阶电路的三要素法 (38) 五、 <i>RL</i> 串联电路 的正弦响应 (39)	
第五节 电磁与磁路分析计算 .....	(40)
一、磁场及基本物理量 (40) 二、铁磁物质的磁化 (42) 三、磁路及磁路定 律 (45) 四、交流铁芯线圈 (47)	
第六节 微机保护基础 .....	(50)
一、简单逻辑元件介绍 (50) 二、微机保护装置硬件系统 (52) 三、微机保 护算法介绍 (64)	
第二章 电力系统运行及故障分析 .....	(74)
第一节 电力系统正常运行时的电压、电流及功率传输 .....	(74)
一、正常运行时的电流、 <i>K</i> 点电压 (74) 二、功率传输 (75) 三、电压降落 与电压损失 (77) 四、传输功率与电流、电压间的相量关系 (78) 五、测量 阻抗 (79)	
第二节 标幺制 .....	(79)
一、标幺值 (79) 二、三相系统基准值选取 (80) 三、三相系统中标幺值计 算特点 (81)	
第三节 对称分量法应用 .....	(82)

第四节	电力系统各元件序阻抗及其相应等值电路 .....	(84)
一、	同步发电机 (84) 二、变压器 (85) 三、输电线路 (94) 四、电抗器 (100) 五、异步电动机 (101) 六、综合负荷 (103)	
第五节	电力系统横向短路故障分析 .....	(103)
一、	三相短路故障分析 (103) 二、两相短路故障分析 (107) 三、单相接地故障分析 (113) 四、两相接地短路故障分析 (129) 五、正序等效定则 (138)	
第六节	三绕组自耦变压器接地中性点电流 .....	(139)
一、	自耦变电器中压侧接地故障 (139) 二、自耦变压器高压侧接地故障 (140)	
第七节	电力系统纵向不对称故障分析 .....	(141)
一、	单相断线分析 (141) 二、两相断线分析 (149)	
第八节	不对称短路故障时 YN, d 接线变压器两侧电流、电压关系 .....	(152)
一、	基本概念 (152) 二、YN, d11 接线变压器 d 侧 ab 相短路 (153) 三、YN 侧 B 相接地短路 (155) 四、YN 侧 AC 相短路 (157)	
第九节	电力系统稳定和电力系统振荡 .....	(159)
一、	电力系统稳定概念 (159) 二、提高电力系统暂态稳定水平的主要措施 (163)	
三、	电力系统振荡时电气量特点 (167)	
<b>第三章</b>	<b>输电线路保护及重合闸 .....</b>	<b>(173)</b>
第一节	零序电流方向保护 .....	(173)
一、	零序电流方向保护的基本原理 (173) 二、零序方向继电器的原理、实现方法、性能评述 (176) 三、零序方向继电器在非全相运行期间和在有串联补偿电容线路上的动作行为分析 (179) 四、零序电流和零序电压的获取 (182)	
第二节	距离保护 .....	(183)
一、	距离保护的作用原理和时限特性 (183) 二、短路时保护安装处电压计算的一般公式及阻抗继电器的接线方式 (184) 三、过渡电阻产生的附加阻抗及对阻抗继电器工作的影响 (187) 四、阻抗继电器的工作电压 (193) 五、阻抗继电器的动作方程和动作特性 (196) 六、以正序电压为极化电压的阻抗继电器 (205) 七、方向阻抗继电器的暂态动作特性 (212) 八、工频变化量的阻抗继电器 (215) 九、分支电流 (助增电流和外汲电流) 对阻抗继电器工作的影响 (224) 十、交流失压对距离保护工作的影响以及断线闭锁原理 (226) 十一、系统振荡对距离保护的影响及振荡闭锁原理 (229) 十二、YN, d11 接线变压器三角侧短路, 星侧阻抗继电器的测量阻抗 (252) 十三、阻抗继电器在有串联补偿电容线路上发生短路时的动作行为分析及其对策 (255)	
第三节	纵联保护 .....	(262)
一、	概述 (262) 二、闭锁式纵联方向保护 (265) 三、闭锁式纵联距离保护 (275) 四、超范围与欠范围允许式的纵联保护 (278) 五、光纤纵联电流差动保护 (284) 六、工频变化量方向继电器 (298) 七、基于暂态分量的能量积	

分方向元件 (305) 八、平行线路间互感对纵联零序方向保护的影响 (307)	
第四节 自动重合闸 .....	(310)
一、自动重合闸的作用及应用 (310) 二、自动重合闸方式及动作过程 (311)	
三、自动重合闸的起动方式 (312) 四、自动重合闸动作时间整定中应考虑的问题 (313)	
五、双侧电源线路三相跳闸后的重合闸检查条件 (315) 六、重合闸的前加速和后加速 (317)	
七、重合闸的充电与闭锁 (318) 八、3/2 接线方式对重合闸和断路器失灵保护的要求 (320)	
九、220 kV 及以上电压等级同杆并架双回线路的按相自动重合闸方式 (321)	
第五节 选相元件 .....	(324)
一、概述 (324) 二、两相电流差突变量选相元件 (325)	
三、工作电压突变量选相元件 (329) 四、比较零序电流与 A 相负序电流的相位结合阻抗元件动作行为的选相元件 (332)	
五、低电压选相元件 (334)	
第六节 过电压保护及远方跳闸保护装置 .....	(334)
一、概述 (334) 二、超高压远距离输电线路产生过电压的机理 (335)	
三、工频过电压保护和过电压起动远跳 (349) 四、远方跳闸保护装置 (349)	
第七节 继电保护通道 .....	(352)
一、纵联保护的载波通道及高频通道损耗简介 (352) 二、继电保护专用收发信机 (367)	
三、光纤通道与接口 (371)	
参考文献 .....	(387)

## 下 册

第四章 元件保护 .....	(389)
第一节 变压器保护 .....	(389)
一、变压器的故障和保护配置 (389) 二、纵差动保护 (390)	
三、变压器纵差动保护需要解决的问题 (398) 四、其他差动保护 (407)	
五、复合电压闭锁的 (方向) 过电流保护 (411) 六、零序电流 (方向) 保护 (416)	
七、阻抗保护 (419) 八、变压器过励磁保护 (429)	
九、变压器中性点间隙保护和零序电压保护 (432)	
十、非电量保护 (434)	
第二节 母线保护 .....	(435)
一、概述 (435) 二、母线差动保护 (438)	
三、母联死区保护、母联失灵保护、母联充电保护、母联过流保护 (451)	
四、非全相运行保护 (456) 五、断路器失灵保护 (457)	
第三节 断路器保护 .....	(461)
一、断路器保护装置的配置与应用范围 (461) 二、3/2 接线方式的断路器失灵保护 (461)	
三、3/2 接线方式的自动重合闸 (463) 四、充电保护 (465)	
五、死区保护 (466) 六、断路器三相不一致保护 (466)	
七、瞬时跟跳回路 (466) 八、交流电压断线判别 (466)	
九、跳闸位置异常告警 (466)	



第四节  并联电抗器保护 .....	(467)
一、并联电抗器的纵差保护和电流速断保护 (467) 二、并联电抗器匝间短路和单相接地短路保护 (468) 三、主电抗器的过负荷保护及过电流、零序电流后备保护 (472) 四、中性点电抗器的过电流保护、过负荷保护 (473) 五、干式空心并联电抗器的保护 (473)	
第五节  并联电容器组保护 .....	(474)
一、电容器组与断路器之间连接线、电容器组内部连线上的相间短路故障保护 (474) 二、电容器内部故障保护 (474) 三、多台电容器切除后的过电压保护 (475) 四、电容器组为双星形接线时常用中性线不平衡电流保护 (476) 五、电容器组的过负荷保护 (476) 六、电容器组的过电压保护 (476) 七、电容器组的低电压保护 (477) 八、其他保护 (477) 九、电容器组在系统运行中异常问题 (478)	
参考文献 .....	(478)
<b>第五章  电力系统安全自动装置 .....</b>	<b>(479)</b>
第一节  备用电源自动投入装置 .....	(479)
一、概述 (479) 二、对备用电源自动投入装置的要求 (479) 三、微机式备用电源自动投入装置 (480)	
第二节  微机型自动按频率减负荷装置 .....	(488)
一、概述 (488) 二、电力系统低频运行的危害 (488) 三、限制频率下降的措施 (489) 四、电力系统负荷的静态频率特性 (489) 五、电力系统频率动态特性 (490) 六、自动按频率减负荷装置 (491)	
第三节  电力系统安全稳定控制装置 .....	(497)
一、电力系统稳定控制的概念 (497) 二、电力系统稳定控制的三道防线 (497) 三、电力系统紧急控制的类型及其作用 (498) 四、分布式稳定控制装置 (499)	
第四节  故障录波器及故障信息管理系统 .....	(500)
一、故障录波器 (500) 二、故障信息管理系统概述 (503)	
参考文献 .....	(507)
<b>第六章  二次回路 .....</b>	<b>(509)</b>
第一节  概述 .....	(509)
第二节  二次回路的接线图 .....	(509)
一、二次回路图纸的分类 (509) 二、二次回路的读图方法 (513) 三、二次回路标号 (513) 四、二次回路连接导线截面的选择 (521)	
第三节  继电保护用电流互感器 .....	(521)
一、电流互感器的一次参数 (522) 二、电流互感器的二次额定电流 (522) 三、电流互感器的额定输出容量 (522) 四、电流互感器的 10% 误差校核 (523) 五、电流互感器的其他参数 (526)	
第四节  继电保护用电压互感器 .....	(528)

- 一、电压互感器的一次参数 (528)
- 二、电压互感器的二次额定电压 (529)
- 三、电流互感器的额定输出容量 (529)
- 四、电压互感器的误差 (529)
- 五、电压互感器的型式 (530)

第五节 电流及电压的二次回路 ..... (530)

- 一、电流、电压互感器接用位置的选择 (530)
- 二、常用电流、电压互感器二次回路接线方式 (532)

第六节 控制及信号的二次回路 ..... (547)

- 一、控制回路 (547)
- 二、信号回路 (559)

第七节 装置间二次回路的连接 ..... (566)

- 一、保护装置双重化的接线 (566)
- 二、保护的跳闸回路 (569)
- 三、母差保护的跳闸回路 (571)
- 四、断路器失灵保护的跳闸回路 (572)
- 五、纵联保护的切换回路 (573)
- 六、保护的远方跳闸 (575)
- 七、三相不一致保护的跳闸回路 (575)
- 八、开关量输入及输出部分 (576)
- 九、继电保护通信接口 (577)
- 十、时钟回路 (577)
- 十一、光纤通信及通道连接 (577)

第八节 直流电源系统 ..... (578)

- 一、直流系统的构成及要求 (578)
- 二、直流系统的绝缘检测 (581)
- 三、直流系统接地位置的检查 (583)
- 四、直流系统的其他问题 (584)

第九节 保护装置及二次回路抗干扰 ..... (585)

- 一、干扰信号的分类 (586)
- 二、二次回路干扰电压的来源 (586)
- 三、二次回路的抗干扰措施 (589)

参考文献 ..... (595)

第七章 继电保护整定计算基础 ..... (596)

第一节 概述 ..... (596)

- 一、整定计算的目的及任务 (596)
- 二、整定计算的基本要求 (597)
- 三、整定计算的工作步骤 (600)
- 四、整定计算参数选择及计算 (600)
- 五、整定计算运行方式选择 (601)
- 六、整定计算的配合方法 (603)
- 七、整定计算相关技巧和应注意的问题 (614)
- 八、整定计算定值管理 (614)

第二节 电流电压保护整定计算 ..... (615)

- 一、概述 (615)
- 二、阶段式电流保护整定计算方法 (615)
- 三、阶段式电流电压保护整定计算方法 (617)
- 四、辅助定值整定及注意事项 (618)
- 五、整定计算案例 (619)

第三节 零序电流保护整定计算 ..... (622)

- 一、概述 (622)
- 二、阶段式零序电流保护整定计算方法 (623)
- 三、超高压电网零序电流保护整定计算方法 (625)
- 四、辅助定值整定及注意事项 (627)
- 五、整定计算案例 (627)

第四节 距离保护整定计算 ..... (631)

- 一、概述 (631)
- 二、接地距离保护整定计算方法 (632)
- 三、相间距离保护整定计算方法 (634)
- 四、辅助定值整定及注意事项 (634)
- 五、整定计算算

例 (636)	
第五节 纵联保护整定计算 .....	(640)
一、概述 (640) 二、纵联方向保护整定计算方法 (640) 三、纵联距离保护整定计算方法 (641) 四、纵联差动保护整定计算方法 (641) 五、辅助定值整定及注意事项 (641)	
第六节 变压器保护整定计算 .....	(642)
一、概述 (642) 二、变压器主保护整定计算方法 (642) 三、变压器后备保护整定计算 (646) 四、变压器其他相关保护整定 (650) 五、辅助定值及注意事项 (651) 六、整定计算算例 (653)	
第七节 母线及断路器失灵保护整定计算 .....	(657)
一、概述 (657) 二、母线差动保护整定计算方法 (657) 三、母联相关保护整定计算方法 (659) 四、断路器失灵保护整定计算方法 (659) 五、辅助定值及注意事项 (660)	
第八节 特殊运行方式下的影响 .....	(660)
一、概述 (660) 二、系统运行方式变化的处理 (660) 三、保护停运的处理 (660) 四、其他问题 (661)	
第九节 整定计算工具 .....	(663)
一、整定计算工具介绍 (663) 二、用计算机进行整定计算的核心工作原理 (667) 三、计算机整定使用中的相关问题 (668)	
参考文献 .....	(669)
<b>第八章 继电保护相关知识 .....</b>	<b>(671)</b>
第一节 一次设备基础知识 .....	(671)
一、变电站的主接线 (671) 二、变压器 (675) 三、断路器 (680) 四、隔离开关 (682) 五、互感器 (683) 六、电抗器 (686) 七、消弧线圈 (687) 八、防雷及接地装置 (688)	
第二节 变电运行及事故处理基础 .....	(689)
一、变电站倒闸操作概述 (689) 二、继电保护有关操作 (691) 三、事故处理的基本概念 (691)	
第三节 变电站综合自动化 .....	(692)
一、电力系统自动化的特点及功能 (692) 二、变电站综合自动化的结构形式 (693) 三、监控系统的基本功能及实现方法 (695) 四、数据通信技术 (710) 五、串行通信接口和现场总线技术 (717) 六、工业以太网 (723) 七、信道和传输介质 (729) 八、站内通信系统 (732) 九、提高通信可靠性的手段 (733) 十、数字化变电站 (736)	
参考文献 .....	(742)
<b>附录 事故分析案例 .....</b>	<b>(743)</b>
案例 1. 一起零序互感引起的平行双回线跳闸事故分析 .....	(743)

案例 2. 一起 220kV 线路保护异常跳闸的分析 .....	(747)
案例 3. 220kV 某变电站 1 号主变压器差动保护误动原因分析 .....	(750)
案例 4. 一起 220kV 变电站交流站用电全失事故 .....	(753)
案例 5. 防跳回路异常造成的事故 .....	(755)
案例 6. 辅助触点切断合闸电流引起干扰误跳三相 .....	(756)
案例 7. 220kV 线路单相故障误跳三相 .....	(758)
案例 8. 主变压器空投时差动保护误动 .....	(761)
案例 9. 寄生回路造成保护误动 .....	(763)
案例 10. 220kV 某站全站失电事故分析 .....	(765)
案例 11. 二次回路接线错误造成保护拒动 .....	(766)
案例 12. 500kV 某线短引线保护误动作原因分析 .....	(768)
案例 13. 电缆线间绝缘降低重瓦斯保护误跳闸 .....	(769)
案例 14. 变压器充电引起的母差误动事故 .....	(771)
案例 15. 一起试验引起的保护误动 .....	(774)
案例 16. 一起 500kV 母线失电事故分析 .....	(775)
案例 17. 同杆线路纵联零序方向保护误动分析及措施研究 .....	(780)
案例 18. 一起 500kV 双线误跳闸的事故分析 .....	(787)
案例 19. 一起保护误动引起的重大电网事故的分析 .....	(790)
案例 20. 某 220kV 变电站母线全停事故分析 .....	(792)

## 专业基础理论

## 第一节 单相交流电路分析与计算

## 一、正弦交流电的基本概念

大小和方向随时间作周期性变化,并在一周内平均值为零的电流、电压,称为交流电流和交流电压。随时间按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电。通常所说的交流电,若无特别说明都是指正弦交流电。正弦交流电流、电压都称为正弦量。

以电流为例,其波形如图 1-1 所示,其数学表达式为:

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1-1)$$

式中:  $i$  称为瞬时值;  $I_m$  称为最大值;  $\omega$  称为角频率;  $(\omega t + \theta)$  称为相位;  $\theta$  称为初相角。最大值、角频率和初相角是确定正弦交流电的三要素。

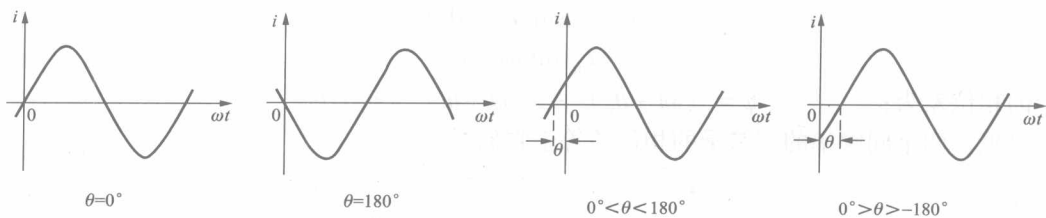


图 1-1 正弦交流电流波形

## (一) 交流电的周期、频率和角频率

交流电变化一周所需要的时间称为周期,用  $T$  表示,单位是秒 (s)。交流电在 1s 内重复变化的次数称为频率,用  $f$  表示,单位是赫兹 (Hz),简称赫。

周期和频率互为倒数关系,即 
$$f = \frac{1}{T} \quad (1-2)$$

交流电每变化一周就变化了  $2\pi$  弧度,即 
$$\omega T = 2\pi$$

角频率、周期及频率的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-3)$$

角频率  $\omega$  的单位是弧度/秒 (rad/s)。我国电力工业的标准频率为 50Hz,周期为 0.02s。

## (二) 交流电的瞬时值、最大值及有效值

交流电的瞬时值是随时间变化的,用小写字母表示,如  $i$ 、 $u$ 、 $e$ 。最大值又称幅值,虽然是一个不随时间变化的定值,但实际上是一个最大的瞬时值。最大值用带下标  $m$  的大写字母表示,如  $I_m$ 、 $U_m$ 、 $E_m$ 。瞬时值及幅值的大小难以用电工仪表测量。因此引入一个衡量交流电大小的量值,即交流电的有效值。

交流电有效值的定义是:在阻值相等的两个电路中,分别通入直流电流  $I$  和交流电流  $i$ ,如果在相同的时间内这两个电流所产生的热量相同,则交流电  $i$  的有效值就等于这个直流电

流  $I$  的大小。交流电的有效值用大写字母表示, 如  $I$ 、 $U$ 、 $E$ 。正弦交流电的有效值等于其最大值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍。即

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (1-4)$$

通常所说的交流电压和电流的大小(如 380V、5A)是指有效值, 一般交流测量仪表所指示电压或电流数值都是指交流电的有效值。

### (三) 交流电的相位、初相位及相位差

$(\omega t + \theta)$  反映了交流电随时间变化的角度, 称为相位角, 简称相位。在不同的时刻  $t$  就有不同的  $(\omega t + \theta)$  值。

$t=0$  时的相位  $\theta$  称为初相。初相与计时起点选择有关。计时起点选择不同, 初相也不同。我们知道, 正弦交流电在一周内瞬时值两次为零, 规定波形由负到正时与横轴的交点为零值点, 因此从波形图上看, 初相的大小就是零值点到坐标原点的距离。零点值位于坐标原点左边取“+”, 零点值位于坐标原点右边取“-”。常取初相  $|\theta| \leq \pi$ 。

任何两个频率相同的正弦量之间的相位关系可以通过它们的相位差来反映。设有两个同频率的正弦量, 其函数表达式分别为:

$$u = U_m \sin(\omega t + \theta_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta_i)$$

它们的相位差为:  $\varphi = (\omega t + \theta_u) - (\omega t + \theta_i) = \theta_u - \theta_i$

可见, 两个同频率的正弦量的相位差等于它们初相之差。

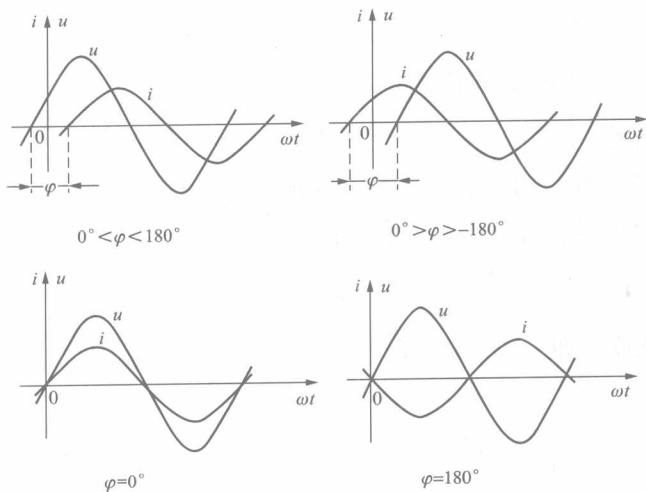


图 1-2 正弦量的相位关系

如果  $\theta_u > \theta_i$ ,  $\varphi > 0$ , 表示在相位上  $u$  超前  $i$   $\varphi$  角; 如果  $\theta_u < \theta_i$ ,  $\varphi < 0$ , 表示在相位上  $u$  滞后  $i$   $\varphi$  角; 如果  $\theta_u = \theta_i$ ,  $\varphi = 0$ , 表示  $u$  与  $i$  同相; 如果  $\theta_u - \theta_i = \pi$ , 表示  $u$  与  $i$  反相。同频率正弦量的相位关系如图 1-2 所示。

需要注意:

- 1) 初相与计时起点有关, 而相位差与计时起点无关。
- 2) 初相与相位差都与正弦量参考方向选择有关。
- 3) 同频率正弦量的相位差才有意义。

**例 1-1** 已知正弦电压  $u = 311 \sin\left(314t - \frac{\pi}{6}\right)$  V。试求: ① 电压的最大值、有效值、相位及初相; ② 角频率、频率及周期; ③  $t=0$  和  $t=0.01$ s 时电压的瞬时值各为多少? ④ 如有一正弦电流  $i = 7.07 \sin\left(314t + \frac{\pi}{3}\right)$  A, 那么电压与电流的相位差为多少?

解:

(1) 电压最大值  $U_m = 311(\text{V})$ ; 有效值  $U = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220(\text{V})$ ; 相位为  $(314t - \frac{\pi}{6})$ ; 初相  $\theta_u = -\frac{\pi}{6}$ 。

(2) 角频率  $\omega = 314\text{rad/s}$ ; 频率  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2\pi} = 50\text{Hz}$ ; 周期  $T = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$ 。

(3)  $t = 0\text{s}$  时电压的瞬时值为

$$u = 311 \sin\left(314 \times 0 - \frac{\pi}{6}\right) = 311 \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) = -155.5(\text{V})$$

$t = 0.01\text{s}$  时电压的瞬时值为:

$$u = 311 \sin\left(314 \times 0.01 - \frac{\pi}{6}\right) = 311 \sin\left(100\pi \times 0.01 - \frac{\pi}{6}\right) = 311 \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) = 155.5(\text{V})$$

(4) 电压与电流的相位差为

$$\varphi = \theta_u - \theta_i = -\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3} = -\frac{\pi}{2}, \text{电压滞后电流 } \frac{\pi}{2}; \text{或者说电流超前电压 } \frac{\pi}{2}。$$

## 二、正弦交流电的相量表示法

如前所述, 正弦交流电可以用三角函数式和波形图来表示。用三角函数式的优点是可以直接从函数式中看出正弦量的三要素; 波形图的优点是直接可以看到一个正弦量的变化情况。但在交流电路的分析和计算时, 经常需要将几个同频率的正弦量进行加减等运算, 用三角函数式和波形图就显得很麻烦。为了便于计算, 正弦交流电常用相量来表示, 这样可以把三角函数运算简化成复数形式的代数运算。

在直角坐标系中, 一个向量匀速旋转时在  $Y$  轴上的投影对应一条正弦函数。反之一个正弦量也可以用一个旋转向量来表示。用旋转向量来表示正弦量时, 向量的长度代表正弦量的最大值, 向量的初始位置与  $X$  轴正方向的夹角代表正弦量的初相, 向量旋转的角速度代表正弦量的角频率, 不同时刻  $t$  向量在  $Y$  轴上的投影代表正弦量的瞬时值。

在以后要讨论的交流电路中, 如果给定电源的频率一定, 那么电路中相应的电压、电流的频率都与电源频率相同, 即各正弦量都是同频率的。因此只需要画出一个能够反映正弦量大小和初相两个因素的向量, 就可以把这个正弦量完全表示出来。

以上分析说明, 正弦量可以用一个复平面中处于起始位置的固定向量来表示, 这个固定向量的长度可用有效值或最大值, 通常采用有效值。

需要注意的是正弦量本身是标量, 正弦量用向量来表示的是有效值和相位, 与表示力、电场强度、磁感应强度等的空间向量有本质的区别的。只是正弦量借助向量这个工具来进行分析计算, 为了加以区别, 所以我们把表示正弦量的向量称为相量。用大写字母加点作为符号, 如  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 、 $\dot{E}$ 。

在复平面内的相量也可以用复数表示。如图 1-3 中, 相量  $\dot{A}$  在实轴上的投影  $a$  称为复数的实部, 在虚轴上的投影  $b$  称为复数的虚部, 长度  $c$  称为复数的模, 与实轴之间的夹角  $\theta$  称为复数的幅角。

它们之间的关系是

$$a = c \cos \theta$$

$$b = c \sin \theta$$

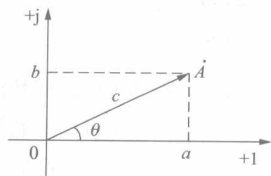


图 1-3 相量图

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \arctan \frac{b}{a}$$

由数学中的欧拉公式:

$$\cos\theta + j\sin\theta = e^{j\theta}$$

可得相量用复数表示的四种形式:

$$\dot{A} = a + jb = c(\cos\theta + j\sin\theta) = ce^{j\theta} = c \angle \theta^\circ \quad (1-5)$$

它们依次分别称为复数的代数式、三角式、指数式和极坐标式。复数在加减运算时宜采用代数式, 实部与实部相加减, 虚部与虚部相加减; 在乘除运算时宜采用指数式和极坐标式, 模与模相乘除, 幅角与幅角相加减。

**例 1-2** 已知  $i_1 = 28.28\sin(314t + 60^\circ)$  A,  $i_2 = 14.14\sin(314t - 45^\circ)$  A。

试求: ①  $i_1$ 、 $i_2$  的相量表示; ② 求  $i_1 + i_2$ ; ③ 画出相量图。

**解:** (1)  $i_1$ 、 $i_2$  的相量表示:

$$\dot{I}_1 = \frac{28.28}{\sqrt{2}} \angle +60^\circ = 20 \angle +60^\circ \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = \frac{14.14}{\sqrt{2}} \angle -45^\circ = 10 \angle -45^\circ \text{ A}$$

(2)  $i_1 + i_2$ :

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 &= 20 \angle +60^\circ + 10 \angle -45^\circ \\ &= 10 + j17.32 + 7.07 - j7.07 \\ &= 17.07 + j10.25 = 19.91 \angle +30.98^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

数学表达式为:

$$i_1 + i_2 = \sqrt{2} \times 19.91 \sin(314t + 30.98^\circ) \text{ A}$$

(3) 相量图如图 1-4 所示。

由相量图清晰可见各电流的相位差。

### 三、单一元件的交流电路

知道了交流电的基本概念及相量表示法后, 以下讨论只含一个理想无源元件、最简单的交流电路。

#### (一) 纯电阻电路

##### 1. 电压与电流的关系

在图 1-5 (a) 所示电路中, 设电压与电流参考方向一致, 选择电流为参考量, 即

$$i = I_m \sin\omega t$$

根据欧姆定律

$$u = Ri = RI_m \sin\omega t = U_m \sin\omega t$$

可见:

- 1) 电阻上电压和电流为同频率的正弦量;
- 2) 电阻上电压和电流相位一致;
- 3) 电压和电流的最大值和有效值关系分别为

$$U_m = RI_m; \quad U = RI \quad (1-6)$$

将电阻上电压和电流关系用相量来表示, 则

$$\dot{U}_m = R\dot{I}_m; \quad \dot{U} = R\dot{I} \quad (1-7)$$

波形图和相量图如图 1-5 (b)、(c) 所示。

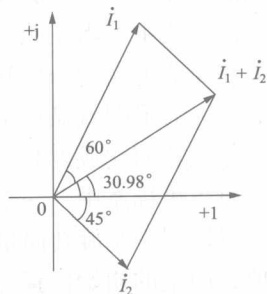


图 1-4 例 1-2 相量图



## 2. 功率关系

## (1) 瞬时功率。

在交流电路中电压和电流是随时间变化的, 所以电阻在任一时刻吸收和消耗的功率也是随时间变化的。电路在任一时刻吸收和消耗的功率称为瞬时功率, 等于电压电流瞬时值的乘积。用小写字母  $p$  表示。即

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = 2UI \sin^2 \omega t$$

波形如图 1-5 (d) 所示。从图可见, 瞬时功率在不断变化, 除过零点外其余各点均为正值。说明在交流电路中, 电阻是耗能元件。

## (2) 平均功率。

瞬时功率只能说明功率的变化情

况, 没有实际意义。工程上通常用它在在一个周期内的平均值来衡量交流电路功率的大小, 这个平均值称为平均功率, 又称有功功率, 用大写字母  $P$  表示。即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T 2UI \sin^2 \omega t dt = UI$$

因为  $U = RI$  的关系, 所以电阻的平均功率还可以采用下面公式计算:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 与直流电路电阻元件功率计算公式一样, 但要注意的是这里的电压  $U$  和电流  $I$  分别是电阻两端交流电压和电流的有效值。有功功率的单位是瓦 (W)。各种电气设备上的所标的功率就是平均功率 (有功功率)。

**例 1-3** 额定电压为 220V, 功率为 100W 的白炽灯接于 220V 的交流电源上。试求:

- ① 白炽灯的电阻;
- ② 如果电流的初相为  $30^\circ$ ,  $\omega = 314 \text{ rad/s}$ , 写出电流瞬时值函数表达式;
- ③ 如果每天使用 5 小时 (h), 试计算一个月 (以 30 天计) 所消耗的电能是多少?

**解:** (1) 白炽灯是电阻元件, 电阻  $R$  由式  $P = \frac{U^2}{R}$ , 可得

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$$

(2) 电流的有效值  $I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.45 \text{ A}$

电流瞬时值函数表达式  $i = \sqrt{2} \times 0.45 \sin (314t + 30^\circ) \text{ A}$

(3) 一个月所消耗的电能  $W = Pt = 100 \times 10^{-3} \times 5 \times 30 = 15 \text{ kWh}$

## (二) 纯电感电路

## 1. 电压与电流关系

电感元件如果通入交流电流, 由于电流的变化, 由电流建立的磁通也随之变化, 从而产生自感电动势, 在电感两端建立起自感电压。设电压与电流参考方向一致, 如图 1-6 (a)

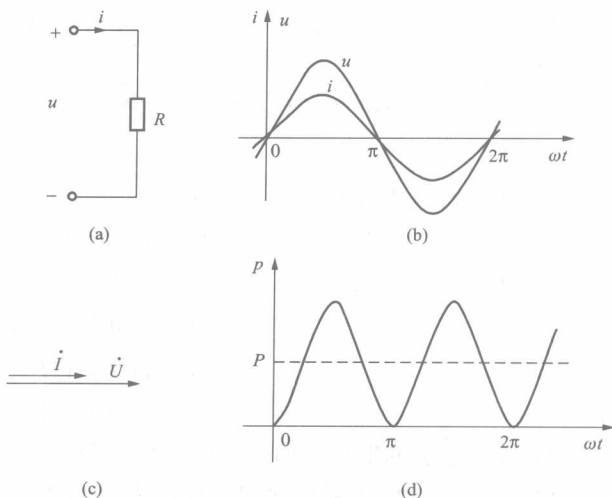


图 1-5 纯电阻电路

(a) 电路图; (b) 电压电流波形; (c) 相量图; (d) 功率波形