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中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

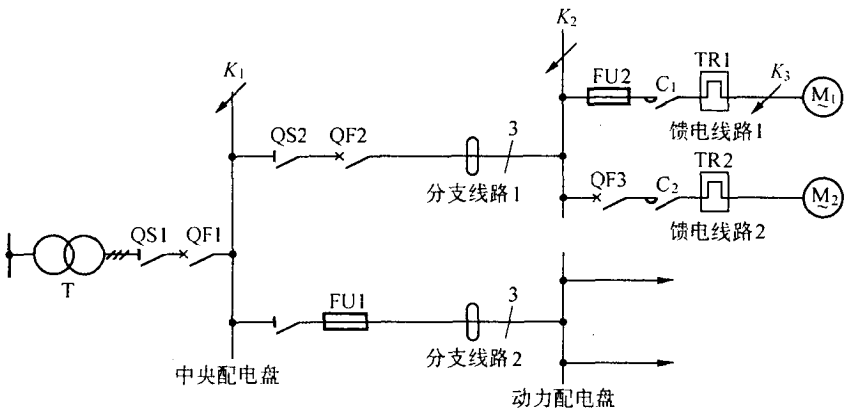


图 1.1　工矿企业典型配电线路

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；M_1、M_2—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。

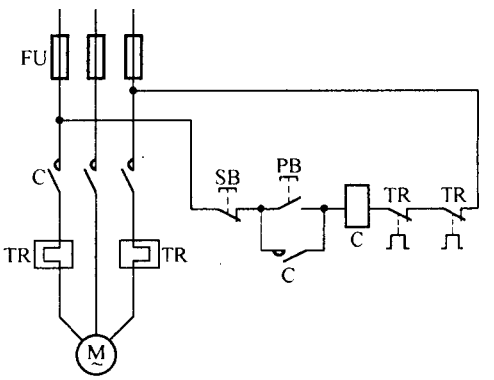
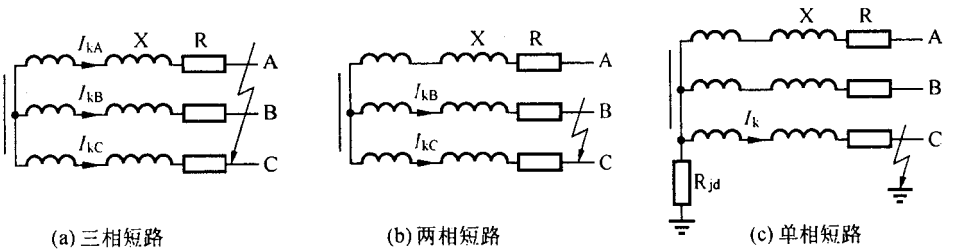


图 1.2 控制和保护笼型电动机的线路

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



(a) 三相短路　　(b) 两相短路　　(c) 单相短路

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

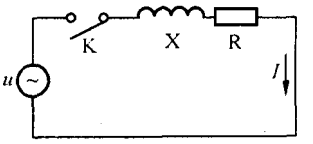


图 1.4 单相短路等效电路

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

φ——短路产生瞬间的电压相位角(合闸相位角)。

则短路电流为

$$i = i_{\sim} + i_{-} \tag{1.1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

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。

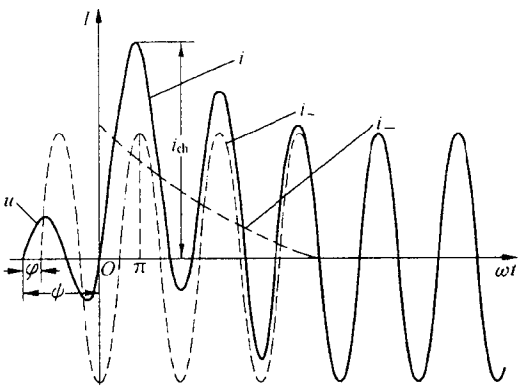


图 1.5　单相短路电流波形

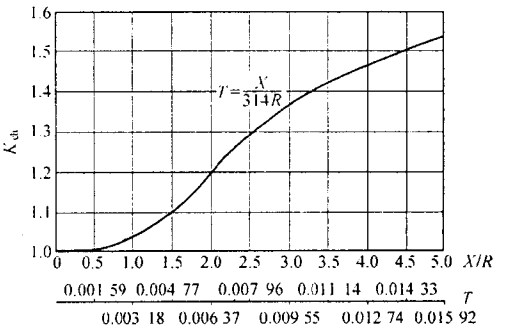
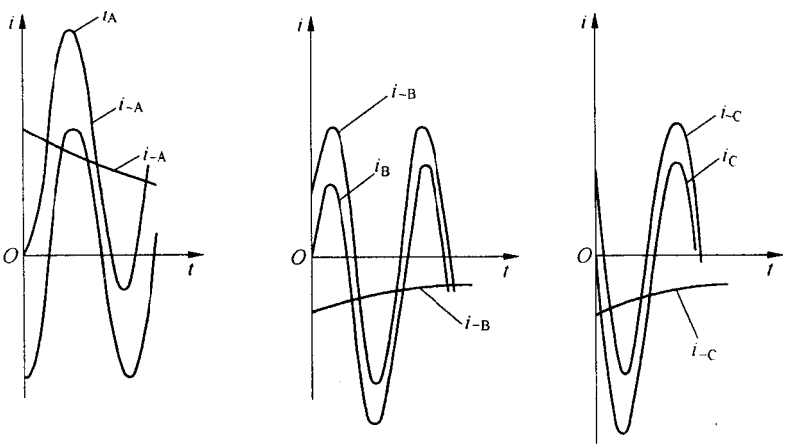


图 1.6　K_{ch} 与 $\frac{X}{R}$的关系曲线

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



(a) A 相电流　　(b) B 相电流　　(c) C 相电流

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

$$X_x = \frac{U_N^2}{S_x}10^3 \tag{1.3}$$

式中 X_x——系统的电抗，mΩ；

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

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

变压器的电抗按下式计算

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

上两式中 R_T、X_T—— 归算到副边的变压器的电阻和电抗，mΩ；

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。

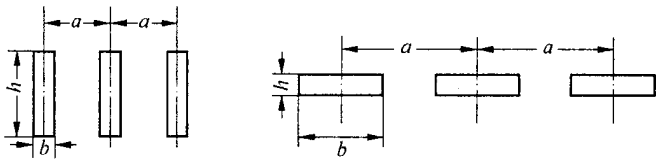
3. 架空线、电缆及低压母线的阻抗

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 $X'/(m\Omega \cdot km^{-1})$
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。



(a) 垂直布置　　(b) 水平布置

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

$$X = 0.145\ 1 \lg\left(\frac{4a_j}{h}\right) \tag{1.6}$$

式中 X——单位长度矩形母线的电抗，$m\Omega/m$；

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

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

式中 r_0——低压电线、电缆单位长度电阻值，$m\Omega/m$；

S——导线有效截面积，mm^2；

P_θ——导线在温度 θ℃时的电阻率，$\Omega \cdot mm^2/m$；

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($m \cdot \Omega^{-1} \cdot mm^2$)

工作温度	20℃	50℃	65℃	80℃
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。

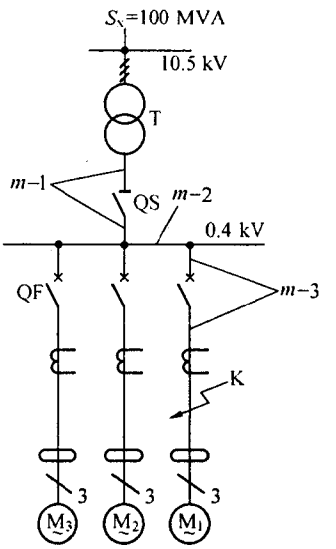


图 1.9　三相短路电流计算线路

低压线路三相短路电流周期分量有效值可按下式计算

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

式中　$I_{\sim}^{(3)}$——三相短路电流周期分量有效值；

U_N——线路线电压；

X、R_{Σ}、X_{Σ}——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

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

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

$$I_{ch} = \sqrt{2}\, K_{ch} I_{\sim}^{(3)} + 6.5 I_{NM} \tag{1.9}$$

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。

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_c 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
$I_c \leqslant 1.5$ kA	0.95	1.41
1.5 kA $< I_c \leqslant 3$ kA	0.9	1.42
3 kA $< I_c \leqslant 4.5$ kA	0.8	1.47
4.5 kA $< I_c \leqslant 6$ kA	0.7	1.53
6 kA $< I_c \leqslant 10$ kA	0.5	1.7
10 kA $< I_c \leqslant 20$ kA	0.3	2.0
20 kA $< I_c \leqslant 50$ kA	0.25	2.1
50 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	额定电流	短路电流	功率因数	变压器阻抗		低压引线阻抗	
容量 S/kW	I_N/A	$I_{k_1}^{(3)}$/kA	$\cos\phi$	R/mΩ	X/mΩ	R/mΩ	X/mΩ
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^2t）,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

$$I_t = \sqrt{\frac{I^2 t_1}{t}} \tag{1.10}$$

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、各种类型的交直流电动机。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_o),对继电器

而言，I_o/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办法，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。

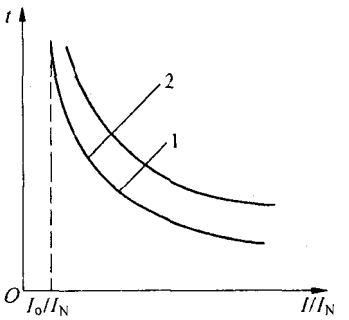
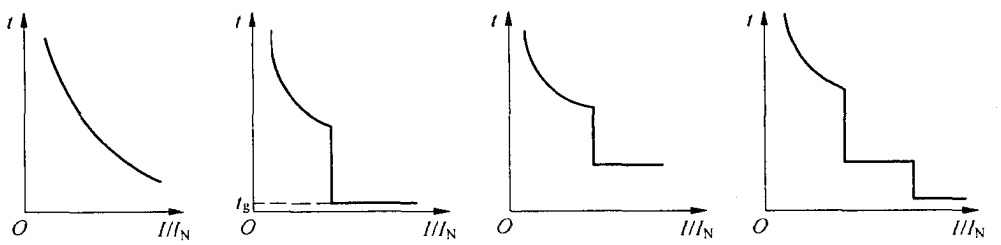


图 1.10 保护电器与被保护对象的特性配合
1—保护电器的保护特性；2—被保护对象的允许过载特性

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。



(a) 反时限　(b) 反时限与瞬时　(c) 反时限与短延时　(d) 反时限、短延时与瞬时

图 1.11 断路器的保护特性

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。

(2) 有时电压经短时降低又复原，会造成已停转电动机的再启动，大量电动机同时启动，会重新导致线路电压大幅度下降。另外，从某些生产工艺以及操作人员的安全要求考虑，也不允许自启动。因此需要对出现上述故障的情况进行保护。

电动机疲倒时的电源电压称为临界电压。对线路电压下降到临界电压时，要求保护电器动作，叫做欠压保护。对线路电压低于或大大低于临界电压时的保护叫做失压（零压）保护。失压保护主要用于防止电动机的自启动。

只有确定电动机的临界电压，才能正确地选择欠压保护电器的动作整定值。电动机的临界电压 U_c 与电动机种类、拖动负载的机械特性，即与负载转矩有关。下面研究三相异步电动机在恒转矩负载下的临界电压(如起重机)。

图 1.12 为三相异步电动机的机械特性曲线。异步电动机的最大转矩与电源电压的平方成正比，出现最大转矩的转差率 S_m 与电源电压变化无关。图 1.12 中曲线 1 表示额定电压 U_N 时的机械特性，曲线 2 表示电压降低时的机械特性，曲线 3 为电压降低到临界电压值时的机械特性。曲线 4 为具有恒转矩下的负载机械特性（负载为起重机、传送带等）。

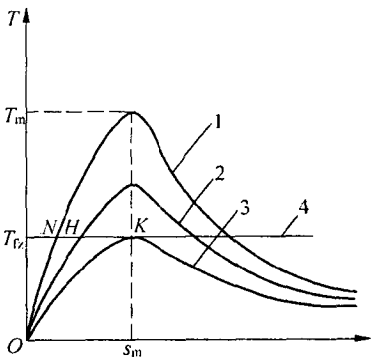


图 1.12 从感应电动机的机械特性求临界电压值

1—额定电压 U_N 时的机械特性；2—电压降低时的机械特性；3—临界电压 U_c 时的机械特性；4—负载的机械特性

当电源电压为额定值 U_N 时，电动机工作于曲线 1 上 N 点，当电源电压由 U_N 降低到临界值 U_c 时，电动机的工作点由 N 点经过 H 点移向 K 点。这时电动机转速降低，转差率 S 增大，K 点是临界电压下的最大转矩，极不稳定，电压稍有减小，则电动机迅速疲倒、堵转。因此，工作在 K 点时，欠压保护电器应动作，使电动机脱离电源。

设电动机在额定电压 U_N 下的最大转矩为 T_m，负载转矩为 T_{fz}，临界电压 U_c 时的最大转矩 $T_h = T_{fz}$，所以当 $S = S_m$ 时

$$\frac{T_m}{T_{fz}} = \left(\frac{U_N}{U_c}\right)^2$$

由上式得

$$U_c = \sqrt{\frac{T_{fz}}{T_m}}\, U_N$$

取

$$T_{fz} = K_{fz} = T_N$$

式中 K_{fz}——负载率；

T_N——电动机的额定转矩。

代入上式得

$$U_c = \sqrt{\frac{K_{fz} T_N}{T_m}} \qquad U_N = \sqrt{\frac{K_{fz}}{\lambda}} U_N \tag{1.11}$$

式中 λ——最大转矩与额定转矩的比值，$\lambda = T_m / T_N$。

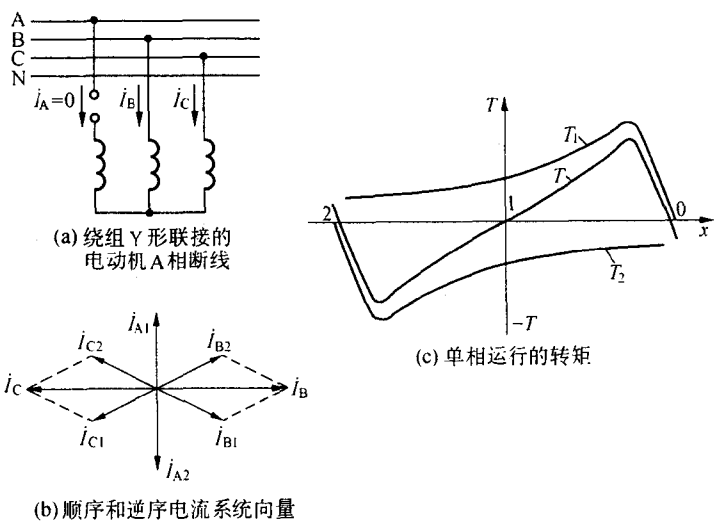
由式(1.11)得出，临界电压决定于 K_{fz} 和 λ 值，根据实际运行中 K_{fz} 的统计数据及三相异步电动机的 λ 值，一般规定欠压保护动作的电压值为 $(0.7 \sim 0.35)\, U_N$。

对于失压保护动作值，只要能在零电压时可靠释放即可。目前大量使用的三相异步电动机多利用图 1.2 线路中的接触器来达到失压保护的目的。当接触器 C 零压释放后，必须按下启动按钮 PB，才能使电动机重新运转。但考虑到接触器磁系统存在因剩磁粘住而不释放的现象，低压电器标准(GB 1497—85)规定，接触器的释放电压应不大于 $0.75\ U_N$，而对于直流应不低于 $0.1U_N$，以保证失压保护动作的可靠性。

三、电动机的断相保护

由于三相异步电动机在使用中单相运行是其损坏的主要原因之一，所以断相保护问题日益受到人们的重视。造成单相运行的原因：熔断器一相熔断；电源引线或电动机绕组一相断线 电动机绕组引出线与电源端子接触不良 刀开关、熔断器、断路器或接触器的一相触头接触不良；变压器原边或副边一相开路等。

如图 1.13(a) 所示的三相异步电动机，若 A 相电源断线，则 $i_A = 0, i_B = i_C$。用对称分量法将上述不对称电流进行分解，由于电动机中性点不接地，所以无零序电流，分解后得到正序电流系统 $i_{A1}、i_{B1}、i_{C1}$及逆序电流系统 $i_{A2}、i_{B2}、i_{C2}$(见图 1.13(b))。这两种电流系统分别产生正序和逆序旋转磁场，前者顺着转子旋转，而后者逆着转子旋转，正序旋转磁场产生旋转力矩 T_1，逆序旋转磁场产生制动力矩 T_2'(见图 1.13(c))。由于存在逆序磁场产生的制动力矩，因而电动机合成的有用转矩 T 在同一转差率下较正常运行时减小，且启动转矩为零。



(a) 绕组 Y 形联接的电动机 A 相断线

(b) 顺序和逆序电流系统向量

(c) 单相运行的转矩

图 1.13 异步电动机的单相运行

电动机在运行中发生一相断线，若负载不变，由于电动机有用转矩减小，导致绕组中电流增加以维持负载。其次，断相时，电动机空载电流增大，功率因数降低，因此，电动机定、转子铜损均较正常运转时增加很多。同时，转子受接近 100 Hz 的逆序磁场交变磁化，铁损也增加，由于以上各种原因引起电动机在单相运行时，定、转子温升剧增，而使电动机损坏。

当电动机断相时，必须采用断相保护。三相异步电动机的断相保护有多种方案，其中也可采用热继电器。如果用热继电器作为断相保护，对于绕组为星形联接的电动机，接在线路中的热继电器直接反映各相绕组的电流值，所以用一般的三极热继电器就可以对电动机进行断相

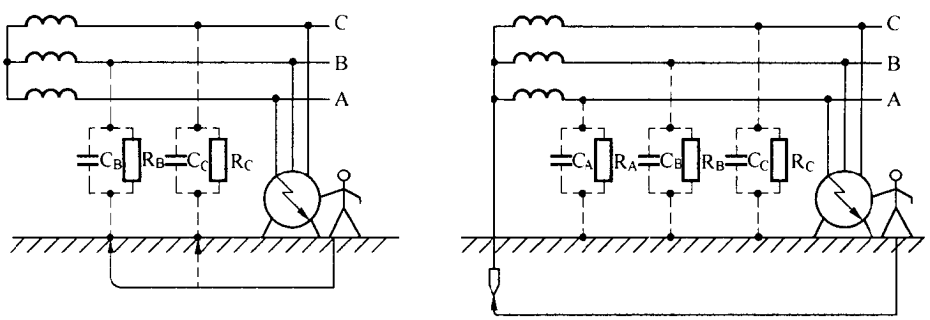
保护。而对于绕组为三角形接法的电动机，必须考虑断相时电动机绕组电流和线电流之间的关系与正常运转时不同，致使一般的热继电器不能正确反映绕组电流的变化。考虑到上述情况，电动机过载保护用的热继电器兼作断相保护时，常附加专门的结构组件。此外尚有其他各种类型的断相保护器，如鉴相鉴宽断相保护器等。

四、漏电保护

电在工农业生产和日常生活中的应用日益广泛，因此安全用电非常重要。电气绝缘损坏而引起的漏电，不但会酿成火灾，而且容易导致人体触电。触电使人的受害程度与电流通过人体部位、电流大小和通过的时间有关。触电电流通过心脏的危险最大。触电危及生命的主要原因是心室颤动，它使心室各部分肌肉发生不协调的颤动，导致心脏不能有节律地进行整体收缩而停止跳动。

在 400 V 以下的低压线路中，触电电流危险值为几十至几百毫安。心室颤动与触电电流大小和作用时间有关，当触电电流为 30～50 mA 时，通电数分钟才会发生心室颤动，当电流为 50 至数百毫安时，发生心室颤动所需持续时间只要几个心脏脉动周期。目前大多数国家采用电流时间积为 30 mA·s，作为安全的临界值，也是设计漏电保护电器的依据。

400 V 以下的低压电网有中性点接地和中性点不接地两种系统。所谓接地是指用接地导线与埋在地下的金属连接，以获得与大地有良好连接的一种措施。如果电源变压器低压侧的中性点不接地，触电回路的构成如图 1.14(a)所示，中性点直接接地，触电回路的构成如图 1.14(b)所示。电动机因绝缘损坏而使一相碰壳，人触及电机外壳时，触电电流就经过大地和



(a)中性点不接地系统　　(b)中性点接地系统

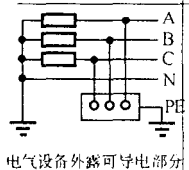
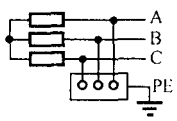
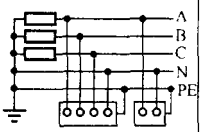
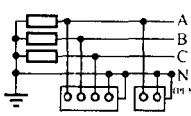
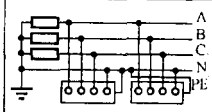
图 1.14　触电回路的形成

线路的对地电容构成回路。当线路较短时，分布电容小，不会有危险的电流通过人体，但当线路很长时，因线路对地分布电容增加，通过分布电容构成的回路电流增大，人体就有触电危险。不同的接地系统，对漏电保护的要求也不同。

1.5　低压开关设备的电源系统

电源系统按其接地方式可分为三种类型，即 TN 系统、TT 系统和 IT 系统。具体线路示于表 1.5。在我国，电气设备的电源系统为 TN－C 系统，在国外，除了 TN－C 系统之外，TN－S 系统也使用得很普遍。下面分别介绍这几种电源系统的接地类型。

表 1.5　IEC364 建筑物电气装置中规定的接地系统

TT	IT	TN		
		TN－S 系统	TN－C 系统	TN－C－S 系统
				
1. 电源中性点直接接地(系统直接接地点) 2. 装置裸露可导电部分,单独另行接地,与系统接地点无关	1. 系统带电部分与大地不连接或经阻抗接地 2. 装置裸露可导电部分,则单独直接接地	1. 系统中性线 N 与保护导体 PE 分开,电源侧 PE 母排与 N 母排相连后直接接地 2. 装置中中性线连 N 母排,裸露可导电部分则另接 PE 母排	1. 中性线 N 与保护导体 PE 合一;电源侧 PEN 母排与中性点直接接地 2. 装置中中性线 N 与裸露可导电部分接 PEN 母排	1. 有三相四线及三相五线。电源侧中性点 PEN 母排直接接地 2. 装置侧根据需要,一部分采用 TN－C(三相四线),一部分采用 TN－S(三相五线)

我国配电系统通常采用 TN系统,TN－C 最为常用。此类系统尽管在单相接地短路中短路电流值较 TT 系统大,但在一般情况下,可使保护器件快速地动作,安全性、可靠性强。实际情况是,因回路阻抗的差异(负载情况、导线长度以及短路保护器件的选择等不同因素),出现单相接地故障时，并不都能及时切断故障电源。尤其是由于三相系统中不平衡负载电流以及三次谐波电流的作用等原因,PEN 母排正常情况下亦带有电位，促使装置裸露可导电部分带电位而不安全。另外，在 TN－C 系统中，当架空线一相断线，接地形成的短路电流有时不能及时切断故障回路,PEN 母排带对地电位。而且当零线断线又发生单相接地，以及在配电系统中既采用接地又采用接零,或负载侧相、零线接错,均会造成严重后果。

IT 系统供电可靠性高,用于对不停电要求高的一类负荷(医院的手术室、矿井下等)。我国主要用于井下,井下配电变压器不得中性点直接接地。IT 系统产生单相接地故障时,接地电流很小,不破坏电源对称性,电气设备仍可正常工作。产生的火花能量也小,安全可靠,适用于井下。但由于井下环境恶劣,电气设备和电缆外皮经常遭受矿石碰击、浸水,极易造成电气设备外壳和电缆外皮损坏,绝缘水平降低,导致漏电事故发生,危及设备及人身安全。遇瓦斯、煤气,还可能引起爆炸和火灾。当某相接地时,人若触及其他任何一相,处于线电压之间,造成伤亡事故比地面严重。

为了防止事故发生，规定矿井下变电所高压馈线上必须装设选择性检漏保护装置，移动变电站的高压馈线上必须装有选择性的检漏保护装置。井下低压馈电线上应装设带漏电闭锁的检漏保护装置或带有选择性的检漏保护装置。人体触电电流为 30 mA,雷管引爆电流为 50 mA,瓦斯爆炸功率最小为 30 W 漏电电流大于等于上述数值时，应自动切断电源。

TT 系统是我国采用的接地保护方式。对 TT 系统,IEC{364－413.1.4.3}条,首先推荐采用漏电保护装置。设备绝缘损坏而使外壳带电，人体触及外壳，形成设备接地电阻 r_d 与接设备的人体电阻 r_R 并联的情况见图 1.15(b),漏电流由于 r_d 的分流,对人体影响较小。但如果系统发生单相接地短路故障时，由于接地电流不太大，断路器不动作($I_d = U_p/r_0 + r_d$)，当 $r_0 = r_d =$

4 Ω 时，I_d 只有 27.5 A，然而外壳上却带有百伏高电位(本例为 110 V)，若使外壳电位降为 50 V，r_d应为 0.9 Ω，几乎不可能。而且，$I_d = 220/4 + 0.9 = 44.9$ A 时，断路器仍不能动作。因此漏电保护作为主要的保护方式，也就是在漏电保护装置的保护范围内，容易触及到的电气设备的金属外壳都用保护地线连接到同一个接地装置上，接地装置的接地电阻应满足

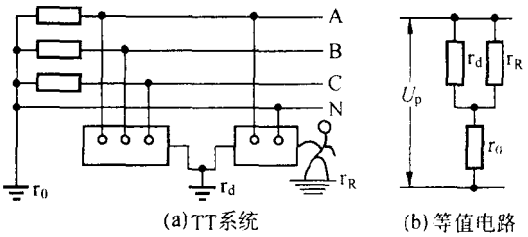


图 1.15 系统及等值电路

$$RI_{\Delta n} \leqslant U_L$$

式中 R——接地电阻；

$I_{\Delta n}$——漏电保护装置额定动作漏电流；

U_L——容许安全电压，通常为 50 V。

在中性点接地的低压电力系统中，多年来，我国及其他一些国家把接零保护作为保护人身安全的主要方法。

TN系统包括 TN－S 系统、TN－C 和 TN－C－S 系统。

TN－S 系统是我国城乡建设部[86]－44 号文体中规定的单相三线和三相五线制系统。这种系统的优点是 其一，由于零线与保护接地线分开，零线断线不会引起接地设备外壳具有相电位 其二，电气设备绝缘损坏使外壳带电或单相短路发生故障时，由于电流远大于 TT系统，保护迅速动作，消除了触电危险。缺点是经济性差，当保护地线断线或保护装置失去作用时，人体触及设备，不够安全。IEC 标准规定，TN－S系统也应该安装漏电保护装置。对生产用电设备，一般有专门技术人员管理维修，保护也较完善，可不必安装漏电保护装置。

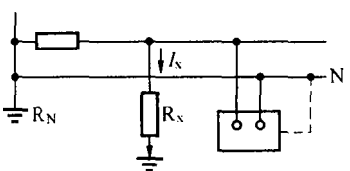


图 1.16 单相接地故障与 N断线

TN－C 系统是我国以往常用的接零保护系统，德国也在公共供电系统中应用，已有几十年的可靠运行经验。但是在正常情况下，零线中流过三相不平衡电流，有时还会有高次谐波电流(由于整流及功率调节装置等的影响)。这些将引起电子设备的不稳定，也会使人有麻电的感觉。

单相接地故障与接地电阻 R_x 有关(见图 1.16)，短路电流 I_x 可能不足以使短路保护设备动作，产生不安全因素，且会将零线电位传递到接零线的电气设备的外壳上，使危险区扩大。

另外，在单相接地故障情况下，当 N 线断线时，接在断线处的用电设备外壳为线电压。类似的情况还可能发生在不平衡负荷三相四线制之中。因而 TN－C 系统要安装漏电保护装置。

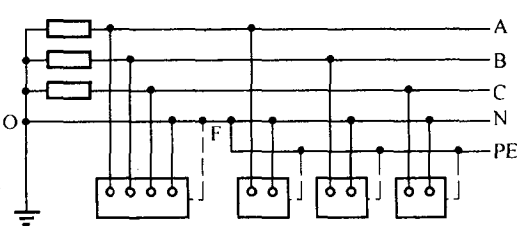


图 1.17 TN－C－S系统的安全地线

TN－C－S 系统宜用于远离电源的地方及小建筑物中，一般的平衡负荷采用 TN－C 系统，而对不平衡负荷采用 TN－S 系统。这样，即使是不平衡负荷部分工作零线上有电位，接在 PE 线上的外壳也是零电位。

如图 1.17 的接法中，PE 线不能消除 OF段的不平衡电流产生的压降，仅能消除 FN段的影响。说明只能减少而不能消除外壳对地电压。同样，这样的系统也应安装漏电保护装置。

.6 保护特性的配合

低压线路上常采用各种类型的保护电器，要正确发挥这些电器的保护功能，其保护特性必须做到良好配合，具体系指两方面内容：

(1) 与被保护对象允许过载特性的良好配合；

(2) 选择性保护的各级保护电器特性间的良好配合。

首先以保护电动机用的断路器为例进行分析。图 1.18为保护电器与被保护电动机的特性配合情况,图中曲线 1为电动机允许过载特性,曲线 2和 3为保护电器的保护特性曲线。曲线 2与曲线 1配合良好,而曲线 3配合较差，因为它不能最大限度地利用被保护设备的过载能力，反而由于电动机启动电流导致电器的误动作，所以无法实际使用。

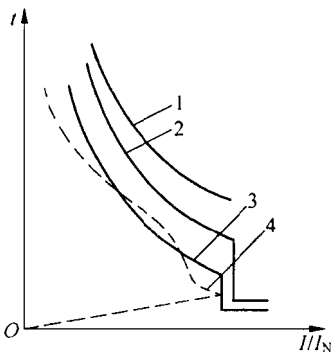


图 1.18 断路器与被保护电动机特性的配合

1—电动机过载特性；2、3—保护电器的保护特性；4—电动机启动电流的变化曲线

为了研究保护电器的保护特性躲开电动机启动电流的问题，常引入可返回时间的概念。通常用热继电器或热脱扣器作为过载保护元件，其中所用双金属片的加热方式，有直接加热式，还有间接加热式和复合加热式。对于后两种双金属保护元件,由于加热元件(电阻丝或电阻片)与双金属片之间存在空气间隙或云母、石棉等绝缘层，因此使热由热元件到双金属片的传递产生延迟现象，即双金属元件的温度变化滞后于加热元件的温度变化。图 1.19表示热传递延迟的过程，图中纵坐标为发热温度，横坐标为时间。当加热元件通过的过载电流为 n 倍额定电流时,热元件的升温曲线为 $O-1-2-3$; 双金属片受加热元件加热后升温曲线为 $O-4-5-6$,若这个电流保持不变,则经过 t_3 时间，双金属片的温度达到点 6的动作温度 θ_d,脱扣器动作,所以 t_3 就是当过载电流为 n 倍额定电流时脱扣器的动作时间。电动机启动电流是电动机启动过程短暂时间内出现的电流，与过载电流不同。但假设电动机启动电流也为 n 倍额定电流,启动持续时间超过 t_3,则和过载情况相同,经过 t_3 时间，脱扣器动作。下面研究当启动电流为 n 倍额定电流、持续时间小于 t_3 时脱扣器的动作情况。设电动机启动持续时间为 t_2，t_2 以后就降至额定电流，电动机进入正常运转状态。此时热元件温度上升到 2点后,就开始下降，但由于热元件继续向双金属片传热，双金属片的温度在达到 5点后,继续沿 5～7上升,当温度上升至 7点的 θ_d 时,脱扣器仍然动作。当启动电流为 n 倍额定电流,其持续时间减小到 t_1 时,热元件温度上升到 1点后下降,双金属片的温度由点 4继续上升,但上升至 8点(顶点)，其温度 θ_{sm} 恰好小于 θ_d,脱扣器不动作,t_1 就称为保护元件的可返回时间。断路器的可返回时间是指断路器通以规定的 n 倍整定电流时，断路器过电流脱扣器不动作的最大通电时间，在此时间之后，电流降到被保护对象的正常工作电流，将这个电流值称为返回电流值。由此可见，要使断路器流过电动机启动电流时不误动作，必须使电动机启动电流持续时间小于对应电流的断路器的可返回时间，才能实现正常的保护。

断路器的过载保护特性可用动作特性曲线族和返回时间特性曲线来表示，参见图 1.20。