

电气安全技术手册

陆荣华 编著



中国建筑工业出版社



电气安全技术手册

陆荣华 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气安全技术手册/陆荣华编著. -北京:中国建筑工业出版社,1999

ISBN 7-112-03697-6

I. 电… II. 陆… III. 电气设备-安全技术-手册 IV. T
M08-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29251 号

本手册根据国家有关的规程、规范要求,对工矿企业供用电系统的安全要求,民用和公共建筑的电气安全要求,各种电气设备的设计、安装、验收、运行维护要求,包括防雷、接地技术等作了较全面的介绍。同时介绍了人身触电预防及触电救护、防止电气火灾和爆炸及静电安全、电磁场防护以及家用电器安全使用等知识,并简要地介绍了有关的电工技术基础理论。

全手册文字通俗,内容密切结合实际,是广大从事电气安全管理,电气设计、安装、验收及运行维护工作人员的一本实用工具书,也可作为大专院校、科研单位,电力及电气工程类专业广大师生和工程技术人员在工作和学习中参考。

电气安全技术手册

陆荣华 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印制厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:23 1/2 字数:606千字

1999年1月第一版 2000年1月第二次印刷

印数:3001—4500册 定价:30.00元

ISBN 7-112-03697-6

TU·2965(8996)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

电能作为重要的二次能源,现在已广泛应用于国民经济的各个部门和人们日常生活中。电力发展水平和电气化程度从一定的角度反映出一个国家的经济水平和人民生活水平。工农业生产、现代国防和科学技术研究以及人民生活都离不开电。电,造福于人类,但如果不掌握它,它又会给人类构成威胁。例如,我们对电气安全技术知识认识不够,对电气设计、电气设备的安装、运行维护、检修及使用不当,或电气设备的结构和装置设计不完善,或者错误操作,都可能发生人身触电伤亡、电气设备损坏等各种电气事故,甚至还可能造成大面积停电,给国民经济造成严重损失。所以,对电气安全技术问题一定要极其重视。

电气安全包括人身安全和设备安全两个方面。电气安全技术就是保障这两方面安全的技术。安全技术与专业技术基础紧密相关,研究专业技术不能不研讨安全技术,研讨安全技术不能离开专业技术基础。本手册就是从这两方面对电气工作中和日常生活中遇到的电气安全技术问题作了较全面和详细的分析和叙述,以帮助广大从事电气工作的同志在工作中,以及人们在日常生活中安全地接触电气设备,安全地工作和安全地用电。

由于电气安全技术涉及面广,涉及到多种学科,限于编著者水平,本手册肯定还有很多不足之处,敬请广大读者指正。

本手册由姜虹飞高级工程师(教授)主审。在此致以衷心感谢。

目 录

第一篇 技术基础	
第一章 电工基础	1
§ 1-1 单相交流电	1
一、描述交流电大小的物理量	1
二、描述交流电变化快慢的物理量	2
三、正弦交流电的表示方法	3
四、单相交流电路	4
§ 1-2 三相交流电	11
一、概述	11
二、三相电源绕组的联接	12
三、三相负载的联接	13
四、三相电路的功率	14
§ 1-3 电路中的谐振现象	15
一、串联谐振	15
二、并联谐振	16
第二章 电力变压器	19
§ 2-1 电力变压器的结构	19
一、铁芯	19
二、绕组	20
三、其它附件	21
§ 2-2 变压器工作原理	22
一、变压器的空载运行	22
二、变压器的负载运行	23
三、变压器的外特性	23
四、变压器的阻抗变换作用	24
五、变压器的效率	24
§ 2-3 电力变压器的空载试验和 短路试验	25
一、空载试验	25
二、短路试验	25
§ 2-4 三相电力变压器	26
一、三相变压器的磁路系统	26
二、变压器绕组的极性	27
三、三相变压器绕组的联接	28
四、三相变压器的联接组	29
§ 2-5 三相电力变压器的并联运行	31
§ 2-6 互感器	31
第三章 三相交流电动机	32
§ 3-1 三相鼠笼式异步电动机	32
一、三相鼠笼式异步电动机的构造	32
二、三相鼠笼式异步电动机的工作 原理	33
三、三相鼠笼式异步电动机的控制	35
§ 3-2 三相绕线式异步电动机	45
§ 3-3 单相鼠笼式异步电动机	46
一、单相电容运行异步电动机	46
二、单相电容起动异步电动机	47
三、单相罩极式异步电动机	47
§ 3-4 交流同步电动机	48
一、同步电动机工作原理	48
二、同步电动机的异步起动法	49
第二篇 电气安全技术	
第四章 概述	50
§ 4-1 电气安全的重要性	50
§ 4-2 常见的电气事故类型	50
一、短路事故	50
二、电气设备爆炸及火灾事故	51
三、电气误操作事故	51
§ 4-3 电气事故处理	52
一、事故调查	53
二、事故分析及处理	53
第五章 人身触电预防	54
§ 5-1 电流对人体的危害	54
一、不同电流强度对人身触电的影响	54
二、电流通过人体的持续时间对人体 触电的影响	55
三、作用于人体的电压对人体触电 的影响	55
四、电源频率对人体触电的影响	55
五、人体电阻对人身触电的影响	55
六、电流通过人体不同途径对人体 触电的影响	56
七、人体健康状况对人体触电的影响	56
§ 5-2 电流对人体的伤害分类	57
一、电击	57
二、电伤	57
§ 5-3 人体触电形式	57
一、人体与带电导体直接接触触电	58

二、跨步电压触电	58	六、电气设备检修	88
三、接触电压触电	59	七、备品备件管理	89
§ 5-4 防止人身触电的技术措施	59	八、电气设备试验	90
一、保护接地和保护接零	59	§ 6-2 配电变压器安全	96
二、安全电压	61	一、工厂主变压器台数及容量选择	96
三、装设触电保安器	62	二、变压器的运行维护	98
§ 5-5 电气工作的安全措施	64	三、变压器的常见故障及处理	99
一、保证安全工作的组织措施	64	四、变压器的保护装置	101
二、保证安全工作的技术措施	67	五、变压器的检修与试验	105
三、低压带电工作的安全措施	69	六、变压器安装要求	106
四、保证变配电所安全运行的组织措施	70	七、变压器的过负荷能力	109
§ 5-6 常用电工测量仪表的正确使用	73	八、变压器火灾及爆炸预防	110
一、兆欧表	73	§ 6-3 电动机安全	111
二、钳形电流表	75	一、电动机的正确选择	112
§ 5-7 电气安全用具	76	二、电动机的运行维护	112
一、绝缘棒	76	三、电动机的异常现象及处理	114
二、绝缘夹钳	77	四、电动机的检修要求	115
三、绝缘手套	77	五、电动机的保护装置	116
四、绝缘靴(鞋)	77	六、电动机的安装要求	117
五、绝缘站台、绝缘垫和绝缘毯	77	七、电动机火灾预防	120
六、验电器	77	§ 6-4 高压开关安全	121
七、电气安全用具的工作要求	78	一、高压断路器安全	121
八、几种常用绝缘安全用具试验标准	78	二、隔离开关安全	127
§ 5-8 电气工作人员的职责和条件	79	三、高压负荷开关安全	128
§ 5-9 触电急救	80	§ 6-5 互感器安全	129
一、解脱电源	81	一、概述	129
二、迅速诊断	81	二、电流互感器安全	129
三、心肺复苏	81	三、电压互感器安全	132
四、抢救过程中的再判定	83	四、互感器安装注意事项	133
五、抢救过程中触电伤员的移动与转院	83	五、互感器交接试验	134
六、触电伤员好转后处理	83	六、互感器常见故障处理	135
七、杆上或高处触电急救	83	七、互感器的运行维护	136
八、外伤处理	84	§ 6-6 电力电容器安全	136
第六章 电气设备安全	85	一、电力系统无功补偿概念	136
§ 6-1 电气设备安全技术管理	85	二、电力电容器的类型和结构	138
一、电气设备的运行维护	85	三、电力电容器补偿容量确定	138
二、电气设备的技术监督	85	四、电力电容器常见故障及处理	139
三、电气设备的重点技术检查	86	五、电力电容器运行维护	140
四、电气设备定级	87	六、电力电容器安装要求	141
五、电气设备缺陷管理	87	§ 6-7 低压电器安全	143
		一、低压开关使用安全	143
		二、低压熔断器使用安全	147
		三、接触器使用安全	149

四、继电器使用安全	150	五、备用电源自动投入装置	185
五、主令电器使用安全	154	六、二次接线的安全要求	186
六、低压电器安装验收要求	155	第八章 电力内外线安全	188
§ 6-8 携带式及移动式电气设备		§ 8-1 室外架空配电线路安全	188
安全	155	一、结构型式	188
§ 6-9 起重机电气设备安全	156	二、导线截面选择	191
§ 6-10 电焊机使用安全	157	三、设计中有关的安全技术问题	194
§ 6-11 电气照明装置安全	158	四、施工安全要求	197
一、照明电光源分类	158	五、接户线安全要求	197
二、白炽灯及其安全使用	158	六、架空配电线路工程竣工验收要求	199
三、卤钨灯及其安全使用	159	§ 8-2 电缆线路安全	199
四、荧光灯及其安全使用	159	一、电力电缆结构及种类	199
五、高压汞灯及其安全使用	161	二、电缆选择原则	200
六、高压钠灯及其安全使用	161	三、电力电缆敷设要求	201
七、金属卤化物灯及其安全使用	162	四、电缆线路工程交接验收要求	208
八、混光灯及其安全使用	163	§ 8-3 室内配线安全	209
九、照明灯具悬挂高度要求	163	一、室内配线的基本要求	210
十、照明灯具装置安装要求	164	二、室内配线施工图中常用的图形及	
十一、照明配电箱安装要求	166	文字符号	211
十二、照明开关安装要求	167	三、塑料护套线配线安全要求	222
十三、插座安装要求	168	四、穿管配线安全要求	223
第七章 供电系统安全	169	五、瓷夹板、瓷柱、瓷瓶配线安全要求	225
§ 7-1 用电负荷分类及供电要求	169	六、钢索配线安全要求	225
一、电力负荷分类	169	七、进户线安全技术要求	226
二、用电负荷分类	169	八、电度表安装要求	227
三、供电要求	170	九、室内电气线路的火灾预防	228
§ 7-2 保证供电系统电能质量	170	第九章 高层建筑及公用、民用建筑	
一、电能质量指标	170	电气安全	229
二、控制非线性用电设备引起电网波形		§ 9-1 高层建筑的电气安全	229
畸变措施	171	一、高层建筑供电系统要求	229
三、工厂常用的电压调整措施	171	二、竖井配线要求	230
§ 7-3 工厂变配电所及电气主接线	172	三、高层建筑电梯使用安全要求	230
一、变配电所所址选择要求	172	四、高层建筑的消防系统	231
二、电气主接线	172	§ 9-2 公用及民用建筑的电气安全	233
§ 7-4 工厂变配电所的布置要求	177	一、公用建筑用电负荷级别	233
一、变配电所布置的总体要求	177	二、一般公用建筑的电气安全	236
二、配电装置的安全净距	179	三、公用建筑计算机经营管理系统	
§ 7-5 工厂继电保护自动装置及		安全要求	243
二次回路	182	四、共用天线电视系统安全	
一、继电保护的主要任务	183	要求	246
二、对继电保护装置的基本要求	183	五、闭路电视系统安全	248
三、工厂供电线路的继电保护	184	六、通信系统电气安全	249
四、电力变压器的继电保护	184	七、电梯、自动扶梯和自动人行道	

安全要求	256	四、手动火灾报警按钮设置要求	291
八、建筑物自动化系统(BAS)电源及 布线要求	258	五、消防联动控制系统安全要求	291
第十章 建筑施工现场用电安全	259	§ 12-6 爆炸和火灾危险场所电气 安全	297
§ 10-1 施工现场的安全要求	259	一、爆炸性气体环境安全	297
§ 10-2 施工现场电气设备及供电 线路安全	260	二、爆炸性粉尘环境安全	301
一、施工现场配电变压器选择	260	三、火灾危险环境安全	304
二、其他安全要求	260	四、爆炸和火灾危险场所电气工程 竣工检查	305
第十一章 防雷、接地技术	263	§ 12-7 电气火灾的扑救	306
§ 11-1 防止雷害事故	263	一、断电灭火	306
一、雷电的形成	263	二、带电灭火	306
二、雷电破坏的基本形式	263	三、充油设备的火灾扑救	307
三、雷电的危害	263	四、旋转电机灭火	307
四、防雷设备	264	五、常用电气设备灭火器的使用 和保养	307
五、防雷措施	269	第十三章 静电安全	308
六、防雷设备安装要求	274	§ 13-1 静电的产生及危害	308
§ 11-2 接地技术	275	一、静电的产生	308
一、概述	275	二、静电的危害	308
二、电力系统中性点接地方式	276	§ 13-2 静电的安全防护	309
三、接地装置	278	一、静电控制法	309
四、接地电阻测量	280	二、自然泄漏法	309
第十二章 防止电气火灾和爆炸 事故	283	三、静电中和法	310
§ 12-1 电气火灾和爆炸原因	283	四、防静电接地	310
一、电气设备过热	283	第十四章 电磁场防护	312
二、电火花和电弧	284	§ 14-1 电磁场对人体的伤害	312
§ 12-2 电气防火和防爆的措施	284	§ 14-2 防止电磁场危害的措施	312
一、排除可燃易爆物质	285	第十五章 家用电器安全	314
二、排除电气火源	285	§ 15-1 电冰箱	314
§ 12-3 电加热设备的火灾预防	285	一、电冰箱的正确选用	314
一、电加热设备发生火灾的原因	285	二、电冰箱停用时的保养	314
二、预防措施	285	三、电冰箱的常见故障及排除	314
§ 12-4 白炽灯、日光灯的火灾预防	286	四、电冰箱的火灾预防	315
一、白炽灯引起火灾的原因	286	§ 15-2 洗衣机	316
二、预防白炽灯引发火灾的措施	286	一、洗衣机的正确选用	316
三、预防日光灯引发火灾的措施	286	二、洗衣机的安全使用和保养	316
§ 12-5 民用建筑物火灾报警及消防 联动控制	286	三、洗衣机的火灾预防	318
一、民用建筑物防火等级分类	287	§ 15-3 空调器	318
二、民用建筑物防火保护确定原则	288	一、空调器的选购及安装	318
三、火灾探测器的选择和设置要求	289	二、空调器安全使用和保养	319
		三、空调器的常见故障及排除	319
		§ 15-4 电风扇	320

一、电风扇的选购	320	附录 13 导线穿电线管的标称直径 选择表	336
二、电风扇的保养和维护	320	附录 14 铅熔丝的额定电流	336
三、电风扇的常见故障及排除	320	附录 15 每千瓦有功功率所需补偿容 器的无功容量	337
四、电风扇的火灾预防	321	附录 16 架空裸铝线规格表	338
§ 15-5 电熨斗	322	附录 17 三相 380V 低压架空线以送 电距离选用裸铝线截面参 考表	339
一、正确挑选电熨斗	322	附录 18 三相 380V 铜芯导线和电缆 1A/km 的电压损失	340
二、电熨斗的安全使用	322	附录 19 10~180kVA 配电变压器配用 熔丝容量	340
三、蒸汽熨斗的安全使用	322	附录 20 基本系列异步电动机的主要 技术数据	341
四、电熨斗的防火安全措施	323	附录 21 Y 系列电动机起动、保护 设备及导线选择	341
§ 15-6 电取暖器	323	附录 22 三相异步电动机的常见 故障及处理	342
一、电取暖器的选购	323	附录 23 低压电器的常见故障及 处理	344
二、电取暖器的安全使用与保养	323	附录 24 按环境选择导线、电缆及 其敷设方式	346
§ 15-7 微波炉	324	附录 25 常用电气设备及线路的绝 缘电阻标准	347
一、微波炉的特点	324	附录 26 导体或线芯的允许长期 工作温度	348
二、微波炉的选购	324	附录 27 按机械强度要求的导体最小 截面	348
三、微波炉的安全使用及保养	324	附录 28 电缆之间、电缆与管道、道路、 建筑物之间平行和交叉时的最 小允许净距	349
§ 15-8 电饭煲	325	附录 29 低压配电室内各种通道最小 宽度	350
一、保温式自动电饭煲的安全使用	325	附录 30 户内线路与管道、设备的 安全间距	350
二、电饭煲常见故障及排除	325	附录 31 常用电缆的允许弯曲半径 倍数	351
§ 15-9 电火锅	326	附录 32 油浸纸绝缘电缆最大允许 高差	351
一、电火锅的选购及安全使用	326	附录 33 接闪器及其引下线的最小 规格	351
二、电火锅的常见故障及排除	326	附录 34 白炽灯的故障及处理	352
§ 15-10 电水壶、电热水瓶、电热杯	326		
一、电水壶安全使用	326		
二、电热水瓶安全使用	327		
三、电热杯安全使用	327		
附录	328		
附录 1 倒闸操作票格式	328		
附录 2 安全标示牌式样	328		
附录 3 登高安全工具试验标准表	329		
附录 4 塑料绝缘线安全载流量	330		
附录 5 橡皮绝缘线安全载流量	331		
附录 6 低压油浸纸绝缘电缆直接埋地 安全载流量	332		
附录 7 低压聚氯乙烯(PVC)绝缘四芯 电缆安全载流量	332		
附录 8 低压橡皮四芯电缆安全载 流量	333		
附录 9 架空用裸导线安全载流量	334		
附录 10 矩形母线安全载流量	334		
附录 11 金属圆梗安全载流量	335		
附录 12 导线穿钢管的标称直径选 择表	335		

附录 35	日光灯的故障及处理	353	附录 40	注入公共连接点的谐波电 流限值	356
附录 36	高压电气设备绝缘的交流耐 压试验电压标准	354	附录 41	全国部分城市雷暴日数	356
附录 37	绝缘油全分析试验项目和 标准	354	附录 42	中华人民共和国电力法	357
附录 38	生产过程中产生的静电 电压	355	附录 43	中华人民共和国电力供应与 使用条例	364
附录 39	公用电网谐波电压限值	355	主要参考文献		369

第一篇 技术基础

第一章 电工基础

§ 1-1 单相交流电

在直流电路中,电动势、电压、电流的大小和方向都不随时间的改变而变化;而在交流电路中,电动势、电压、电流的大小和方向都随时间作周期性的变化。这种大小和方向随时间变化而变化的电,我们称之为交流电。日常用的交流电,其大小和方向随时间按正弦规律变化,叫做正弦交流电,如图 1-1 所示。

交流电应用极其广泛,这是因为交流电比直流电具有许多优点,例如对交流电可以利用变压器方便地将电压升高或降低,在进行远距离输电时变换为高电压,可以减小电能损耗,有效的将电能输送到远方;用户用电时变换为较低电压,这样能够节省电气设备的投资费用,保证安全。此外,交流鼠笼式异步电动机结构简单、价格便宜,运行可靠,维护方便,大量的、广泛的用在工农业生产中作为动力,完成电力拖动任务。照明、动力、电热等用电设备几乎都采用交流电,即使是某些非用直流电源不可的工业,如电解、电镀、城市交通电车、地铁等也利用整流设备将交流电转变为直流电。

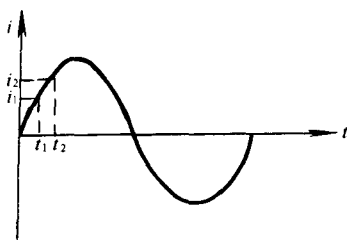


图 1-1 正弦交流电流波形

交流电大小和方向随时间在不断的变化,所以研究交流电时考虑的因素和计算分析要比直流电复杂得多。

一、描述交流电大小的物理量

由于交流电的大小和方向随时间改变而不断变化,每时每刻其大小都不一样,方向也在不断变化,所以不能简单的用一个物理量来描述它。描述交流电大小的物理量有:瞬时值、最大值、有效值、平均值。

1. 瞬时值:

交流电在任一瞬时的数值,称为瞬时值。常用英文的小写字母表示,如电流用 i ,电压用 u ,电动势用 e 等。在波形图上任一点的纵坐标值,表示与横坐标对应时刻的瞬时值。例如在图 1-1 中, t_1 时刻的交流电的瞬时值为 i_1 ,在 t_2 时刻的交流电瞬时值为 i_2 等。

2. 最大值

交流电的最大瞬时值,称为交流电的最大值,又叫振幅值。常用英文的大写字母下角加

m 表示。如交流电流最大值用 I_m 、交流电压最大值用 U_m 、交流电动势最大值用 E_m 表示。如图 1-2 中 I_m 即为交流电流的最大值。

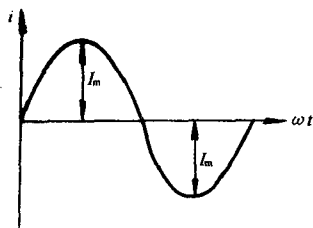


图 1-2 交流电流最大值

3. 有效值

交流电的瞬时值、最大值,都是指交流电在某一瞬间的数值,它们并不能反映出交流电在电路中的真实效果(如发光、发热等)。交流电的有效值就是从热效应的角度来描述交流电大小的物理量。

将直流电与交流电分别通过同一等值电阻,如果在相等时间内,二者在电阻上产生的热量相等,则此直流电的数值被称为此交流电的有效值。也就是说,交流电的有效值,就是与

它的热效应相等的直流值。

交流电的有效值常用英文大写字母表示。例如交流电流有效值用 I 、交流电压有效值用 U 、交流电动势有效值用 E 表示。

4. 平均值

交流电正半个周期内,其瞬时值的平均数称为交流电的平均值。常用英文字母下角加 p 表示。如 i_p 、 u_p 、 e_p 分别表示交流电流、电压、电动势的平均值。

描述交流电大小的四个物理量:瞬时值、最大值、有效值、平均值之间有下列二个主要关系,即正弦交流电的有效值等于它最大值的 0.707 倍;正弦交流电的平均值等于它最大值的 0.637 倍。例如:

$$I = 0.707 I_m \quad (1-1)$$

$$I_p = 0.637 I_m \quad (1-2)$$

二、描述交流电变化快慢的物理量

前面已讲到交流电是大小、方向随时间变化而变化的电,这就有一个变化快慢的问题。描述交流电变化快慢的物理量有:周期、频率、角频率。

1. 周期

交流电变化一次所需要的时间称为交流电的周期,单位是秒。如图 1-1 所示的正弦交流电,它从零开始随时间增加逐渐增至最大值,然后逐渐减小到零,以后又反向增大到最大值,再回到零。这样整整变化了一周,以后按同样规律循环下去。交流电每循环一次所需要的时间即为交流电的周期。周期常用符号 T 来表示。显然周期值越小,交流电变化越快,周期值越大,交流电变化越慢。

2. 频率

交流电的频率是指 1s 时间内交流电重复变化的次数,用字母 f 表示。单位是赫兹,简称赫(Hz)。如果某交流电在 1s 内变化了 50 次,则该交流电的频率就是 50Hz。比赫兹大的常用单位是千赫(kHz)和兆赫(MHz)。

$$1 \text{ 千赫(kHz)} = 10^3 \text{ 赫(Hz)}$$

$$1 \text{ 兆赫(MHz)} = 10^6 \text{ 赫(Hz)}$$

我国发电厂发出的交流电,频率为 50Hz,这一频率为我国的工业标准频率,简称工频。所以一般的电力变压器、交流电动机、照明等电气设备,都按取用 50Hz 的交流电来进行设计制造。但也有一些设备,需要频率较高的交流电源,例如高频加热所用的频率可达 10^8 Hz,无线电工程上使用的频率可达 $10^5 \sim 3 \times 10^{10}$ Hz 以上。

3. 角频率

交流电由交流发电机发出,从交流发电机原理可知,对于一对磁极的发电机,线圈转一圈(切割磁力线一圈),感应的交流电动势正好是一个周期。假如每秒钟线圈转的圈数越多,则交流电循环变化的次数越多。也就是交流电变化得越快。所以用每秒钟发电机线圈转过的角度也可来反映交流电变化的快慢。

角频率就是交流电每秒钟内变化的角度。常用 ω 来表示。 $\omega = \alpha/t$ 。这里的角度常用弧度来表示,因此角频率 ω 的单位是弧度/秒。

一个圆周的弧度为 2π ,相当于角度 360° 。所以弧度与角度之间关系为 $2\pi = 360^\circ$ 或 $\pi = 180^\circ$ 。例如: $\frac{\pi}{6}$ 弧度即为 30° 角度, $\frac{\pi}{2}$ 弧度即为 90° 角度,依此类推。

反映交流电变化快慢的几个物理量之间,有下列主要关系,即交流电的频率和周期之间是互为倒数关系:

$$T = \frac{1}{f} \text{ 或 } f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

交流电的频率与角频率之间存在下列关系

$$\omega = 2\pi f \quad (1-4)$$

或
$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

三、正弦交流电的表示方法

为了便于分析和研究交流电,人们通常用四种形式表示一个正弦交流电。第一种形式是曲线图,即前面讲到的波形图,如图 1-1 所示。第二种形式是解析式,即用一个数学式子来表示交流电,例如 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。第三种形式是矢量图(又称向量图),即用旋转矢量来表示。第四种形式称为符号形式,是用复数来表示一个交流电。下面对正弦交流电的解析式表示法先进行叙述。

所谓解析式表示法,就是用数学式子来表示正弦交流电。例如正弦交流电流的数学式子表示为:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-5)$$

式中 i ——正弦交流电流的瞬时值;

I_m ——正弦交流电流的最大值;

ω ——正弦交流电流的角频率;

φ ——正弦交流电流的初相角,即正弦交流电开始瞬间的相位角;

$(\omega t + \varphi)$ ——正弦交流电的相位。

在式(1-5)中,知道了交流电流的最大值 I_m 、角频率 ω 和初相角 φ ,就可以根据不同的 t 值求得对应的瞬时值 i ,这样正弦交流电的波形就可画出来了。所以正弦交流电的最大值、角频率,初相角称为交流电的三要素。二个交流电初相角之差称之为这二个交流电的相位差。例如有二个正弦交流电流 $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1)$; $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$ 。这二个交流电流角频率相同,初相角不同,则这二个电流 i_1 与 i_2 的相位差为 $\varphi_1 - \varphi_2$; i_2 与 i_1 的相位差为 $\varphi_2 - \varphi_1$ 。

要比较二个正弦交流电相位差必须注意两点:一点是二个正弦交流电必须角频率(频率)相同,否则无法比较相位差;另一点是交流电甲与交流电乙的相位差,是将交流电甲的初

相角减交流电乙的初相角;交流电乙与交流电甲的相位差,则将交流电乙的初相角减交流电甲的初相角。假如减后的值是负值,则表示该交流电相位上落后于另一交流电。例如:交流电 $i_1 = \sin(\omega t + 30^\circ)$; $i_2 = 100\sin(\omega t + 60^\circ)$ 。 i_1 与 i_2 的相位差 $\varphi = 30^\circ - 60^\circ = -30^\circ$,表示 i_1 相位落后于 $i_2 30^\circ$ 。

下面我们再对正弦交流电的矢量图表示法进行叙述。

所谓旋转矢量表示法,就是用一个在直角坐标中绕原点不断旋转的矢量来表示正弦交流电的方法。对于一个正弦交流电动势 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$,用旋转矢量表示的方法如下:

过直角坐标的原点“0”作一矢量 E_m ,如图 1-3(a)所示,用矢量的长度表示电动势的最大值 E_m ,矢量与横轴之间的夹角表示电动势的初相角 φ ,这个旋转矢量以角频率 ω 绕原点“0”作逆时针方向旋转。

旋转矢量于任何时刻在纵轴上的投影,就等于正弦交流电在这时刻的瞬时值。如图 1-3(b)所示。

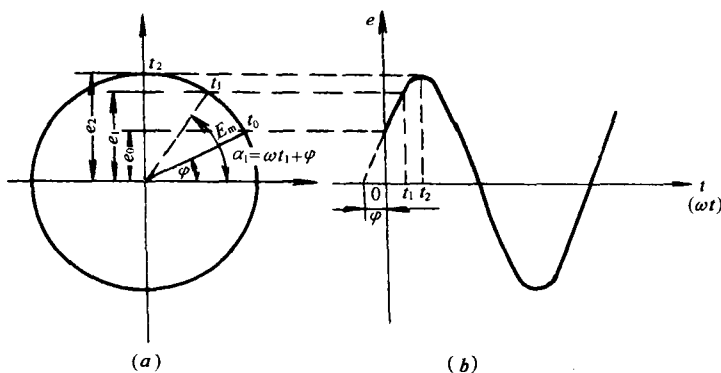


图 1-3 正弦交流电的旋转矢量表示法

图 1-3 中,在 $t=0$ 时,旋转矢量在纵轴上的投影 $e_0 = E_m \sin \varphi$ 为起始时刻的瞬时值。经过时间 t_1 后,旋转矢量与纵轴的夹角为 $(\omega t + \varphi)$,它在纵轴上的投影 $e_1 = E_m \sin(\omega t_1 + \varphi)$,就是这 t_1 时刻的瞬时值。

在实际应用旋转矢量对交流电路进行分析计算时,常将几个同频率的正弦交流电画在同一矢量图中,由于所有矢量都以同一角速度旋转,所以它们的相对位置保持不变,亦即各矢量之间的夹角始终等于它们的相位差。在矢量图上不标出角频率,而且实际应用的矢量图通常按初相角和有效值作出。矢量的长度表示有效值,有时在解决实际问题时较方便。

四、单相交流电路

交流电路由交流电源、负载、联接导线以及电路的控制、保护设备等组成。

电源是发出电能的装置,交流发电机将机械能转换为电能,给负载供电。在电源的正弦交变电动势作用下,闭合电路中形成正弦交流电流。

负载是将电能转换为其它形式能量的用电设备,如电灯、电动机、电热器等。

在交流电路中,由于电流和电压都随时间变化,因此,交流电路中的现象要比直流电路复杂。在交流电路中元件除电阻起作用外,电感、电容都将起作用。

仅仅具有电阻的负载(如电灯、电阻炉等),在交流电路和直流电路中的作用一样,都是起着限制电流的作用,把从电源取用的电能转换为热能。

如果负载是有线圈的(如日光灯的镇流器、电动机的绕组等),在直流电路和交流电路的作用就有很大不同。在直流电路中,线圈虽然有电感,但是由于电流不随时间变化,不会产生自感电动势,影响电路电流的只是线圈中的电阻。而在交流电路中,因为电流时刻在变化,线圈中始终有自感电动势产生,它反抗电流的改变,因此,影响电路电流不仅有线圈的电阻,还有线圈的电感。

电容器在直流和交流电路中的作用也不同。在直流电路中,电路只在电容器刚接入电路的瞬间有充电电流,充电完毕后,电路则处于断路状态。但在交流电路中,由于电压是时刻在变化,电容器反复不断的进行充电和放电,因而在电路中出现交变电流,使电路总是处在通路状态。

由以上讨论可知,在交流电路中,不仅电阻会影响电路电流的大小,而且电感、电容对电路的电流也有影响。即交流电路中影响电流大小的参数有电阻、电感和电容三个。

如果电路中的某一参数对电路的影响较显著,其它两个参数的影响较小,可忽略不计,这样的电路叫单一参数电路,如纯电阻、纯电感、纯电容电路等。实际电路中往往是几个参数同时作用。为了分析问题方便,下面首先分析单一参数电路的基本特点,然后,在此基础上再分析三个参数同时作用的电路。

1. 纯电阻电路

分析各种正弦交流电路,都是要分析电路中电压和电流之间的关系(大小和相位),以及功率问题。

纯电阻电路就是电路中只有电阻,这和直流电路相似。如图 1-4 所示。

(1) 纯电阻电路中电压与电流的关系

当在电阻 R 的两端施加交流电压 $u = U_m \sin \omega t$ 时,电阻 R 中将通过电流 i 。电压 u 和电流 i 的关系满足欧姆定律,即:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t \quad (1-6)$$

式中 $I_m = \frac{U_m}{R}$

如用电流和电压的有效值表示,则有

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

纯电阻电路中表示电压和电流的波形图如图 1-5(a) 所示。

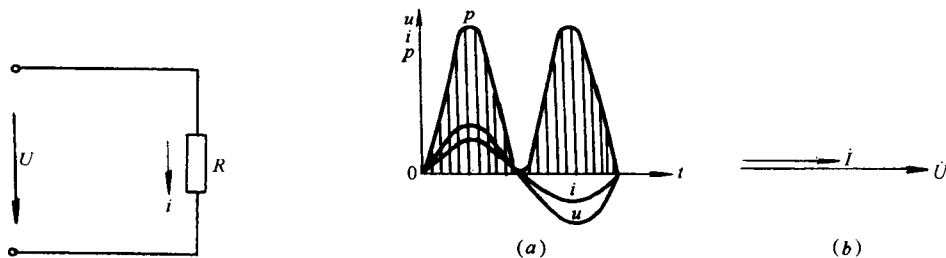


图 1-4 纯电阻电路

图 1-5 纯电阻电路电压,电流和功率的波形及向量图

从式(1-6)可见,对于纯电阻电路,当外加电压是一个正弦量时,其电流也是同频率的正

弦量,而且电流和电压同相位。由此可见,电阻在交流电路中的作用是:可以改变电流的大小但不改变交流电流频率和相位。

纯电阻电路中电压和电流的矢量图如图 1-5(b)所示。

(2) 纯电阻电路中的功率

在纯电阻电路中,电压的瞬时值与电流的瞬时值的乘积叫瞬时功率,用 p 表示,即

$$p = u \cdot i$$

在图 1-5(a)中,将电压、电流在同一瞬时的数值逐点相乘,可画出如图 1-5(a)中的瞬时功率曲线。从曲线可看出 p 在任何瞬间都是正值或为零,这表明除 u 和 i 都等于零的瞬间以外,电阻始终在消耗电能。

由于瞬时功率 p 随时间不断变化,因此,没有什么实际意义,且不易测量和计算,故通常是利用瞬时功率在一个周期内的平均值 P 来衡量交流电功率的大小,这个平均值 P 叫做有功功率。纯电阻电路中有功功率 P 如下计算:

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

上式中, U 和 I 都是交流电的有效值。

有功功率的单位是瓦(W)或千瓦(kW)

2. 纯电感电路

由电阻很小的电感线圈组成的交流电路,都可以近似地看成是纯电感电路。图 1-6(a)所示为由一个线圈构成的纯电感电路。

(1) 纯电感电路中电流与电压的关系

在纯电感交流电路中电流滞后于电压 90° 相位,或者说电压超前电流 90° 相位。波形图如图 1-6(b)电压与电流的矢量图见图 1-7 所示。

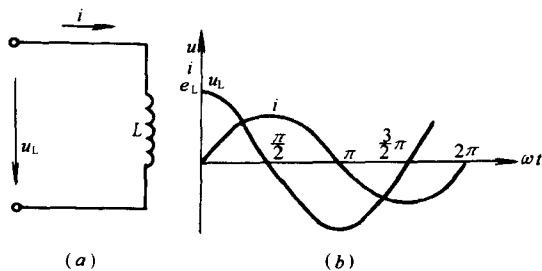


图 1-6 纯电感电路及其电压、电流波形

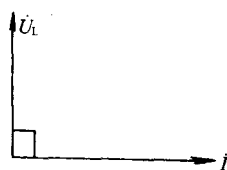


图 1-7 纯电感电路
 U 、 I 相位关系

在纯电感交流电路中,电感 L 呈现出来的影响电流大小的物理量称为感抗,常用字母 X_L 表示。感抗 X_L 与电感量 L 之间有下列关系:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1-9)$$

式中 ω ——加在线圈两端交流电压的角频率;

f ——加在线圈两端交流电压的频率(Hz);

L ——线圈的电感量。当 L 单位是亨(H)时, X_L 的单位为欧姆(Ω)。电感量 L 的单位除亨(H)以外;还有毫亨(mH)等。

$$1 \text{ 毫亨} = 10^{-3} \text{ 亨} \quad (1\text{mH} = 10^{-3}\text{H})$$

在纯电感交流电路中,电感线圈中电流的有效值 I_L 等于线圈两端电压的有效值 U_L 除以它的感抗 X_L ,即

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} \quad (1-10)$$

上式中,当 U 的单位是 V(伏), X_L 的单位是 Ω (欧姆)时, I_L 的单位是 A(安培)。

从上分析还可以看到,感抗 X_L 的大小除与线圈电感量 L 大小有关外,还与加在线圈两端的交流电压 U_L 的频率 f 有关,频率 f 愈高线圈感抗 X_L 愈大,在相同电压作用下,线圈中的电流就愈小。

(2) 纯电感电路中的功率

纯电感电路的瞬时功率为:

$$\begin{aligned} p_L &= u_L \cdot i = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_m \sin\omega t \\ &= U_{Lm} I_m \sin\omega t \cos\omega t \\ &= \frac{1}{2} U_{Lm} I_m \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-11)$$

p_L 的变化曲线如图 1-8 所示。

从图 1-8 可以看到:在第一和第三个 $1/4$ 周期内, p_L 是正值,这表示线圈从电源吸取电能并把它转换为电磁能储存在线圈周围的磁场中,此时线圈起着—个负载的作用。但在第二和第四个 $1/4$ 周期内, p_L 为负值,这表示线圈把储存磁能再转换为电能送回电源,此时线圈起着—个电源的作用。综上所述,纯电感线圈时而“吞进”功率,时而“吐出”功率,在一个周期内的平均功率为零。平均功率不能反映线圈能量交换的规模,因而人们就用瞬时功率来反映这种能量交换的规模,并把它叫做电路的无功功率,用字母 Q_L 表示。 Q_L 的大小为:

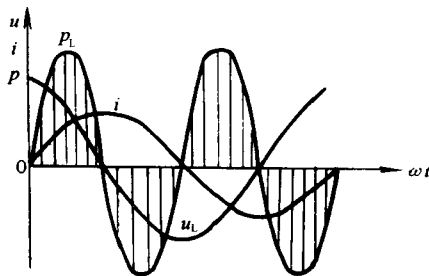


图 1-8 纯电感电路的功率曲线

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L} \quad (1-12)$$

无功功率的单位为乏(var)。式(1-12)中,当各物理量的单位分别为伏、安、欧姆时,无功功率 Q_L 的单位为乏。

“无功”的含义是“交换”的意思,而不是“消耗”,或“无用”,是相对“有功”而言的。

3. 纯电容电路

由介质损耗很小,绝缘电阻很大的电容器组成的交流电路,可近似看成纯电容电路。如图 1-9(a)所示。

(1) 纯电容电路中电流与电压的关系

在纯电容电路中电流超前于电压 90° 相位,或者说电压滞后于电流 90° 相位。波形图如图 1-9(b)。电压与电流的矢量图见图 1-10 所示。

在纯电容交流电路中,电容 C 呈现出的影响电流大小的物理量称为容抗,常用字母 X_C 表示。