

佟为明 翟国富 等编著

低压电器继电器 及其 控制系统

哈尔滨工业大学
出版社

低压电器继电器及其控制系统

佟为明 翟国富 等编著

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 提 要

本书分三编,共有十二章。第一编为低压电器,介绍低压线路及其对低压电器的基本要求,低压配电电器,低压控制电器;第二编为继电器,介绍继电器的一般概念,电磁式继电器,舌簧继电器,带永久磁铁的继电器,双金属继电器,时间继电器,特种继电器;第三编为电器控制系统,介绍继电器接触器控制系统,可编程控制器。另外,在附录中还给出了可编程控制器逻辑指令表及功能指令表。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及机电一体化专业的高年级本科生或研究生的教材和教学参考书,亦可供从事电器开发、设计、研究的工程技术人员参考。

低压电器继电器及其控制系统

Diyadianqi Jidianqi jiqi Kongzhi Xitong

佟为明 翟国富 等编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行
地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 600 千字

2000年5月第1版 2000年5月第1次印刷

印数 1~3 000

ISBN 7-5603-1406-6/TM·25 定价 28.00 元

前 言

低压电器、继电器作为量大面广的基础元件,几乎在所有工业领域都获得了广泛的应用,其控制系统亦广泛应用于各种生产机械的控制或过程控制中。目前,有关低压电器、继电控制线路或系统方面的书籍虽有一些,但大多是彼此分隔、互不联系,系统介绍继电器者则比较少。为此,很有必要编写一部融合低压电器、继电器及其控制系统的图书。

多年来,哈尔滨工业大学电器专业一直开设“低压电器、继电器及其控制系统”课程,并在这方面开展了一些科研工作。我们在总结教学经验和部分科研成果的基础上,首先编写了校内讲义,并将其立项为校级“九五”重点教材。本次根据原国家教委教学改革的精神,结合两年多的使用情况,经过修改和充实,编成此书。

本书将低压电器、继电器及其控制系统有机地融为一体,并重点突出了继电器部分。在编排体系上分为三编。第一编为低压电器,分三章,包括低压线路及其对低压电器的基本要求、低压配电电器、低压控制电器中的接触器。第二编为继电器,分七章,比较系统地介绍了继电器的一般概念、电磁继电器、舌簧继电器和带有永久磁铁的继电器,简要介绍了双金属继电器、时间继电器和特种继电器。该编以较大的篇幅阐述了国内现有电器书籍中较少涉及的继电器簧片柔度的计算方法和继电器机械特性的求解方法,以及目前应用越来越广的极化磁系统继电器的一系列问题。第三编为电器控制系统,分为继电器接触器控制系统和可编程控制器两章。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及机电一体化等专业的高年级本科生或研究生教材和教学参考书,亦可供从事电器开发、设计、研究的工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学电器教研室教授佟为明(博士)、副教授翟国富(博士)等编者,刘茂恺教授主审。书中第一编由翟国富编写,第二编由佟为明编写,第三编的第十一章由张文义编写,第十二章由王淑娟编写。

由于水平有限,加之编写比较仓促,书中不妥和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1999年10月

目 录

第一编 低压电器

第一章 低压线路及其对低压电器的基本要求

1.1 概述	1
1.2 短路电流的分析与计算	3
1.3 系统对开关电器的要求	7
1.4 配电线路与用电设备的保护	10
1.5 低压开关设备的电源系统	14
1.6 保护特性的配合	17

第二章 低压配电电器

2.1 概述	20
2.2 刀开关、熔断器式刀开关、组合开关	20
2.3 熔断器	23
2.4 低压断路器	35
2.5 断路器的机构	50

第三章 低压控制电器

3.1 概述	53
3.2 接触器	53
3.3 节电无噪声交流接触器	68

第二编 继电器

第四章 继电器的一般概念

4.1 继电器的定义、特性、参数与分类	71
4.2 对继电器的一般要求	75

第五章 电磁式继电器

5.1 电磁式继电器的构成及原理	83
5.2 继电器簧片柔度的计算	84
5.3 电磁式继电器的机械特性	102
5.4 典型电磁式继电器介绍	125

第六章 舌簧继电器

6.1 干式舌簧继电器	158
6.2 水银湿式舌簧继电器	170
6.3 铁氧体剩磁式舌簧继电器	171
6.4 典型舌簧继电器	173

第七章 带永久磁铁的继电器

7.1 概述	179
7.2 永磁材料的去磁曲线与回复线	179
7.3 永磁材料	183
7.4 永磁磁路的计算	187

7.5	条形永久磁铁的计算	197
7.6	关于永磁的磁导计算	204
7.7	极化继电器	207
7.8	磁保持继电器	213
7.9	磁电式继电器	219
7.10	永磁返回式继电器	222
7.11	极化磁系统的磁路计算	224
7.12	永磁的等效处理	230
7.13	用磁压模型分析极化磁系统的工作原理	236
第八章 双金属继电器		
8.1	概述	251
8.2	双金属元件的结构	255
8.3	条形双金属的工作特性分析	260
8.4	双金属温度继电器与双金属热继电器	262
第九章 时间继电器		
9.1	概述	265
9.2	电磁式时间继电器	265
9.3	机械式时间继电器	266
第十章 特种继电器		
10.1	高频继电器	268
10.2	高压继电器	268
第三编 电器控制系统		
第十一章 继电器接触器控制系统		
11.1	概述	269
11.2	基本控制逻辑	272
11.3	电器控制线路的设计方法	274
11.4	电动机的基本控制电路	278
第十二章 可编程控制器		
12.1	可编程控制器概述	292
12.2	可编程控制器的基本原理	295
12.3	可编程控制器的逻辑指令	310
12.4	可编程控制器的步进梯形指令	326
12.5	可编程控制器的功能指令简介	334
12.6	可编程控制器的应用	341
12.7	可编程控制器网络及通信	350
附录		
附录 A	可编程控制器逻辑指令表	361
附录 B	功能指令表	361

第一编 低压电器

第一章 低压线路及其对低压电器的基本要求

1.1 概述

低压电器是用于交流电压为 1 200 V、直流电压为 1 500 V 及以下的电路中起通断、保护、控制或调节作用的电器。低压电器分为低压配电电器和低压控制电器两大类。

低压配电电器主要用于低压配电电路(也称低压电网)或动力装置中对电路和设备进行保护以及通断、转换电源或负载的电器。

低压控制电器主要用于低压电力拖动系统对电动机的运行进行控制、调节与保护。图 1.1 所示为一工矿企业的典型配电线路,线路上设置了各种低压电器。这个线路分为三个区

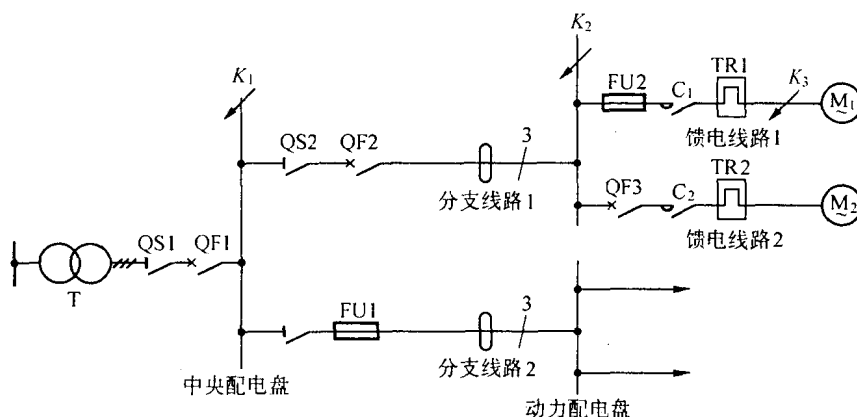


图 1.1 工矿企业典型配电线路

T—配电变压器;QF—低压断路器;QS—刀开关;FU—熔断器;
C—接触器;TR—热继电器;M₁、M₂—电动机

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 QF1 和 QF2、刀开关 QS1 和 QS2 等;后面一个区间的低压电器,如接触器 C、热继电器 TR 都是用于控制和操作负载的,属于控制电器。但这个区间也装有配电电器,如熔断器 FU。断路器 QF1 和 QF2 是一种多功能的保护电器,当线路出现过载、短路或欠电压等故障时,能自动分断故障线路,也可以用于不频繁地接通和分断电力线路。刀开关 QS1 和 QS2 用于维修线路时隔离电源,它有明显的断口,以保证维修工作安全进行。接触器 C 是一种应用最广泛的控制电器,也是一种远距离操

作的电器,用于在正常工作条件下频繁地接通或分断线路,不能分断短路电流。所以当图 1.1 中电动机 M_1 的接线端发生短路时,要依靠熔断器 FU 进行保护。即当馈电线路 1 的 K_3 点发生短路时,应使熔断器 FU2 动作, QF1、QF2 及 QF3 不动作。若分支线路 1 的 K_2 点发生短路时,应使 QF2 动作, QF1 不动作,以保证对分支线路 2 的正常供电。即当线路发生故障时,离故障点最近的保护电器动作,切除故障,以缩小停电范围,继续保持配电系统其他部分的正常供电,此称为选择性保护,能满足这一要求的电器称为具有选择性保护特性的电器。

图 1.2 是由接触器 C 和热继电器 TR 组成的控制线路,用于控制和保护笼型电动机。图中 PB 和 SB 为启动和停止按钮,是一种用来下达操作指令的主令电器。按下启动按钮 PB,接触器 C 线圈通电,它的操作电磁铁带动触头系统,主触头接通主回路,电动机开始启动。并联在按钮 PB 两端的常开联锁触头 C 闭合,使其松开启动按钮后,接触器线圈自保持通电状态。当运行中的电动机发生过载时,过载电流流过串联在主回路中的热继电器的 TR 热元件,热元件发热到足够温度,双金属片发生弯曲,使串联在接触器线圈回路中的常闭触头断开,接触器释放而切断电动机电源。另外,在电动机正常运转时,按下按钮 SB,可使电动机停转。

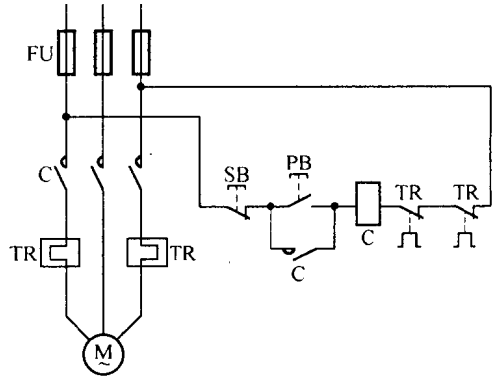


图 1.2 控制和保护笼型电动机的线路
PB、SB—启动和停止按钮;C—接触器;TR—热继电器;FU—熔断器;M—电动机

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,因此,对不同低压电器的技术要求也各不相同。

有些低压电器的技术要求与使用线路的工作要求有关,比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,或相与地之间的接通。在三相配电线路中,短路的形式有三相短路、两相短路和单相短路(见图 1.3)。其中

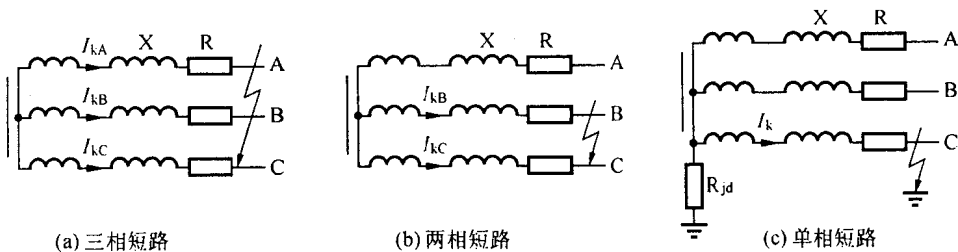


图 1.3 短路的几种形式

R_{jd} —接地电阻;R—电阻;X—电抗

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电力系统中。在 400 V 以下低压供电系统中,由于电源中性点接地电阻 R_{jd} 的存在,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。两相短路电流值小于三相短路电流值,故三相短路电流值最大。所以对低压电器的技术要求是以三相短路故障考虑的。

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很多倍,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力会使导体变形、绝缘破坏、短路回路中的电气元件损坏、系统误动作等。短路也引起线路电压降低,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。许多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、熔断器等)。对于设置在线路上,不担负分断短路电流任务的电器,则要求在短路故障的短时间内,能经受短路电流的冲击,不受破坏。

1.2 短路电流的分析与计算

一、低压线路短路电流的一般概念

实际运行的配电系统具有一定的容量及系统阻抗。当低压系统发生短路时,由于有限的容量及系统阻抗,使系统端电压下降。系统容量越大,阻抗越小,系统端变化越小(无穷大容量,零阻抗,端电压不变)。对于 1 000 V 以下的低压线路,当系统阻抗不超过短路回路总阻抗的 5% ~ 10% 时,则可以不考虑系统阻抗,认为系统端电压不变。

以单相短路为例。

设短路产生前的负载电流为零,短路线路阻抗 $Z = R + jX$, 系统容量为无限大,不计系统阻抗。单相短路相当于感性负载与电源接通(见图 1.4),电源电压为

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

φ ——短路产生瞬间的电压相位角(合闸相位角)。

则短路电流为

$$i = i_{\sim} + i_{\sim} \quad (1.1)$$

式中 i_{\sim} ——短路电流周期分量, $i_{\sim} = \sqrt{2}I_{\sim} \sin(\omega t + \psi + \varphi)$;

i_{\sim} ——短路电流非周期分量 $i_{\sim} = \sqrt{2}I_{\sim} \sin e^{-\frac{t}{T}}$;

$I_{\sim} = \frac{U}{|Z|}$, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$; $\sqrt{2}I_{\sim} \sin(\omega t + \psi + \varphi)$;

φ ——功率因数角, $\tan \varphi = \frac{X}{R}$;

T ——时间常数, $T = X/\omega R = \frac{L}{R}$ 。

由上式可知,短路电流的非周期分量 i_{\sim} 与短路瞬间电压相位角有关。当 $\psi - \varphi = \pi/2$ 时, i_{\sim} 达到最大值,即

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

在满足上述条件时,短路发生后经半个周期($\omega t = \pi$, 工频电路 $t = 0.01$ s),短路电流的瞬时值将达到最大幅值 I_{ch} (称之为冲击电流),这将产生最大的电动力(机械效应),如图 1.5 所示。

$$I_{ch} = \sqrt{2}I_{\sim} (1 + e^{-\frac{0.01}{T}}) \quad (1.2)$$

令

$$I_{ch} = K_{ch}\sqrt{2}I_{\sim}$$

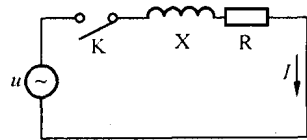


图 1.4 单相短路等效电路

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。 $1 < K_{ch} < 2$ 。

$$K_{ch} = \begin{cases} 2 & R=0, T=\infty \\ 1 & X=0, T=0 \end{cases}$$

不同 $\frac{X}{R}$ 的 K_{ch} 值由图 1.6 中曲线查取。

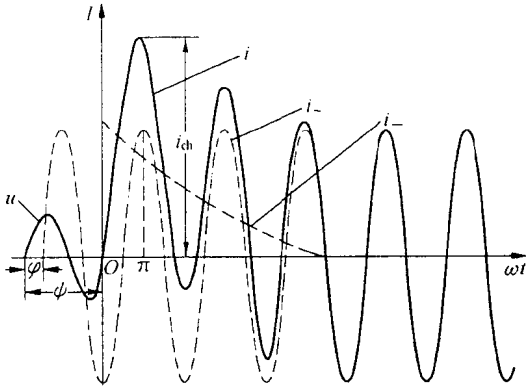


图 1.5 单相短路电流波形

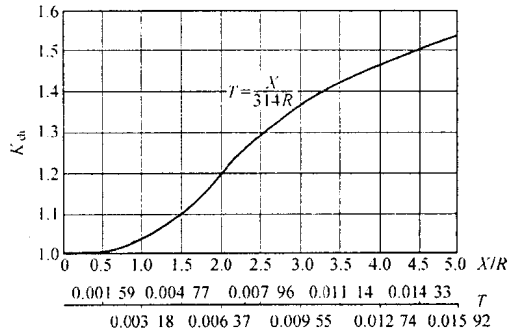


图 1.6 K_{ch} 与 $\frac{X}{R}$ 的关系曲线

三相短路时,各相电压瞬时值不同,因而相位角 $\psi - \varphi$ 也不同,各相短路电流周期分量和非周期分量的初始值不同,短路电流也不同。如某一相具有最大的非周期分量起始值,则最大冲击短路电流值将出现在这一相,而其他两相的短路电流冲击值将小于这一相。所以三相短路时,仅在一相中出现最大冲击短路电流值,见图 1.7。A 相出现最大冲击短路电流值,其他

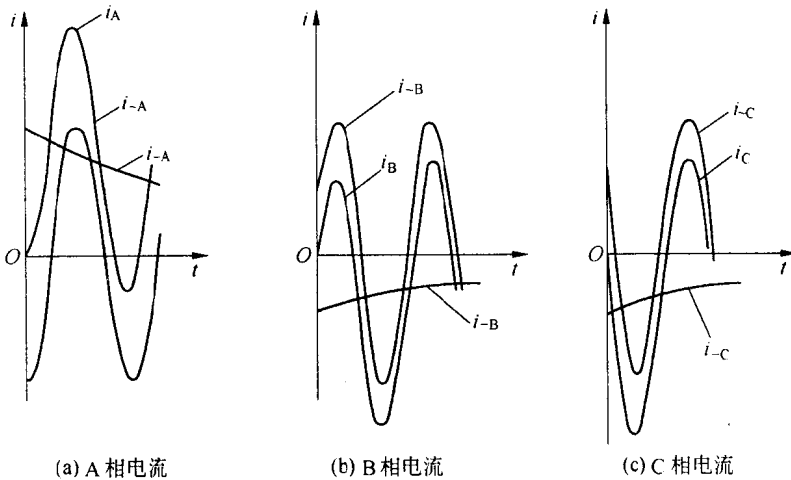


图 1.7 无限大容量系统发生三相短路时各相的电流

两相短路电流幅值较低。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,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,如同步电动机、电力变压器、电抗器、架空输电线及电缆等的电抗,各主要元件的电阻仅在电阻大于总电抗值的 1/30 000 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,且要考虑母线和电缆的阻抗、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。

为了简化计算,使短路电流值的计算偏于安全,允许不考虑占回路总阻抗值小于 10% 的元件。因此,在一般情况下,只需计及馈电电缆、长度超过 10 m 的母线及 300/5 A 以下的电流互感器的阻抗值。

1. 配电系统的电抗

计算低压线路的短路电流时,一般可以认为高压侧供电电源容量为无限大,因而可略去高压侧的系统阻抗。在较精确的计算中,则必须考虑系统阻抗值。

由于电力部门往往不对用户提供系统容量或阻抗数据,而只提供馈电线路高压受端的系统短路容量 S_x ,则系统电抗为

$$X_x = \frac{U_N^2}{S_x} 10^3 \quad (1.3)$$

式中 X_x ——系统的电抗, $m\Omega$;

U_N ——线路的额定线电压有效值, kV ;

S_x ——系统的短路容量, MW 。

2. 配电变压器的阻抗

计算变压器的阻抗值时,必须知道制造厂提供的变压器技术参数。

变压器的有效电阻按下式计算

$$R_T = \frac{\Delta P_K U_N^2}{S_{NT}^2} 10^3 \quad (1.4)$$

变压器的电抗按下式计算

$$X_T = \frac{10 U_N^2 \sqrt{U_K^2 \% - \left(\frac{\Delta P_K}{10 S_{NT}}\right)^2}}{S_{NT}} \times 10^3 \quad (1.5)$$

上两式中 R_T 、 X_T ——归算到副边的变压器的电阻和电抗, $m\Omega$;

ΔP_K ——由制造厂提供的变压器短路损耗, W ;

$U_K \%$ ——由制造厂提供的变压器短路电压百分比;

U_N ——变压器副边额定电压, kV ;

S_{NT} ——变压器的额定容量, kW 。

3. 架空线、电缆及低压母线的阻抗

高低压线路架空线、电缆线每千米的电抗值,可取表 1.1 所示的平均值。

表 1.1 各线路每千米电抗的平均值

线路种类	电抗 $X' / (\text{m}\Omega \cdot \text{km}^{-1})$
10 ~ 115 kV 的架空线	400
1 kV 以下的架空线	300
35 kV 的电缆线路	120
3 ~ 10 kV 的电缆线路	70 ~ 80
100 kV 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 1.8。

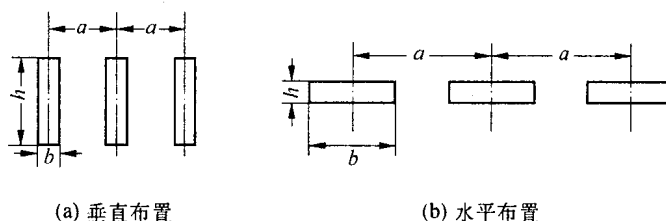


图 1.8 矩形截面母线的布置

母线的电抗可由下式近似计算

$$X = 0.145 \lg \left(\frac{4a_j}{h} \right) \quad (1.6)$$

式中 X ——单位长度矩形母线的电抗, $\text{m}\Omega/\text{m}$;

h ——矩形母线的高度, m ;

a_j ——各相母线之间的几何平均距离, m 。

若各母线之间的距离分别为 a_{AB} 、 a_{BC} 、 a_{CA} , 则母线几何平均距离 $a_j = \sqrt[3]{a_{AB}a_{BC}a_{CA}}$, 当 $a_{AB} = a_{BC} = 0.5a_{CA} = a$ 时, $a_j = \sqrt[3]{2}a = 1.26a$ 。

低压母线、电缆的单位长度电阻值可由下式计算

$$r_0 = P_\theta \frac{1}{S} \times 10^3 \quad (1.7)$$

式中 r_0 ——低压电线、电缆单位长度电阻值, $\text{m}\Omega/\text{m}$;

S ——导线有效截面积, mm^2 ;

P_θ ——导线在温度 $\theta^\circ\text{C}$ 时的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

常用各种载流导体在不同工作温度下的电导率 ν_θ 见表 1.2。

表 1.2 载流导体的电导率 ($\text{m} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^2$)

工作温度	20°C	50°C	65°C	80°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

低压电流互感器和开关触头的接触电阻由制造厂提供。

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,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,线路长度和每千米的电抗值等,有时为了便于计算,图中各元件还按顺序注上编号,见图 1.9。

低压线路三相短路电流周期分量有效值可按下式计算

$$I_{\Sigma}^{(3)} = \frac{U_N}{\sqrt{3}Z} = \frac{U_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} \quad (1.8)$$

式中 $I_{\Sigma}^{(3)}$ ——三相短路电流周期分量有效值;

U_N ——线路电压;

$X, R_{\Sigma}, X_{\Sigma}$ ——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总合,即 $X_{\Sigma} = \sum X, R_{\Sigma} = \sum R$ 。

当低压线路发生短路故障时,短路点电压剧减。连在短路点上的异步电动机工作于发电机状态,向电网回馈电流,这一回馈电流是衰减非常快的冲击电流,根据电力部门的经验,可近似地用下式计算

$$I_{cm} = 6.5I_{NM}$$

式中 I_{NM} ——电动机额定电流。

考虑异步电动机回馈电流后的三相短路冲击电流为

$$I_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{\Sigma}^{(3)} + 6.5I_{NM} \quad (1.9)$$

距短路点较远的异步电动机,对短路冲击电流值影响较小,可不予考虑。只有当短路点附近连接单台容量超过 20 kW 的异步电动机时,才需计入它的回馈冲击电流。

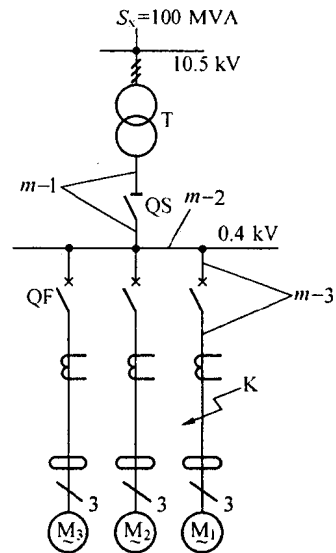


图 1.9 三相短路电流计算线路

1.3 系统对开关电器的要求

一、配电电器的通断能力和通断条件

低压配电线路最严重的故障就是短路,所以短路一发生,要求线路中用于短路保护的低压配电电器(如断路器和熔断器等)立即工作,分断故障电流。

其次,有时会出现,在系统存在故障的情况下,开关电器合闸,因此要求一些配电电器具有接通短路电流的能力。

电器的短路接通能力与短路电流最大峰值(短路冲击电流)有关。因为冲击电流产生的电动力可能使触头在接通过程中斥开,引起触头熔焊。额定短路接通能力表明了配电电器的接通能力,该能力是指在规定的试验电压和规定的参数条件下电器能够接通的最大短路电流峰值。规定参数系指,对交流电器而言是试验回路的功率因数,对直流电器是时间常数。交流电器的接通能力一般用额定短路分断电流 I_n 乘以表 1.3 所规定的峰值系数 n 来表示。额定短路分断能力是指在规定电压、频率以及一定的功率因数(或时间常数)下电器能够分断的短路

电流 I_c , 交流电器是用周期分量有效值表示。交流电器的分断能力和接通能力所要求的功率因数相同, 如表 1.3 所示, 它的值随分断短路电流值的增大而减小。为什么对电器接通和分断能力要规定功率因数或时间常数参数呢? 下面对交流电器的功率因数影响加以分析。

表 1.3 交流配电电器额定短路分断能力与功率因数和峰值系数 n 的关系

分断电流(有效值)	功率因数	峰值系数 n
$I_c \leq 1.5 \text{ kA}$	0.95	1.41
$1.5 \text{ kA} < I_c \leq 3 \text{ kA}$	0.9	1.42
$3 \text{ kA} < I_c \leq 4.5 \text{ kA}$	0.8	1.47
$4.5 \text{ kA} < I_c \leq 6 \text{ kA}$	0.7	1.53
$6 \text{ kA} < I_c \leq 10 \text{ kA}$	0.5	1.7
$10 \text{ kA} < I_c \leq 20 \text{ kA}$	0.3	2.0
$20 \text{ kA} < I_c \leq 50 \text{ kA}$	0.25	2.1
$50 \text{ kA} < I_c$	0.2	2.2

注: 峰值系数 n 是指短路电流的第一半波最大峰值与其周期分量有效值之比。

在电压和短路电流有效值相同的条件下, X_{Σ}/R_{Σ} (X_{Σ} 、 R_{Σ} 分别为给定短路点的电抗及电阻) 比值越大, 功率因数越小, 短路冲击电流就越大, 因而对电器的接通能力要求就越高。功率因数大小还影响电器的分断能力, 交流断路器分断短路电流时, 非截流特性的断路器是靠电流过零后限制电弧重燃而熄灭电弧。功率因数小, 工频恢复电压变大, 并可能导致其产生振荡过程, 使熄弧困难。而具有截流分断特性的断路器则在电流达到预期短路电流峰值之前, 强行熄灭电弧。

配电电器的通断能力与配电线路结构、配电变压器的容量以及不同的短路有关。如第一节介绍的配电线路中, 中央配电盘母线上 K_1 点短路的情况决定了自动开关 QF1 的通断能力。

下面以图 1.1 的中央配电盘母线 K_1 点发生短路的情况进行分析。假设变压器低压输出端到母线短路点的长度为 5 m, 变压器短路电压百分比 ($U_k\%$) 为 4, 不计系统阻抗, 假定变压器输入端电压不变, 变压器低压侧的额定电压为 400 V, 在不同的变压器容量时, K_1 点短路电流值的计算结果如表 1.4 所示。显然, 所列数据说明了当变压器短路电压百分比相同时, 无论是变压器还是低压引线, 它们的电抗与电阻的比值, 都是随变压器容量或低压主线路的额定电流 I_N 的增大而增大。线路额定电流越大, 短路电流越大, 而线路功率因数越小, 这一结论也可在一个供电线路中不同短路点的分析中得到。

表 1.4 K_1 点短路时的短路电流和功率因数

变压器额定容量 S/kW	额定电流 I_N/A	短路电流 $I_k^{(3)}/\text{kA}$	功率因数 $\cos \phi$	变压器阻抗		低压引线阻抗	
				$R/\text{m}\Omega$	$X/\text{m}\Omega$	$R/\text{m}\Omega$	$X/\text{m}\Omega$
10	14.4	0.315	0.75	535	480	17.8	0.475
30	43	0.945	0.65	151	187	6.6	6.45
50	72	1.75	0.60	85	116	3.15	0.42
75	0.8	1.38	0.57	108	54.3	2.37	1.12
100	144.5	3.12	0.55	38.4	60.8	1.98	1.03
180	260	5.6	0.51	20	34.6	1.11	0.95
200	346	7.4	0.47	13.9	26.5	0.88	0.05
320	460	9.8	0.43	9.6	20.3	0.59	0.95
560	808	16.7	0.37	4.8	11.9	0.37	0.95
750	1 080	22.4	0.35	3.4	8.95	0.223	0.85
1 000	1 445	28.5	0.32	2.4	6.75	0.139	0.85
1 800	2 650	48	0.27	1.18	3.82	0.089	0.85

二、电器的电动及热稳定性

从短路故障发生到切除该故障,通过短路电流的各电器都要受短路电流的考验。短路的效应有两种:一是短路电流产生的电动力会导致电器破坏;二是短路电流产生的热效应会使电器温升过高,导致导电接触系统和绝缘部分的损坏。因此,对电器提出了电动稳定性和热稳定性的要求。电器的电动稳定性是电器承受短路电流的电动力作用而不致破坏或产生永久变形的能力。由于电动力与电流瞬时值的平方成正比,所以电器的电动稳定性可用允许通过它的电流的峰值(即冲击电流)来表示,对交流配电电器取短路电流的冲击值,对直流电器取短路电流的最大值。

电器的热稳定性是指在一定时间内电器承受短路电流引起的热效应而不致损坏的能力。短路电流包含周期分量和非周期分量两部分,低压线路中电阻一般较大,线路的时间常数较小,通常在0.01 s以下,因而非周期分量衰减很快,实际上不到0.03 s已消失。所以短路电流的发热,可以不计电流非周期分量的影响。为此,热稳定电流用短路电流周期分量有效值表示。短路电流的发热决定于电流平方值与时间的乘积($I^2 t$),所以电器的热稳定性应以通电时间的热稳定电流表示,低压电器基本标准是取1 s热稳定电流。但各电器元件实际承受短路电流的时间各不相同,不同短路持续时间 t 的热稳定电流 I_t 可表示为

$$I_t = \sqrt{\frac{I^2 t_1}{t}} \quad (1.10)$$

电器的热稳定电流也称短时耐受电流,我国低压电器基本标准规定:电器的电动稳定性可用短时耐受电流与表1.3所列峰值系数的乘积作为允许通过的短路冲击电流值。所以低压电器用短时耐受电流来综合描述电动和热稳定性。

三、控制电器的通断能力

控制电器用来控制用电设备的接通和分断。常用的用电设备有电阻炉、各种类型的交流电动机。不同的用电设备(被控设备),在接通或分断时的工作特点不同,对控制电器的要求也不相同。

笼型电动机是控制电器的主要控制对象,其常见工作状态的接通与断开电流各不相同。

1. 通常的启动与停止

启动电流一般为额定电流 I_N 的5~6倍。电动机进入正常运行状态时,定子的电流为电动机的额定电流。

控制电器在分断线路时,触头两端的电压与负载运行状况有关,定子绕组断开时,转子绕组中感应一个很大的电流,阻止磁路中磁通变化,这个与转子绕组一起旋转的磁通在定子绕组中产生一个感应电势,作用于控制接触器触头间的电压为电源电压与这个反电势之差。如果分断正常运转的电动机,则产生的反电势近于电源电压,因而触头间电压很低,实验表明仅为电源电压的0.16倍左右。相反,如果断开刚启动的电动机,这时转子的转速很低,电动机产生的反电势很小,所以触头分断时加在它两端的电压近似为额定电源电压 U_N 。

根据上述可知,控制接触器触头的接通和断开参数:接通电流为5~6倍 I_N ,电压为 U_N ;断开电流为 I_N 、电压为 $0.16U_N$ 。

2. 正反转

有些笼型电动机工作于正反转状态,此时反转接触器接通电流更大,达7~8倍 I_N ,而断开则与情况1类似。故接触器触头的接通和断开参数:接通电流为7~8倍 I_N ,电压为 U_N ;断开电流为 I_N ,电压为 $0.16U_N$ 。

3. 点动

车床对刀时,常常采用点动。点动时,由于电动机尚处于启动阶段,接通电流为5~6倍 I_N ,又因此时电动机转速低,反电势很低,触头间电压近于 U_N ,故接触器触头间的参数为:接通电流为5~6倍 I_N ,电压为 U_N ;断开电流为5~6倍 I_N ,电压为 U_N 。

4. 反接制动

如同正反转的接通状态,但断开时电动机转速为零,电流也近于启动电流,断开电压为 U_N ,所以接触器触头参数:接通电流为7~8倍 I_N ,电压为 U_N ;断开电流为5~6倍 I_N ,电压为 U_N 。

上述分析表明,用电设备的不同工作状态,对控制电器的工作有较大影响。

对控制电器的基本要求是操作频率高、电寿命长。要求用于主回路的控制电器既能适应各种负载情况,又要有高的操作频率和长的电寿命。在设计与生产时把主回路的控制电器按用途分成几类,不同使用类别有不同的通断和寿命要求。

1.4 配电线路与用电设备的保护

低压配电线路和用电设备在运行中应该安全可靠,当发生各种故障时,设置在低压配电线路上的各种低压保护电器就能按需要及时开断主线路,切除故障。保护主要包括两大类:其一为保证在故障工作状态下线路及设备的安全;其二为保证人身安全。具体有:(1)过电流保护;(2)欠压与失压保护;(3)电动机的断相保护;(4)漏电保护。

在低压配电系统中应用的保护电器有低压断路器,又称自动开关,熔断器以及各种保护继电器。下面介绍各种保护性能。

一、过电流保护

1. 保护特性与过载特性的配合

过电流系指电流超过负载额定电流,它包括过载和短路,是低压系统最常见的故障。低压电器过电流保护性能可以用它的保护特性来描述,过电流保护特性是指保护电器动作时间 t 与通过它的电流的函数关系,又叫安秒特性。动作时间是指从短路或过载开始到切除故障所需的时间。过电流可以用通过电流 I 与保护元件额定电流 I_N 之比来表示,所以过电流保护特性可以写成 $t = f(I/I_N)$ 。

过载时,一般需积累一定时间才会引起设备损坏,因此并不是一发生过载,便立即切断故障线路,而是要求保护特性与被保护设备允许过载特性有良好的配合。如低压断路器的过载脱扣器或热继电器,就是用来保护笼型电动机或其他用电设备的。每种电气设备在过载条件下的允许工作时间与其过载倍数有关。被保护电器的允许工作时间与其过载倍数之间的关系称为电气设备的过载特性。一般具有反时限特性,也就是电气设备过载越重,发热越快,允许工作时间就越短。为了充分利用被保护对象的过载能力,又不使它发热超过允许值,要求保护电器的保护特性尽量接近并略低于被保护电气设备的允许过载特性,如图1.10所示。

保护电器的最小动作过载倍数对应的电流称之为临界动作电流(图1.10中 I_0),对继电器

而言, I_0/I_N 值一般在 1~1.2 之间。

2. 选择性保护

配电线路短路故障出现时,保护电器瞬时动作尽快予以切除。但并不要求所有的保护电器都动作,否则势必造成配电线路大范围停电,这对某些重要的供电系统来说,是不允许的。因此,要求有选择性地保护切断。所谓选择性保护,也就是在哪一级发生短路,则由该级的保护电器动作,将故障切除,保证配电系统正常工作。如图 1.1 中介绍的配电系统中 K_3 点短路时,仅熔断器 FU2 动作,而分支线路 QF2 不动作,以保证对馈电线路 2 的正常供电。 K_2 点短路时,仅 QF2 动作,而主线路的断路器 QF1 不动作,以保证对分支线路 2 的正常供电。为了达到上述逐级的选择性保护,可采用各级保护电器动作时间有差别的方法,使越靠近电源的电器的动作时间越长。在这种情况下,发生故障时,靠近短路点的保护电器由于动作时间短而首先动作,而其上一级的电器因动作时间长而来不及动作。对图 1.1 的线路,一般可取馈电线路的保护电器为瞬时动作,而分支线路和主线路的保护电器具有短延时动作特性。

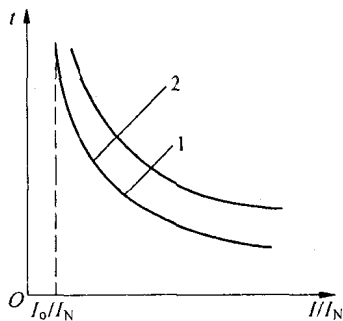


图 1.10 保护电器与被保护对象的特性配合
1—保护电器的保护特性;
2—被保护对象的允许过载特性

3. 低压断路器的三种保护特性

断路器是一种具有多种保护性能的保护电器,主要有三种:其一为反时限特性,用于过载保护;其二为瞬时动作特性,用于短路保护;其三为定时限特性,用于选择性短路保护。图 1.11 为断路器的各种过电流保护特性。图(a)为反时限的一段特性,用于过载保护;图(b)为两段特

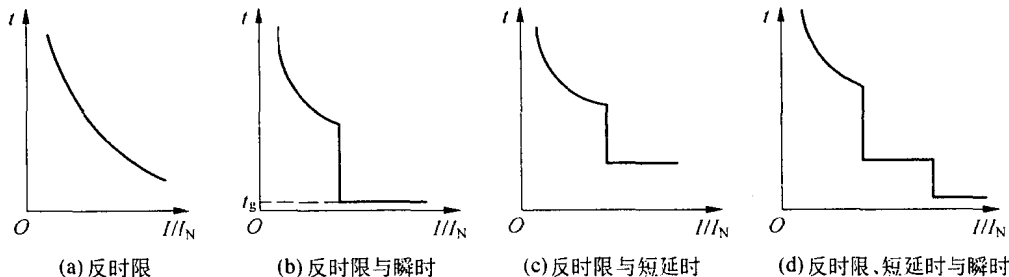


图 1.11 断路器的保护特性

性,前一段为反时限特性,后一段为瞬时动作特性,图中 t_g 为电器的固有动作时间;图(c)也为两段特性,但后一段是短延时的定时限特性;图(d)为三段保护特性,由反时限、短延时和瞬时组成三段安秒特性曲线。图(c)和图(d)的特性都能作选择性保护。低压断路器中产生反时限动作的部件称为长延时过电流脱扣器。短路故障时能瞬时动作的部件称为瞬时过电流脱扣器;以固有时间动作,短路故障时作短延时动作的部件称为短延时过电流脱扣器。

二、欠压和失压保护

低压配电线路运行时,由于过载、短路故障等原因,线路电压会大幅度下降甚至消失,造成线路和用电设备的损坏,同时给生产带来损失(如炼钢、纺织、造纸等)。其原因是:

(1) 电压降低到某一程度时,用电设备如电动机就会疲倒、堵转,使大批电动机同时出现几倍的过电流,故障迅速扩大,造成损失。