

前 言

本书根据1982年11月原高等工业学校电工技术类专业教材编审委员会武汉会议上修订的电器专业教学计划,以及1983年5月原电器专业教材编审小组杭州会议上修订的《低压电器》教学大纲重新编写的。

1982年出版的《低压电器及其测试技术》是根据1978年6月全国专业教材会议制订的编写大纲编写的。由于修订的新的教学计划中安排了几门选修课程,教学计划中安排给本课程的学时数有所减少,本课程的名称与内容也相应作了适当的调整。

本教材经过数年的试用,听取了各校的反映意见,作了一定的修改和补充。本书可作为电器专业的专业教材,也可供其他电类专业以及有关工程技术人员参考。

本书由西安交通大学方鸿发教授主编,福州大学张冠生教授主审。书稿中第一、五、六章由陈德桂副教授编写,第四章由方鸿发教授编写,第二、三章由方鸿发教授及袁崇军同志编写,第七章由方鸿发、陈德桂编写。

在编写及试用过程中得到各有关电器工厂、科研单位及兄弟院校的大力支持和提出许多宝贵意见。承福州大学张冠生教授的审阅和华中工学院罗陶副教授对试用教材的审阅,对于他们的热情帮助谨致以深切的感谢。

限于编者的水平有限,书中一定还有不少错误和不妥之处,希望读者予以批评指正。

主 要 符 号 表

A ——电磁铁做功, 机械功, 电流表, 散热面积, 线圈截面积, 导体截面积	I ——电流
A_c ——铁心截面积	I_{CW} ——额定短路耐受电流
A_{ch} ——铁心窗口面积	I_C ——额定短路分断电流
A_h ——电弧截面积	I_e ——动作电流
A_q ——导线截面积	I_{CS} ——额定运行短路分断电流
A_0 ——工作气隙的计算截面积	I_{CU} ——额定极限短路分断电流
a ——接触点半径	$I_{F(av)}$ ——正向平均电流
B ——磁感应强度, 磁通密度	$I_{F(RMS)}$ ——正向方均根电流
b ——宽度, 盆边高度	I_k ——短路电流(有效值)
C ——触头间隙两端分布电容, 电磁铁价格	I_{km} ——短路冲击电流(幅值)
C ——接触器	I_N ——额定电流
c ——比热容, 系数, 螺管电磁铁线圈外半径, 吸盘电磁铁磁轭厚度, 弹簧刚度, 调节恢复电压用电容, 线圈半径	I_{ra} ——熔焊电流
CJ——交流接触器	$I_{T(RMS)}$ ——通态方均根电流
D——二极管	i_- ——短路电流的周期分量
d ——导线直径	i_- ——短路电流的非周期分量
d_c ——铁心内径	i_A ——直流电弧电流, 交流电弧电流(瞬时值)
d_h ——电弧内径	I_A ——直流电弧电流、交流电弧电流(有效值)
d_r ——盆式电磁铁挡铁盆边内径	j ——电流密度
d_p ——盆式电磁铁挡铁盆边外径	J ——截面惯性矩
DW——低压框架式断路器	J ——继电器
DZ——低压装置式断路器	JX ——继电器线圈
E ——弹性模数, 线圈反电势	K ——系数, 热电偶常数, 比值, 比弯曲
E_h ——电弧电压梯度	K ——被试电器, 开关
E_p ——拉力极限强度	K_T ——综合散热系数, 线圈表面综合散热系数
F ——电磁吸力, 电动斥力	K_s ——栅片的介质恢复强度的增长速度
f ——单位铁心长度的磁势, 挠度, 频率	K_β ——线圈内表面与外表面散热率之比
f_0 ——线路固有振荡频率	K_{ca0} ——短路电流冲击系数
F_c ——触头接触力	K_f ——返回系数
F_{ch} ——电动斥力	K_{fe} ——线圈填充系数
F_f ——释放弹簧力, 反作用力	K_{jf} ——介质恢复强度增长速度
F_0 ——吸力特性上设计点上的力, 单位长度电弧上的作用力	k ——比例常数, 系数
G ——发电机	k_c ——铁心叠片填充系数
H ——磁场强度, 铁心部分磁场强度	L ——电感
Δ ——螺管电磁铁颈部的高度, 行程, 位移, 触头厚度, 线圈高度	l ——线圈长度, 导体长度, 距离, 磁路长度, 双金属长度
	l_A ——电弧长度
	l_c ——铁心长度

- M ——弯矩, 吸引力矩
 M ——电动机
 M_f ——反作用力矩
 m ——质量, 系数, 穿出磁极侧面的磁力线所占的高度, 电磁铁重量
 N ——线圈的匝数
 n ——系数, 设计变量个数, 磁路计算中铁心分段数, 短弧段数, 双金属片叠片数
 n_{ds} ——断口数
 P ——线圈功率, 功率
 P ——刀开关, 转换开关
 P ——导体横截面的周长, 瞬时功率, 极对数, 气体压强, 系数, 比值, 过载系数
 P_c ——铁心的磁滞和涡流损耗, 单位重量的铁心损耗
 P_N ——额定功率
 P_0 ——电弧单位长度上散出的功率
 P_0 ——临界过载倍数
 QA ——起动按钮
 R ——电阻, 线圈电阻, 磁阻
 R_0 ——周围介质温度为 θ_0 时线圈电阻
 R_{0m} ——最高介质温度时热态下的线圈电阻
 R_i ——电源内电阻
 R_f ——触头接触电阻
 R_m ——磁阻
 R_0 ——气隙磁阻
 r_c ——铁心半径
 R_d ——分磁环电阻
 R_{d0} ——电弧单位长度的电阻
 R_{fz} ——非工作气隙的磁阻
 T ——时间常数, 转矩
 T ——变压器
 T_L ——负载转矩
 T_m ——最大转矩
 T_N ——额定转矩
 t ——时间
 t_c ——触动时间
 t_d ——运动时间, 动作时间
 t_p ——可返回时间
 t_H ——临界时间
 t_{xh} ——灭弧时间
 U, u ——电源电压
 U_ϕ ——相电压
 U_k, u_k ——电弧电压
 u_{kmax} ——电弧电压最大值
 u_{kf} ——恢复电压
 u_{xh} ——灭弧电压
 U_{g0} ——电流过零瞬间工频恢复电压
 U_f ——接触电压降
 U_{ya} ——阳极电压降
 U_{yi} ——阴极电压降
 U_{z0} ——弧柱电压降
 U_0 ——气隙磁压降
 U_H ——电动机临界电压
 U_{jfo} ——相应电流过零瞬间的起始介质恢复强度
 V ——体积, 电磁铁体积
 v ——比值, 螺管电磁铁挡铁高度
 v_k ——电弧运动速度, 电弧平均运动速度
 W ——功, 磁场能量, 稳压管
 W_k ——电弧能量
 W_y ——拟定功
 X ——继电器输入量, n 个分量的列向量相当于 n 维空间中的一个点, 分磁环的磁抗
 X_s ——系统的电抗
 X_c ——继电器的动作值
 X_f ——继电器的返回值
 x ——位移
 Y ——继电器输出量
 y ——目标函数, 短路点
 α ——线膨胀系数, 复形法反射系数, 角度
 α_c ——比热容温度系数
 α_m ——电阻温度系数
 β ——触头开距, 角度, 窗口高度与宽度之比, $\beta = h/A$
 β_c ——系数
 γ ——振幅系数
 $\gamma_{i,j}$ ——伪随机数
 δ ——工作气隙, 厚度
 δ_0 ——初始气隙
 δ_z ——最终气隙

δ_{fs} ——非工作气隙

δ_f ——磁分路与极靴间气隙, 缝宽

Δ ——线圈厚度, 吸盘电磁铁窗口高度, 垫片厚度, 极极之间距离

Δ_s ——盆边厚度

ΔP_k ——变压器短路损耗

ϵ ——铁心截面厚度与宽度之比, 应变, 给定的很小正数

η ——螺管电磁铁挡铁高度, 螺管电磁铁动铁心伸入线圈的深度

θ ——温度

θ_0 ——周围介质温度

θ_{rs} ——熔点温度

θ ——电弧热时间常数

λ ——热导率, 螺管电磁铁铁心伸入线圈的深度, 螺管电磁铁挡铁高度, 感应电动机最大转矩与额定转矩的比值

λ_s ——比漏磁导

Λ ——磁系统总磁导

Λ_0 ——非工作气隙磁导

Λ_c ——导磁体磁导

μ ——磁导率, 双金属片的温曲率

μ_0 ——真空中的磁导率

ξ ——E型铁心边柱截面与中柱截面之比

ρ ——电阻率, 曲率半径, 密度

ρ_0 ——0℃时的导体电阻率

ρ_τ ——温升为 τ 时的导体电阻率

ρ_k ——电弧电阻率

σ ——漏磁系数, 应力

τ ——温升

τ_w ——稳定温升

Φ ——磁通

Φ_0 ——通过铁心颈部的磁通, 无分磁环时衔铁吸合位置的铁心磁通

Φ_c ——铁心磁通

Φ_f ——释放磁通

Φ_s ——剩磁磁通

Φ_w ——稳定磁通

Φ_s ——工作气隙磁通

φ ——功率因数角, 电流与电压相位角, 湿度

ψ ——电流合闸相位角, 短路产生瞬间的合闸相位角, 相角差

ω ——电源角频率

目 录

主要符号表

绪论	7
第一章 低压配电线路与用电设备中的几个问题	5
§ 1-1 概述	5
§ 1-2 短路电流的分析与计算	7
§ 1-3 系统对开关电器的要求	15
§ 1-4 配电线路与用电设备的保护	18
§ 1-5 保护特性的配合	23
第二章 控制电器	27
§ 2-1 概述	27
§ 2-2 控制继电器	27
§ 2-3 双金属元件的计算基础	39
§ 2-4 接触器	49
第三章 配电电器	60
§ 3-1 概述	60
§ 3-2 熔断器	60
§ 3-3 低压断路器	72
§ 3-4 开关机构的分析与力的计算	81
§ 3-5 回路电动斥力的计算	87
第四章 触头与灭弧系统	90
§ 4-1 概述	90
§ 4-2 闭合工作的触头	91
§ 4-3 载流情况下触头的闭合	94
§ 4-4 载流情况下触头的分断	95
§ 4-5 触头参数的选择与计算	98
§ 4-6 灭弧装置	101
§ 4-7 灭弧系统的计算	107
第五章 电磁铁的设计与计算	113
§ 5-1 概述	113
§ 5-2 电磁铁结构形式的选择	115
§ 5-3 直流电磁铁的设计	123
§ 5-4 交流电磁铁的设计	135
第六章 电磁铁的优化设计	149
§ 6-1 概述	149
§ 6-2 非线性规划	153
§ 6-3 螺管电磁铁的优化设计	164

§ 6-4 直流电磁铁吸力特性的数值计算	169
§ 6-5 给定吸力特性的电磁铁优化设计	174
附录一 螺管电磁铁气隙磁通 Φ_0 计算公式的推导	181
附录二 螺管电磁铁优化设计 (例 6-5) 源程序	183
第七章 低压电器试验技术	186
§ 7-1 概述	186
§ 7-2 温升试验	187
§ 7-3 绝缘试验	193
§ 7-4 接通与分断能力试验	196
§ 7-5 短时耐受电流能力试验	203
§ 7-6 动作特性试验	204
§ 7-7 寿命试验	207
参考文献	210

绪 论

一、低压电器在国民经济建设中的作用与地位

随着科学技术的不断发展,社会生产、生活等各方面对能源的消耗越来越多。在各种能源中又以电能的使用最为广泛,这是由于电能的使用极为方便。电能宜于大量生产、集中管理和自动控制,而且电能的传输损耗小,可以远距离地输送,所以世界各国都以电能的产量表征国民经济的生产水平。

电能的生产与传输均采用高电压,而对电力的使用,却大多数是低电压。这无论是在工业、农业、交通运输业、国防、文教、商业及人民生活设施等用电部门都不例外。据统计,发电厂生产的电能约有80%以上是通过转换为低压电后而使用的。电能的应用大多数是将电能转变为机械能和热能等。例如用电动机将电能转换为机械能去带动机械负载,用电炉加热工件等。而对于电网、电机及其他设备进行转换、控制、保护和调节都要依靠各种电器来完成。根据60年代的统计,每生产1000kW容量的发电设备,需要生产4000件以上的各类低压元件与之配套。由于生产自动化程度的不断提高,按80年代的统计,今后每生产1000kW容量的发电设备,需9000~10000件低压电器元件相配套,还需生产低压电器成套装置40台。不仅对低压电器产品的数量有日益增长的要求外,对产品的性能、质量、品种等要求也越来越高。

二、低压电器发展概况

电能的发明与使用已有一百多年的历史,19世纪中叶电能应用初期,依靠手动的刀开关和熔断器就能满足当时控制与保护的要求。以后开始使用直流电动机做为机械的动力传动,为了调速的需要又出现了控制器和磁场变阻器。由于电话的发明与使用,出现了电话继电器等元件,电器开始由手控逐步进入自动电器。

本世纪以来,发明了三相交流输电线路,电力使用的范围不断扩大,电网的容量也相应增加,对供电电网运行与保护的要求也越来越高。为此发展了低压断路器。随着由单台电动机的电力拖动逐渐发展为多台电动机的运行,由手动操作进入自动的远距离的和频繁的操作,于是发展了接触器、起动器和各种继电器等自动电器。电器基础理论逐步建立,低压电器在结构原理、材料、容量、性能与品种方面又有了发展。

50年代以后,由于生产和科学的进步,电网容量日益扩大,对电源质量与可靠性供电的要求又有了提高,同时对一系列的低压电器也提出了新的要求。例如,对1500A的框架式低压断路器,50年代要求开断能力仅为20kA,而到了70年代提高到40kA。又如对有填料的熔断器的最大额定分断能力,50年代仅要求50~70kA,70年代则要求提高到100~200kA。对于控制电器方面的接触器,机械寿命由50年代的数十万次,提高到70年代的上千万次等。

此外,对于低压电器的性能要求也逐步提高。例如,对低压断路器、熔断器,要求它们的保护特性的分散性小,稳定性好,保护特性间的配合合理,工作可靠。70年代后,在小容量低压断路器基础上发展了漏电保护断路器,它作为人身触电的保护和防火的保护,大大提高了用电的安全性。

由于计算机的发展,对各个技术领域都带来了巨大的影响,低压电器也不例外地利用计算机及计算技术,使电器的研究与设计进入了一个新阶段。无论在电器的电磁系统计算、温升特性计算、电路开断特性计算、触头灭弧系统计算和利用微电子技术进行电器参数的测试,以及特殊测试设备的研究等方面都已成为国内外电器研究的重要课题,很多方面都已取得很大的进展。

目前,低压电器的发展特点是:

(一) 提高低压电器的技术参数

1. 提高额定电压

50年代我国低压电器标准规定:交直流电压为1000 V及以下者属低压电器。例如由于采矿工业的需要,60年代我国将交流电压等级由380 V提高到660 V,70年代又提高到1140 V,使现代矿井的深度与长度进一步增加,供电容量也不断增加。另外,随着硅整流与晶闸管整流装置的容量与使用范围的不断提高与扩大,1985年我国修订的低压电器标准规定:交流电压为1200 V、直流电压为1500 V及以下者属低压电器。目前,有关国际标准(IEC标准)规定:交流电压为1000 V、直流电压为1500 V及以下者属低压电器,从发展趋势看,低压电器的额定电压有可能进一步提高。

2. 提高额定电流

由于用电设备功率日益增大,电器的额定电流也相应增大。例如,我国70年代的低压断路器标准中,最大额定电流为4000 A。1985年修订的新标准已将最大额定电流提高到12500 A,相应其他电器元件额定电流等级,也在逐步增加。

3. 提高通断能力

用电设备的功率增大后,除采用大容量的单台变压器供电外,也采用多台配电变压器并联供电。回路额定电流增大后,相应回路的短路电流也增大,它对电器的分断能力也提出了更高的要求。目前国外的交流420 V低压线路中,短路电流的有效值可达200 kA。因此,对一些低压电器的分断能力提出了新的要求。

4. 提高电器产品的可靠性

提高低压电器产品的工作可靠性是电器的发展方向之一。例如,小容量开关、继电器触点转换工作时出现的失误;熔断器由于熔体材料性能随时间老化,使时间—电流特性变化;漏电保护断路器触电保护的偶然失灵等均会造成事故的扩大。可靠性技术问题的研究已扩大到许多领域。

5. 提高寿命

为了提高产品的质量,提高产品的寿命有重要意义,对于操作特别频繁的电器,如接触器、控制继电器、主令电器等,要求它们的机械寿命可高达1000~3000万次,相应它们的电寿命也要求高达数百万至上千万次。

(二) 提高低压电器的经济性能

提高产品质量与缩小产品的体积,降低产品的重量与成本是低压电器的发展方向。由于新结构、新工艺及新材料的应用,电器的体积与安装尺寸逐渐减小,因而成套电器设备的尺寸与重量也趋于减小。

在产品的结构设计与安装方式的设计中,趋向发展组装方便、便于大量生产、成本低的产品,同时应尽量降低产品的安装、运行与维修等方面的费用。

产品标准的国际化是一项十分重要的政策。过去我国的低压电器标准与国际通用标准有不少差别，近年来我国修订的一系列电器标准均与国际标准相协调，它有利于提高我国低压电器的技术和经济性能，有利于进出口贸易和产品的相互代用。

(三) 发展与使用新材料和新工艺

电器元件性能的优劣在很大程度上决定了使用的材料及其加工工艺。例如开关电器的通断能力与使用的触头材料和工艺密切相关。新的优质触头材料，可提高开关电器的分断能力和电寿命。材料与工艺的研究，对产品的性能与质量是相当重要的，因此必需加强这方面的工作。

(四) 加强基础理论与应用技术的研究

电器性能的改进及新型电器的出现都是与科学研究分不开的。目前电器基础理论的研究比较广泛，但重点有以下几个方面：

1. 电磁机构的研究 如电磁铁磁场分布，衔铁在运动过程中磁场的变化以及电磁铁吸力的精确计算；电磁铁动特性的精确计算；利用电子计算机对电磁机构进行精确计算和最优化设计等。

2. 电接触理论的研究 如研究电接触的物理化学过程；接触时的热、电、磁及半导体等各种效应；接触电阻的物理本质及其计算；触头对电弧的作用；触头表面弧根移动时金属斑点对电子放射的影响等。

3. 电弧理论的研究 如研究触头分离时引弧与熄弧的理论；气体放电的各个过程；极旁和弧柱理论；剩余电流热积累；电击穿和热击穿的过程；电弧的动、静特性；电弧的能量与过电压；电弧特性的工程计算；电弧的数学模型等。

4. 电器的发热和电动力理论 如研究在大电流和强交变磁场下，载流导体间产生的集肤效应、邻近效应和巨大的电动力；电器中快速电动斥力机构的计算等。

新技术在低压电器领域的应用方面主要有：电子计算机在电器设计中的应用；低压电器中不同限流原理技术的应用；无电弧转换技术的应用；真空断开技术的应用；强电流转换技术的应用以及低压电器试验技术的应用等。

三、低压电器的主要类别

低压电器的用途广泛，种类很多，从应用场所提出的不同要求可以分成配电电器与控制电器两大类。配电电器主要用于配电系统中，系统对配电电器的要求是在正常工作及在故障工作情况下，工作可靠，有足够的热稳定与动稳定性。这类电器有：刀开关、断路器、熔断器及继电器。控制电器主要用于电力拖动控制系统和用电设备中，对控制电器的要求是工作准确可靠、操作效率高、寿命长等。这类电器有：接触器、控制继电器、主令电器、起动器、电磁铁等。

低压电器按工作条件主要分为

1. 一般用途的低压电器 可使用于一定的海拔高度、正常工作环境温度与湿度下、安装在一定倾斜度内、使用场合无显著振动和冲击、无爆炸危险、无腐蚀金属、无破坏绝缘的气体与尘埃和无雨雪侵袭的地方。

2. 牵引低压电器 用于电气机车中并有震动、倾斜、冲击等工作条件下。

3. 矿用低压电器 用于矿井下，主要要求是防爆。

4. 航空低压电器 用于飞机中，主要要求是电器在任何位置均能可靠地工作，耐振动和

耐冲击，体积小和重量轻。

5. 船用低压电器 用于船舶中，主要要求是可在较大的倾斜条件下工作，耐振动和耐冲击，耐潮和防盐雾等。

本课程主要讨论一般用途的低压电器。一般用途的低压电器按产品可分为以下十三大类：

1. 刀开关和转换开关；
2. 熔断器；
3. 断路器；
4. 接触器；
5. 控制器；
6. 控制继电器；
7. 主令电器；
8. 起动器；
9. 电阻器；
10. 变阻器；
11. 调节器；
12. 电磁铁；
13. 其他——包括触电保护器、信号灯与接线盒等。

四、本课程的任务

本课程是电器专业主要专业课之一，其任务是在学习有关基础课——电器理论基础之后，学习有关低压电器的工作要求、工作原理、技术参数、结构性能分析、设计计算方法和试验研究的基本知识。通过讲授、实验以及习题作业等教学环节，应达到以下要求：

1. 了解配电线路及用电设备对低压电器的基本技术要求及低压电器的主要技术参数；
2. 熟悉主要典型电器的结构原理及特性参数；
3. 掌握低压电器的基本设计计算方法；
4. 掌握电磁铁的优化设计的基本方法；
5. 掌握低压电器试验的目的要求以及基本方法。

第一章 低压配电线路与用电设备中的几个问题

§ 1-1 概 述

在低压线路中应用着各种类型的低压电器，它们对配电线路或用电设备起保护、控制或调节作用。图 1-1 所示为一工矿企业的典型配电线路，线路上装置着各种低压电器，这个线路分为三个区间：供电变压器至中央配电盘母线称主线路；中央配电盘母线至车间动力配电盘称分支线路；动力配电盘至负载（一般为电动机）称馈电线路。在这三个区间各装置了一些低压电器。通常，前面两个区间装置的低压电器大多属于配电电器，如图中的断路器 ZK_1 和 ZK_2 ，刀开关 P_1 和 P_2 等。后面一个区间的低压电器，如接触器 C 、热继电器 RJ 都是用于控制和操作负载，属于控制电器，但这个区间也装有配电电器，如熔断器 RD 。断路器 ZK_1 和 ZK_2 是一种多功能的保护电器，当线路呈现过载、短路或欠电压等故障情况时，能自动分断故障线路，它也可以用于不频繁地接通和分断电力线路。刀开关 P_1 和 P_2 用于维修线路时隔离电源用，它有明显的断口以保证维修工作的安全进行。接触器 C 是一种应用最广泛的控制电器，它是一种远距离操作的电器，用于在正常工作条件下频繁地接通或分断线路。接触器也能分断被控制对象处于非正常工作条件下的线路，但不能分断短路电流，所以当图 1-1 中电动机 M_1 的接线端处发生短路时，要依靠熔断器 RD 进行保护，这时短路电流通过熔断器的熔体，它本身产生的热量使熔体熔化而分断短路电流。热继电器 RJ 用作电动机 M_1 的过载保护。

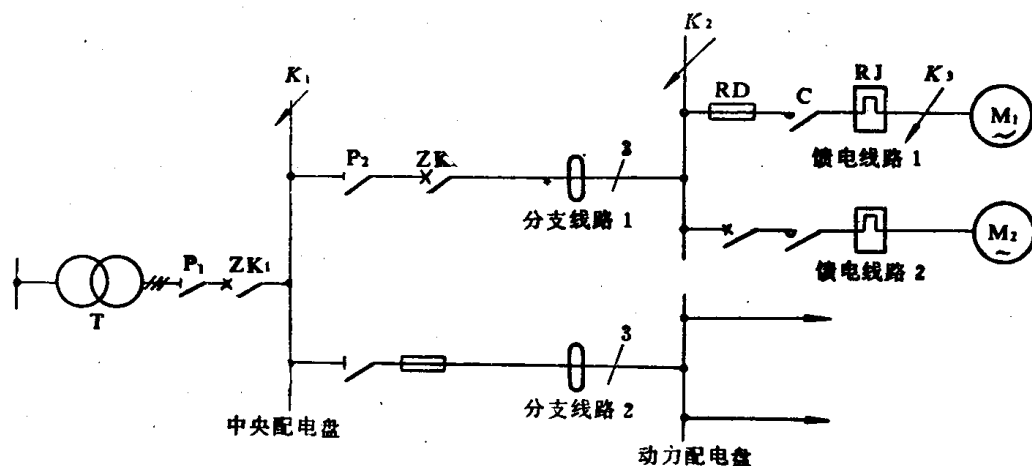


图 1-1 工矿企业典型配电线路

T—供电变压器 ZK_1 、 ZK_2 —低压断路器 P_1 、 P_2 —刀开关 RD —熔断器
 C —接触器 RJ —热继电器 M_1 、 M_2 —电动机

图 1-2 是由接触器 C 和热继电器 RJ 组成的控制线路，用于控制和保护笼型电机。图中 QA 和 TA 为起动和停止按钮，是一种用来下达操作指令的主令电器。按下起动按钮 QA ，接触器 C 线圈通电，它的操作电磁铁带动触头系统，主触头接通了主回路，使电动机开始起

动。并联在按钮 QA 两端的常开联锁触头 C 闭合,使松开起动按钮后,接触器线圈回路自锁。当运行中的电动机发生过载时,过载电流通过串联在主回路中的热继电器的 RJ 热元件,热元件发热到足够温度使双金属片发生弯曲,推动串联在接触器线圈回路中的常闭触头,接触器电磁铁释放而切断电动机电源。这时即使热继电器触头自动复位,因并联在按钮 QA 两端的接触器联锁触头已断开,主回路不能接通。另外,在电动机正常运转时,按下按钮 TA,可使电动机停转。

从图 1-1 和图 1-2 线路中各种电器的作用来看,低压电器主要用作配电线路和用电设备的保护和控制。在线路中,不同的电器所承担的任务是不同的。对能够开断短路电流的电器,例如断路器,接通和分断短路电流是它的主要任务;对用于控制电动机的控制电器,例如接触器,它的工作与电动机工作状态有关。由图 1-2 的线路可见,当接触器主触头闭合,电动机开始起动,接触器接通的是电动机的起动电流,它一般是电动机额定电流的 6~7 倍,而当电动机带额定负载正常运行后,断开主触头,则接触器分断的是电动机的额定电流。由于通断线路的任务不同,因此对不同的低压电器的技术要求也各不相同。

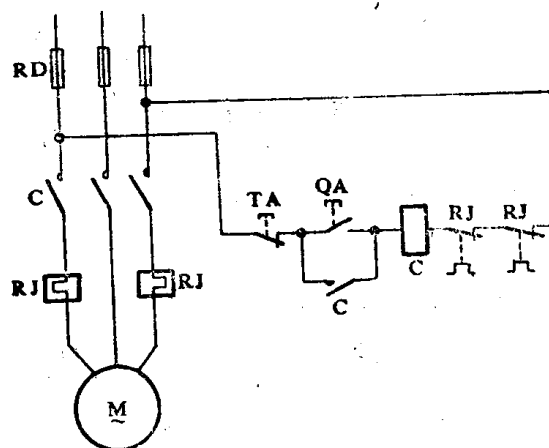


图1-2 控制和保护笼型电动机的线路

QA、TA—起动和停止按钮 C—接触器

RJ—热继电器 RD—熔断器 M—电动机

一些低压电器的技术要求与使用线路的工作要求有关,例如与配电线路的短路电流有关。所谓短路是指相与相之间通过较小阻抗的一种非正常短接或通过电弧的短接,或相与地之间的连通。在三相配电线路中,短路的基本形式有三相短路、两相短路和单相短路,见图 1-3 a、b、c。其中单相短路发生在中性点直接接地的电力系统或低压三相四线制的电力系统中。在 400 V 以下的低压供电系统,由于电源中性点的接地电阻 R_d 的存在(见图 1-3 c),限制了单相接地短路电流,使单相短路电流不超过三相短路电流。两相短路电流值通常小于三相短路电流值。所以讨论低压电器技术要求时,是以三相短路的故障考虑的。

发生短路时,由于线路总阻抗减小,短路电流超过该线路的额定电流许多倍,大容量的低压配电系统中,短路电流可能达到几万到几十万安培。短路电流产生的巨大热效应和电动效应会使导体变形、绝缘破坏,短路回路中的电气元件损坏。同时短路也引起线路电压降低,尤其是靠近短路点的地区影响更大,造成用电负载或供电区域停电,甚至影响整个电力系统的稳定运行。为了减轻短路的影响,保证电气装置安全可靠地运行,应尽快地按需要切除线路的故障部分。不少低压电器就是为了能正确反映短路故障,可靠地分断短路电流而设计制造的(如断路器、熔断器),至于装置在线路上、不担负分断短路电流任务的电器,也要求在短路故障的短暂时间内,能经受住短路电流的冲击,不受破坏。

本章通过对低压配电线路与用电设备中的几个问题的阐述,来介绍低压电器的几个主要技术要求。这些问题是:

1. 短路电流的分析与计算;
2. 系统对开关电器的要求;

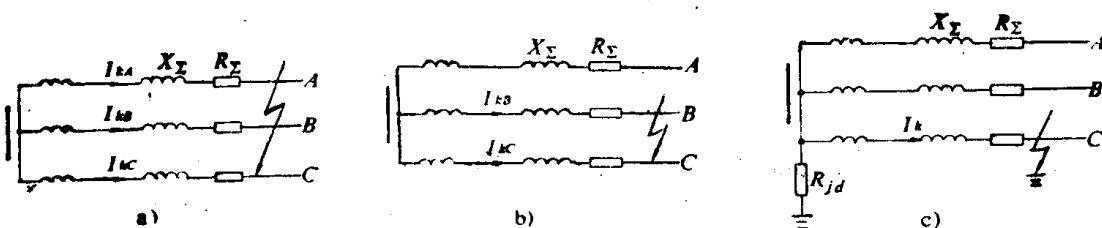


图1-3 短路的几种形式

a) 三相短路 b) 两相短路 c) 单相短路 R_{Σ} —电阻 X_{Σ} —电抗 R_{jd} —接地电阻

3. 低压电器的各种保护功能和保护特性。

§ 1-2 短路电流的分析与计算

一、低压线路的短路电流

实际运行的配电系统，其容量和阻抗都有一定的数值。因此，当发生短路时，系统的端电压相应地改变。只有在无限大容量的配电系统中，系统阻抗为零，才能认为系统电压不随电流变化。对于1kV以下的低压线路，如果系统的阻抗不超过短路回路总阻抗的5%~10%，便可以忽略系统的阻抗，并认为降压变压器高压侧电压，即系统的端电压不变。

设短路产生前的负载电流为零，短路时整个线路阻抗为 $Z = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}$ ，电源容量为无限大，则单相短路的过程，相当于电感性电路接通电源的过程，见图1-4 a。由电工原理中对电感性电路暂态过程分析可知，若电源电压为 $u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi)$ ，则短路电流 i 由周期分量 $i_{\sim}$ 和非周期分量 i_{-} 两部分组成，见图1-4 b，可用下式表示：

$$i = i_{\sim} + i_{-} = \sqrt{2} I_{\sim} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}} \right\} \quad (1-1)$$

式中 $I_{\sim}$ ——短路电流周期分量有效值， $I_{\sim} = \frac{U}{|Z|}$ ，

ψ ——短路产生瞬间的电压相位角；

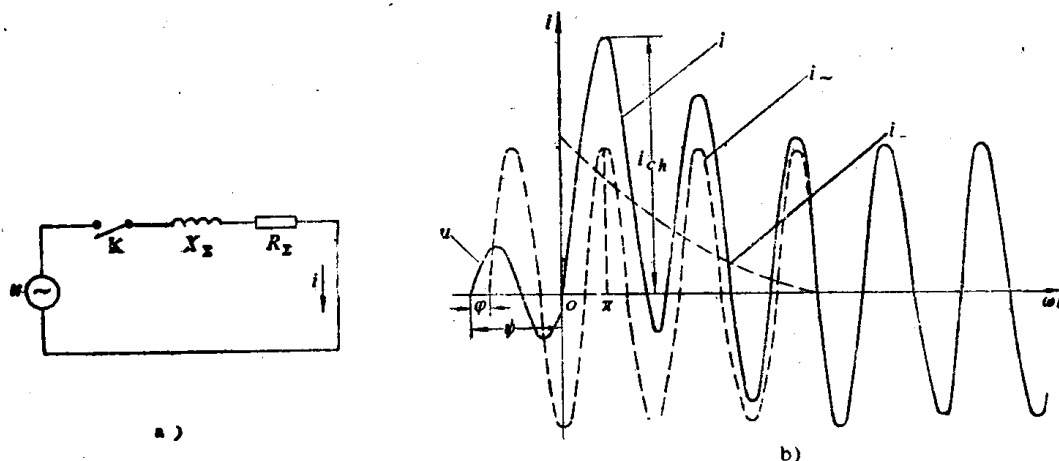


图1-4 单相短路的等效电路与电流波形

a) 等效电路 b) $\psi - \varphi = -\frac{\pi}{2}$ 时的电流波形

φ ——功率因数角, $\tan \varphi = X_E/R_E$;

ω ——电源电压的角频率;

T ——时间常数, $T = X_E/\omega R_E$ 。

由上式可知, 短路电流的非周期分量 i_- 与电压相位角有关, 当 $\psi - \varphi = -\frac{\pi}{2}$ 时, i_- 具有最大值, 并等于

$$i_- = \sqrt{2} I_{\sim} e^{-\frac{t}{T}}$$

这时周期分量为

$$i_{\sim} = \sqrt{2} I_{\sim} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

在这一条件下, 由图1-4 b 可知, 当发生短路后经半个周期 ($t = 0.01$ s), 短路电流的瞬时值将达到最大幅值 i_{ch} , i_{ch} 称为冲击电流, 它产生最大的机械效应。此时, 因短路电流的周期分量和非周期分量的方向相同, 故

$$i_{ch} = (1 + e^{-\frac{0.01}{T}}) \sqrt{2} I_{\sim} = K_{ch} \sqrt{2} I_{\sim} \quad (1-2)$$

式中 K_{ch} ——短路电流冲击系数, $K_{ch} = (1 + e^{-\frac{0.01}{T}})$ 。

K_{ch} 值的大小由时间常数 T 确定, 若线路中仅具有电抗 $X_E (R_E = 0)$, 则 $T = \infty$, $K_{ch} = 2$, 即短路电流非周期分量不衰减。若线路中仅有电阻 $R_E (X_E = 0)$, 则 $T = 0$, $K_{ch} = 1$, 即非周期分量不会产生。但在实际线路中, R_E 和 X_E 同时存在, $2 > K_{ch} > 1$ 。不同 X_E/R_E 或 T 值的短路电流冲击系数可由图 1-5 中曲线查取。

在三相线路中, 由于发生三相短路的瞬时, 各相的电压瞬时值不同, 所以各相的短路电流周期分量和非周期分量的初始值不同, 短路电流也不相同。如某一相具有最大的非周期分量起始值, 则冲击短路电流值将出现在这一相内, 而其他两相短路电流达到最大值, 将低于这个冲击短路电流值, 所以三相线路中, 仅

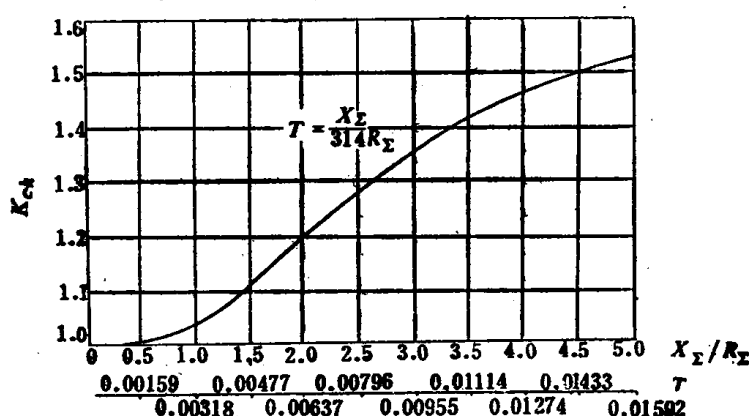


图1-5 K_{ch} 与 X_E/R_E 或 T 的关系曲线

在一相中可能出现最大冲击短路电流值。图 1-6 为由无限大容量系统供电的线路内, 发生三相短路时, 各相的短路电流波形。其中由于 A 相具有最大非周期分量起始值, 所以出现最大冲击短路电流值, 其他两相具有不同的非周期分量起始值, 短路电流幅值较低。但由于周期分量仅决定于电源电压和系统总阻抗, 所以各相的周期分量相等。

二、电力系统中各元件的阻抗

计算短路电流时, 必须知道电力系统中各元件的阻抗值。在高压线路的短路电流计算中, 一般只考虑主要元件的电抗, 如同步电机、电力变压器、电抗器、架空线路及电缆的电

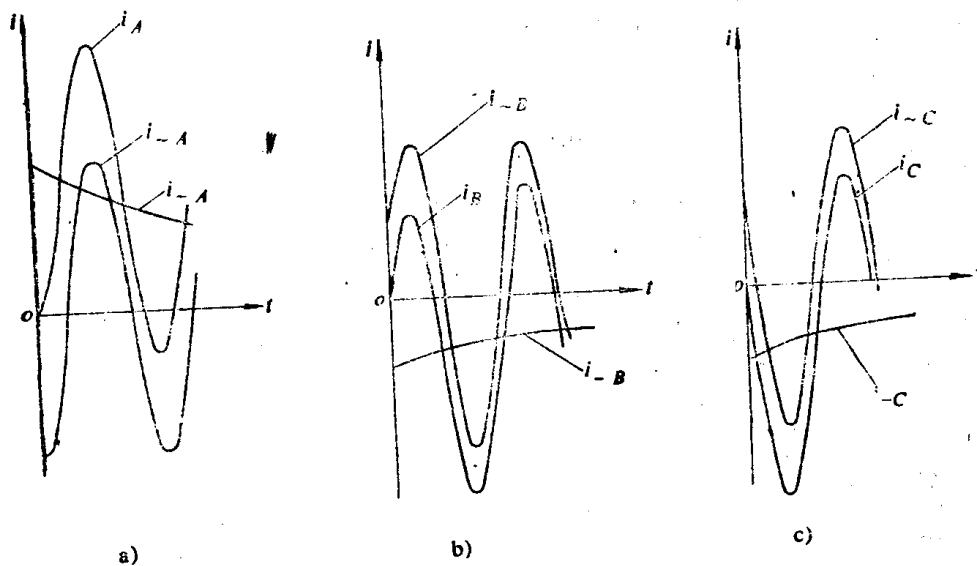


图1-6 由无限大容量系统供电的线路内，发生三相短路时，各相的电流

a) A相电流 b) B相电流 c) C相电流

抗。各主要元件的电阻仅在电阻大于总电抗值的三分之一时才计入。在低压线路的计算中，不仅要考虑各主要元件的电阻和电抗，并且要考虑不太长的母线和电缆的阻抗、电流互感器的阻抗、低压断路器的过电流线圈的阻抗和开关触头的接触电阻等。通常，为了简化计算程序，使短路电流计算值偏于安全，允许不考虑占回路总阻抗值不超过10%的元件。因此一般情况下，只需计及馈电电缆、长度大于10m的母线及300/5A以下的电流互感器的阻抗值。

(一) 配电系统的电抗计算

一般计算低压线路短路电流时，可以认为高压侧供电电源有无限大的容量，因而可将高压系统的阻抗略去不计，但在较精确的计算中应计入系统阻抗。由于电力部门往往不对用户提供系统阻抗的数据或系统容量，而仅给用户提提供馈电线路高压受端的系统容量，此时系统的阻抗可按以下数值方程计算

$$X_s = \frac{U_N^2}{S_s} \times 10^3 \quad (1-3)$$

式中 X_s ——系统的电抗，单位为 $m\Omega$ ；

U_N ——线路的额定线电压有效值，单位为kV；

S_s ——系统的短路容量，单位为MVA。

(二) 配电变压器阻抗值的计算

计算变压器的阻抗值时，必须首先知道制造厂提供的变压器有关的技术参数，并按下式换算到变压器二次侧的阻抗值。

变压器的有效电阻按下列数值方程计算

$$R_T = \frac{\Delta p_k U_N^2}{S_{NT}^2} \times 10^3 \quad (1-4)$$

变压器的电抗按下列数值方程计算

$$X_T = \frac{10U_N^2 \sqrt{\%U_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{10S_{NT}}\right)^2}}{S_{NT}} \times 10^3 \quad (1-5)$$

上两式中 R_T , X_T ——变压器的电阻和电抗, 单位为 $m\Omega$;

ΔP_k ——由制造厂提供的变压器短路损耗, 单位为 W ;

$\%U_k$ ——由制造厂提供的变压器短路电压百分比;

U_N ——变压器二次侧的额定电压, 单位为 kV ;

S_{NT} ——变压器的额定容量, 单位为 kVA 。

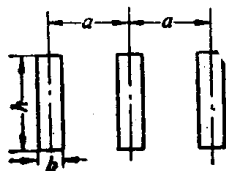
(三) 架空线、电缆和低压母线阻抗值的确定

高低压线路架空线、电缆线每公里的电抗值, 可取表 1-1 所示的平均值。当计算用户低压侧短路电流时, 应知道系统的短路容量, 同时还必须计及系统到用户受端高压侧的高压架空线或电缆的电抗值。高压线路的有效电阻常可略去不计。

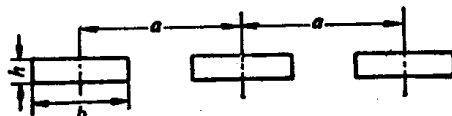
表 1-1 各种线路每 km 电抗的平均值

线 路 种 类	电 抗 $X_L / m\Omega \cdot km^{-1}$
10~115kV 的架空线	400
1kV 以下的架空线	300
35kV 的电缆线路	120
3~10kV 的电缆线路	70~80
100V 以下的电缆线路	60~70

在低压装置中, 三相矩形母线通常放在同一水平面内作垂直布置或水平布置, 见图 1-7, 此时母线的电抗可由下面数值方程近似计算



a)



b)

图 1-7 矩形截面母线的布置

a) 垂直布置 b) 水平布置

$$X' = 0.145 \lg \left(\frac{4a_j}{h} \right) \quad (1-6)$$

式中 X' ——单位长度矩形母线的电抗, 单位为 $m\Omega/m$;

h ——矩形母线的高度, 单位为 m ;

a_j ——各相母线之间几何平均距离, 单位为 m 。

若各相母线之间距离分别为 a_{12} 、 a_{23} 、 a_{31} , 则母线平均距离 $a_j = \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{31}}$ 。若中间相与相邻相距离相等, 皆为 a (见图 1-7), 则 $a_j = \sqrt[3]{a \cdot a \cdot 2a} = \sqrt[3]{2} a = 1.26 a$ 。

低压母线、电缆的单位长度电阻值可按下面数值方程计算

$$R' = \frac{1}{\gamma_e A} \times 10^3 \quad (1-7)$$

式中 R' ——低压电线、电缆的单位长度电阻值, 单位为 $\text{m}\Omega/\text{m}$;

A ——导线的有效截面, 单位为 mm^2 ;

γ_θ ——导线在给定温度 θ (单位为 $^\circ\text{C}$ 时) 的电导率, 单位为 $\text{m}/\Omega\cdot\text{mm}^2$ 。

常用各种载流导体在不同工作温度下的 γ_θ 值见表 1-2。

低压电流互感器和开关触头的接触电阻由制造厂提供。

表 1-2 载流导体的电导率 γ_θ (单位为 $\text{m}/\Omega\cdot\text{mm}^2$)

工作温度	20 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$	65 $^\circ\text{C}$	80 $^\circ\text{C}$
铜	57	51	48.2	46.1
铝	33.9	30.3	28.7	27.3
适用范围		绝缘导线	母线	油浸纸绝缘电缆

三、三相短路电流的计算

计算三相短路电流时所用的计算线路图是一种简化了的单线图(见例题), 图中仅画出与计算短路电流有关的元件, 并注明各元件的有关参数, 如变压器的额定容量和短路电压百分比, 线路长度和每公里的电抗阻, 母线的长度和截面等, 有时为了便于计算, 图中各元件还按顺序注上编号。

低压线路三相短路电流周期分量有效值可按下式计算

$$I_{-}^{(3)} = \frac{U_N}{\sqrt{3} Z} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_E^2 + X_E^2}} \quad (1-8)$$

式中 $I_{-}^{(3)}$ ——三相短路电流周期分量有效值;

U_N ——线路电压;

Z 、 R_E 、 X_E ——给定短路点的总合成阻抗、电阻及电抗。

低压线路的总合成电阻与电抗为各元件电阻与电抗的综合 $X_E = \Sigma X$, $R_E = \Sigma R$ 。当低压线路中有两台降压变压器并联运行时, 就必须计算两并联支路的等效阻抗。见图 1-8 a 的两并联支路, 画出等值电路如图 1-8 b。该电路电阻和电抗分别为 R_1 、 X_1 和 R_2 、 X_2 , 其合成阻抗为

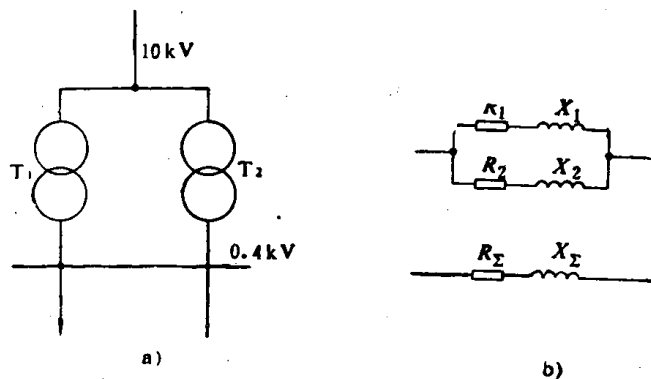


图 1-8 并联阻抗的变换

a) 并联支路 b) 等值电路

$$\left. \begin{aligned} R_E &= \frac{R_1(R_2^2 + X_2^2) + R_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \\ X_E &= \frac{X_1(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$