

# 高压断路器

上册

清华大学高压教研组编

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书内容讲述高压断路器及其操动机构的基本理论和工作原理。工作原理包括产品的原理、性能、运行中的一些问题和结构分析等。本书分上、下册出版。

上册讲述的基本理论包括：电动力、发热、电接触、电弧及各种电路的开断过程，并介绍了油断路器、真空断路器的工作原理。

本书供从事高压断路器的设计、运行、试验、维修的工程技术人员和工人阅读，也可作为高等院校和七·二一大学有关专业的教学参考书。

## 高 压 断 路 器

上 册

清华大学高压教研组编

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

1978年7月北京第一版

1978年7月北京第一次印刷

印数 00001—31720 册 每册 1.10 元

书号 15143·3324

## 前 言

这是一本关于高压断路器(包括操动机构)的技术理论书籍。

高压断路器的理论牵涉面比较广，内容庞杂，既有电的方面的理论，也有热和力的方面的理论：在电和热的方面，既有场又有路，既有稳态过程也有过渡过程方面的内容；在力的方面，则牵涉到静力学、动力学、流体力学等方面的内容。而作为高压断路器基本现象的电弧问题则几乎包括了上述所有内容。

此外，与其他电力设备的理论相比较，高压断路器的理论还比较粗糙、不够成熟，不够系统，因此，也没有成套的计算设计方法。

根据上述情况，作者在编写本书时希望能比较基本、比较系统地介绍有关理论和原理，介绍或推导出便于分析或估算的计算公式，以便帮助读者能比较全面地考虑有关高压断路器的技术问题，比较好地理解各种现象和过程，能作出必要的估算，也为阅读有关文献杂志打下基础。此外，书中还包括一些产品结构分析、实际运行问题、技术措施和数据，以及一些计算例题。

由于编者各方面水平所限，错误及不当之处在所难免，希望读者指正。

## 主要符号意义

|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| $A$ ——功, 能量      | $R, r$ ——电阻, 半径       |
| $B$ ——磁感应强度      | $S$ ——表面积, 孔、管道、喷口截面积 |
| $b$ ——电纳         | $t$ ——时间, 厚度          |
| $C$ ——电容         | $T$ ——周期, 时间常数, 温度    |
| $c$ ——比热         | $\bar{U}, u$ ——电压     |
| $d, D$ ——直径      | $V$ ——容积, 体积          |
| $E$ ——电场强度, 电压梯度 | $v$ ——速度              |
| $F$ ——力          | $x$ ——游离度, 系数         |
| $f$ ——摩擦系数, 频率   | $Z$ ——阻抗              |
| $G$ ——重量         | $\alpha$ ——系数, 夹角     |
| $g$ ——重力加速度, 电导  | $\gamma$ ——重度, 电导率    |
| $I, i$ ——电流      | $\delta$ ——电流密度       |
| $K, k$ ——系数      | $\varepsilon$ ——黑度    |
| $L$ ——电感         | $\theta$ ——温度, 时间常数   |
| $l$ ——长度         | $\lambda$ ——导热系数      |
| $m$ ——质量, 系数     | $\rho$ ——电阻率          |
| $n, N$ ——数字, 倍数  | $\sigma$ ——正应力        |
| $N$ ——散热功率       | $\tau$ ——剪应力, 温升      |
| $P$ ——功率, 容量     | $\Phi$ ——磁通           |
| $p$ ——压力         | $\varphi$ ——相角        |
| $Q$ ——热量, 流量     | $\omega$ ——角频率        |
| $q$ ——截面积        |                       |

## 主要角注意义

|                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| <i>c</i> ——触头, 电容             | <i>L</i> ——电感       |
| <i>cr</i> ——复燃                | <i>l</i> ——导体, 拉升   |
| <i>d</i> ——动态, 动稳定, 断流, 断口    | <i>m, max</i> ——最大值 |
| <i>dl</i> ——短路                | <i>min</i> ——最小值    |
| <i>e</i> ——额定                 | <i>p</i> ——平均值      |
| <i>f</i> ——封闭气泡, 沸点           | <i>q</i> ——气流       |
| <i>g</i> ——关合                 | <i>r</i> ——热, 熔点    |
| <i>h</i> ——电弧                 | <i>s</i> ——瞬态       |
| <i>hf</i> ——恢复                | <i>w</i> ——稳        |
| <i>j</i> ——接触, 截断, 介质击穿, 剪切应力 | <i>xg</i> ——相       |
| <i>k</i> ——开断                 | <i>y</i> ——油        |
|                               | <i>yi</i> ——阳极      |
|                               | <i>ya</i> ——阴极      |

# 目 录

## 前 言

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一章 概述             | 1   |
| 第一节 高压断路器的用途和基本结构  | 1   |
| 第二节 对高压断路器的主要要求    | 2   |
| 第三节 高压断路器的特点       | 11  |
| 第二章 电动力            | 14  |
| 第一节 概 述            | 14  |
| 第二节 计算电动力的两种基本方法   | 17  |
| 第三节 平行导体间的电动力      | 20  |
| 第四节 垂直导体间的电动力      | 25  |
| 第五节 导体截面形状对电动力的影响  | 27  |
| 第六节 交流电动力          | 33  |
| 第七节 短路时的电动力        | 41  |
| 第八节 电动力计算举例        | 44  |
| 第三章 发热             | 49  |
| 第一节 允许温度           | 49  |
| 第二节 热的产生           | 54  |
| 第三节 绝热升温           | 62  |
| 第四节 传热的基本方式        | 66  |
| 第五节 导体长期发热的计算和实验结果 | 77  |
| 第六节 发热体升温过程        | 85  |
| 第四章 电接触            | 90  |
| 第一节 电接触的分类和要求      | 90  |
| 第二节 接触电阻           | 91  |
| 第三节 电接触在长期工作中的问题   | 102 |
| 第四节 电接触通过短路电流时的问题  | 106 |
| 第五节 触头的关合过程        | 110 |
| 第六节 触头的电磨损         | 113 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第五章 电弧 .....              | 118 |
| 第一节 电弧现象 .....            | 118 |
| 第二节 电弧的产生 .....           | 120 |
| 第三节 稳定电弧 .....            | 125 |
| 第四节 直流电弧的燃烧和熄灭 .....      | 134 |
| 第五节 交流电弧的燃烧和熄灭 .....      | 141 |
| 第六节 交流电弧的数学分析 .....       | 160 |
| 第七节 交流电弧的不稳定现象 .....      | 168 |
| 第六章 开断短路故障时的恢复电压 .....    | 179 |
| 第一节 恢复电压的基本概念 .....       | 179 |
| 第二节 单相电路开断时的恢复电压 .....    | 182 |
| 第三节 三相电路开断时的工频恢复电压 .....  | 187 |
| 第四节 瞬态恢复电压 .....          | 195 |
| 第五节 低值并联电阻降低恢复电压的作用 ..... | 203 |
| 第六节 近距故障开断 .....          | 210 |
| 第七节 失步故障开断 .....          | 216 |
| 第七章 断流容量试验 .....          | 219 |
| 第一节 试验条件的规定 .....         | 219 |
| 第二节 试验参数的量测与试验结果的处理 ..... | 220 |
| 第三节 断流容量的试验方法 .....       | 225 |
| 第四节 网络试验 .....            | 227 |
| 第五节 冲击同步发电机试验 .....       | 228 |
| 第六节 振荡回路试验 .....          | 229 |
| 第七节 合成试验 .....            | 233 |
| 第八章 电容性和电感性小电流的合分 .....   | 238 |
| 第一节 合分电容电路的基本情况 .....     | 238 |
| 第二节 关合空载长线 .....          | 242 |
| 第三节 关合电容器组 .....          | 247 |
| 第四节 开断电容电路的基本原理 .....     | 256 |
| 第五节 三相电容电路的开断 .....       | 262 |
| 第六节 开断电容电路的并联电阻 .....     | 268 |
| 第七节 开断空载变压器 .....         | 275 |
| 第八节 开断高压感应电动机时的过电压 .....  | 281 |

|     |               |     |
|-----|---------------|-----|
| 第九节 | 延伸故障与并联开断     | 283 |
| 第九章 | 油断路器          | 286 |
| 第一节 | 概述            | 286 |
| 第二节 | 多油断路器与少油断路器   | 291 |
| 第三节 | 油断路器的灭弧室      | 296 |
| 第四节 | 灭弧室压力过程分析     | 306 |
| 第五节 | 影响灭弧性能的因素     | 322 |
| 第六节 | 油筒机械强度的校核     | 334 |
| 第七节 | 多断口少油断路器的均压问题 | 337 |
| 第八节 | 油断路器开断电容电流的性能 | 341 |
| 第十章 | 真空断路器         | 347 |
| 第一节 | 特点            | 347 |
| 第二节 | 真空间隙的绝缘特性     | 350 |
| 第三节 | 真空电弧的特点       | 352 |
| 第四节 | 真空断路器的触头      | 359 |
| 第五节 | 真空断路器的操作过电压   | 364 |



# 第一章 概 述

## 第一节 高压断路器的用途和基本结构

高压断路器是电力系统最重要的控制和保护的设备，无论系统处在什么状态，例如空载、负载或短路故障时，当要求断路器动作时，它都应能可靠地动作，或是关合，或是开断电路。概括地讲，高压断路器在电网中起两方面的作用：第一，控制作用：根据电网运行需要，用高压断路器把一部分电力设备或线路投入或退出运行。这种作用称为控制。第二，保护作用：高压断路器还可以在电力设备或线路发生故障时，将故障部分从电网中快速切除，保证电网无故障部分正常运行。这种作用称为保护。

根据控制、保护的對象不同，高压断路器大致可以分为以下几种类型：

(1) 发电机断路器——控制、保护发电机用的断路器。

(2) 输电断路器——用于35千伏及以上输电系统中的断路器。

(3) 配电断路器——用于35千伏及以下的配电系统中的断路器。

(4) 控制断路器——用于控制、保护经常启动的电力设备，如高压电动机、电弧炉等的断路器。

这些不同类型的断路器在性能、参数、结构、要求上都有所不同。

除了按控制、保护的對象分类之外，在断路器使用中还有别的分类的办法。例如：

按使用的电压等级来划分，在35千伏及以下电压等级使用的断路器，为中压断路器；110、220千伏电压等级使用的断路器，为高压断路器；330千伏及以上电压等级使用的断路器，为超高压断路器。

按断路器灭弧原理来划分，有油断路器（多油断路器，少油断路器），气吹断路器（空气断路器，六氟化硫断路器），真空断路器，磁吹断路器等等。

高压断路器的典型结构简图见图1-1。图中开断元件是断路器用来进行关合、开断电路的执行元件，它包括触头，导电部分及灭弧室等。触头的分合动作是靠操动机构来带动的。开断元件放在绝缘支柱上，使处于高电位的触头及导电部分与地电位部分绝缘。绝缘支柱则安装在基座上。操动机构

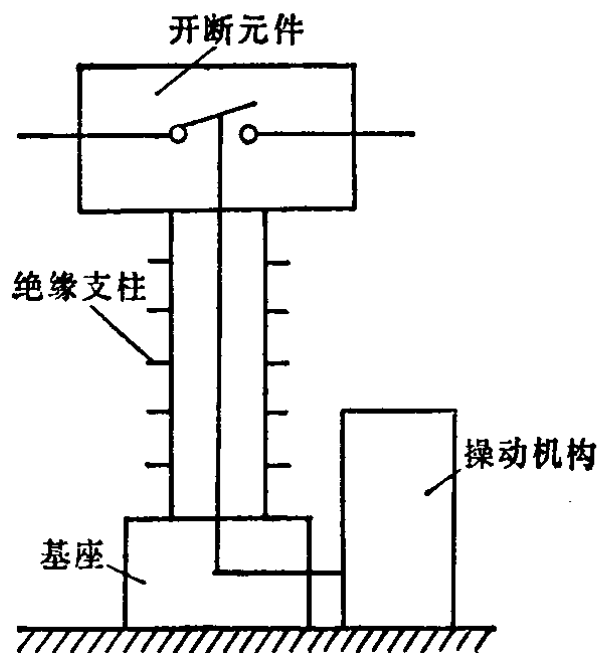


图 1-1 高压断路器典型结构简图

## 第二节 对高压断路器的主要要求

电力系统的运行状态，负载性质是多种多样的，作为控制、保护元件的高压断路器，要保证电力系统安全运行，对它的要求是多方面的。另外，断路器所处自然环境的变化，有的也会对断路器工作性能产生影响。因此在断路器设计时，应该全面考虑这些要求。归纳起来，对高压断路器的要求，大致可以分成下述三个方面：

## 一、开断、关合电路方面

### 1. 开断负载电路和短路故障

断路器在开断电路时，主要的困难是熄灭电弧。由于电力网电压较高，电流较大，断路器开断电路时，触头分离后，触头间还会出现电弧，只有使电弧熄灭，电路中的电流才截断，电路的开断任务才完成。在电力网运行中，要求断路器在各种情况下都能够开断电路。在电力网发生短路故障时，短路电流比正常负荷电流大得多，这时电路最难开断。因此，可靠地开断短路故障是高压断路器的主要的，也是最困难的任务。

标志高压断路器开断短路故障能力的参数是：

额定电压 $U_e$ ，单位千伏；

额定开断电流 $I_{ke}$ ，单位千安；

习惯上，经常使用的另一个参数是额定断流容量 $P_{de}$ ，单位兆伏安。对于三相电路， $P_{de}$ 的计算公式是

$$P_{de} = \sqrt{3} U_e I_{ke} \quad (1-1)$$

例如： $U_e$ 为220千伏， $I_{ke}$ 为21千安的断路器，额定断流容量 $P_{de}$ 为

$$\begin{aligned} P_{de} &= \sqrt{3} \times 220 \times 21 \\ &= 8000 \text{兆伏安} \end{aligned}$$

在电力网中，选择断路器时，首先要校核的参数之一就是断路器开断短路故障的能力。图1-2表示在220千伏母线上引出的一条线路，在线路的始端装有断路器 $DL$ 。当线路在不同位置上出现短路故障，例如在1，2，3，4等处出现短路故障时，断路器都应能可靠地开断。显然在1处短路，短路电流 $I_{d11}$ 最大，这

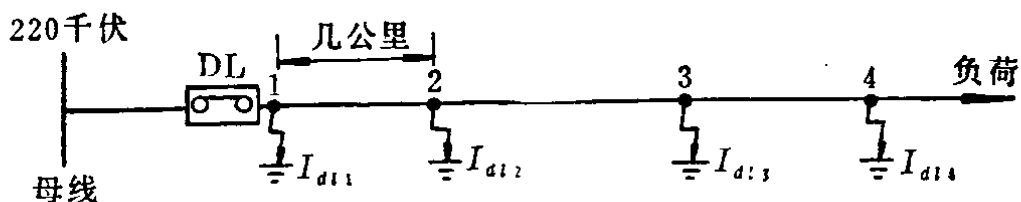


图 1-2 断路器开断短路故障情况

时断路器 $DL$ 应开断的电流最大，因此，应选用高压断路器的 $I_{ke} > I_{dl1}$ 。

当线路在2, 3, 4等处短路时，短路电流 $I_{dl2}$ ,  $I_{dl3}$ ,  $I_{dl4}$ 均较 $I_{dl1}$ 小，但实践和理论都表明，能够开断1处短路故障的断路器并不一定能够开断2、3、4处的短路故障。例如，当图中短路点2距断路器 $DL$ 几公里左右，这时，断路器开断可能更困难。这种故障称为“**近距故障**”。对于距离更远的短路点3、4，这时，就开断电流值而言，虽然没有超过断路器的额定开断电流，但这种中、小电流的开断，对断路器却未必是轻松的，也有难于开断的因素。

除此之外，在有些情况下还可能出现延伸故障、并联开断以及在电力网失步时出现的失步故障。在发生这些故障时，有关断路器也必须能正常开断。

对于三相系统，还要考虑三相之间的各种形式的短路，如三相，两相，单相接地和异地两相接地短路等。对于这些故障，断路器也应能正常开断。

## 2. 快速开断

电力网发生短路故障后，要求继电保护系统动作得越快，断路器开断得越快，越好。

这样可以缩短电力网的故障时间和减轻短路电流对电力设备的损害。更重要的是，在超高压电力网中，缩短断路器开断时间可以增加电力系统的稳定性，从而保证输电线路的输送容量，参看图1-3。因此，开断时间是高压断路器的一个重要参数。

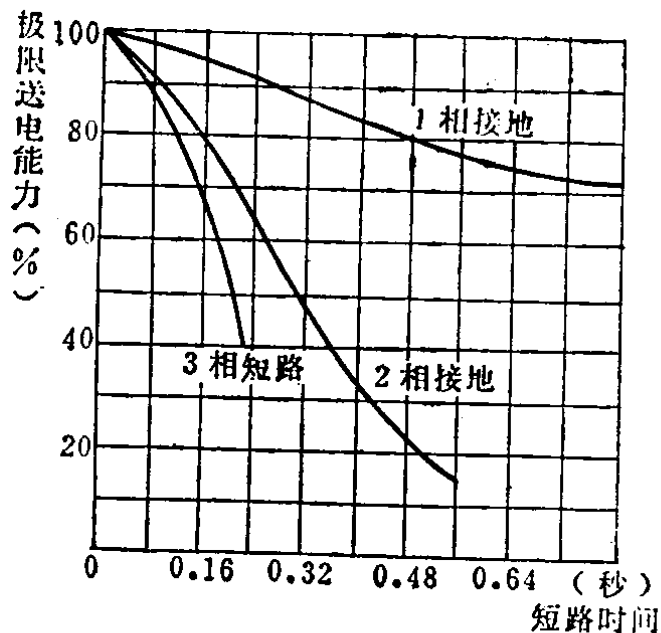


图 1-3 短路故障时间对输电线输送能力的影响

标志断路器开断过程

快慢的参数是全开断时间  $t_k$ ，单位秒。 $t_k$  是从断路器接到开断（分闸）信号到短路电流终止（电弧熄灭）的全部时间。

全开断时间为固有分闸时间和燃弧时间之和。固有分闸时间为断路器接到分闸信号到触头分离这一段的时间。燃弧时间是从触头分离到各相电弧熄灭的时间。

断路器在开断短路故障时的各个时间见图 1-4。对于高压断路器，固有分闸时间和燃弧时间都必须尽量缩短。

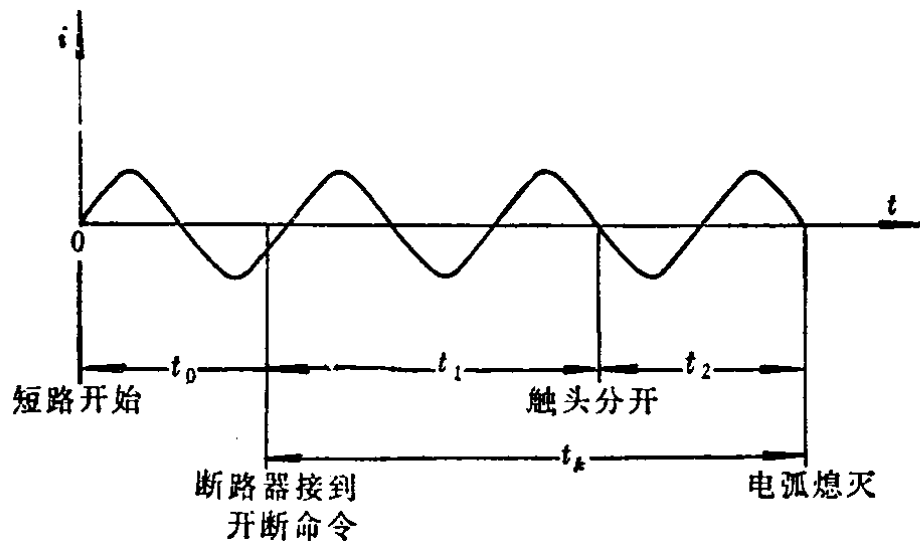


图 1-4 断路器开断电路时的电流和时间

$t_0$ —继电保护动作时间； $t_1$ —断路器固有分闸时间； $t_2$ —燃弧时间； $t_k$ —断路器全开断时间， $t_k = t_1 + t_2$ ；短路故障时间 =  $t_0 + t_k$

### 3. 关合短路故障

电力网中的电力设备或输电线路有可能在未投入运行之前就已存在绝缘故障，甚至处于短路状态。这种故障称为“预伏故障”。当存在预伏故障的设备或线路接到高压电力网，就会出现故障短路电流。当断路器关合有预伏故障的设备时，在关合过程中，通常在动静触头尚未接触之前，触头间的间隙即被击穿（通常称为预击穿），随即出现短路电流。在关合过程中出现短路电流，会对断路器的关合造成很大阻力，这是由于短路电流产生的电动力造成的。有的情况下甚至出现动触头因此合不到底的情况。此时在触头间形成持续电弧，造成断路器损坏或爆炸。为了避免出现上

述情况，断路器应具有足够的关合短路故障的能力。标志关合短路故障能力的参数是断路器的额定短路关合电流  $i_{ge}$ （峰值）。

#### 4. 自动重合闸

架空输电线路的短路故障，大多数是雷害、鸟害等临时性故障。因此，为了提高供电可靠性并增加电力系统的稳定性，线路保护多采用自动重合闸方式。在短路故障发生时，根据继电保护发出的信号，断路器开断；然后，经很短时间又再自动关合。断路器重合后，如故障并未消除，断路器必须再次分闸，开断短路故障。此后，在有的情况下，由运行人员在断路器开断一定时间后，再行合闸，叫做“强送电”。强送电后，故障如仍未消除，断路器需再分断一次。断路器的上述动作程序称为自动重合闸操作循环，写为：

分 —  $\theta$  — 合分 —  $t$  — 合分

其中  $\theta$  —— 是从断路器开断电路到电路重新接通的时间，称为无电流间隔时间。 $\theta$  值一般在0.5秒左右；

$t$  —— 强送时间，一般为180秒。

断路器在自动重合闸操作循环时的有关时间见图1-5。

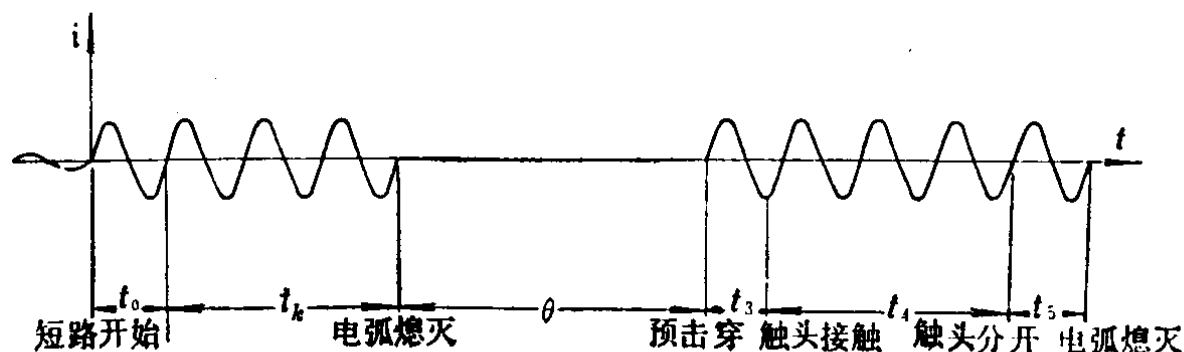


图 1-5 自动重合闸操作循环（包括强送电）的有关时间

$t_0$ —继电保护动作时间； $t_k$ —断路器全开断时间（第一次短路故障时间 =  $t_0 + t_k$ ）； $\theta$ —自动重合闸的无电流间隔时间； $t_3$ —预击穿时间； $t_4$ —金属短接时间； $t_5$ —燃弧时间（第二次短路故障时间 =  $t_3 + t_4 + t_5$ ）

采用自动重合闸的断路器，在上述很短的时间内应能可靠地连续合分几次短路故障。这种连续多次合分比单分一次短路故障，对于断路器来讲，负担要沉重得多。此外，在超高压电力系

统，为了提高系统的稳定性所使用的断路器，图1-5中有关的几个时间都应当比较短。为此，要求断路器有较高的动作速度，除了缩短全开断时间外，金属短接时间（在断路器合分过程中，动静触头直接接触时间）也必须比较短。

对用于保护发电机、电动机、变压器以及电缆等的断路器，不采用自动重合闸操作方式。这类断路器只需满足非自动重合闸操作循环即可。非自动重合闸操作循环为：

分—— $t$ ——合分—— $t$ ——合分

$t$ 取180秒。

#### 5. 合分各种空载、负载电路

在电网运行过程中，断路器有时需要关合、开断空载长输电线、空载变压器、电容器组、高压电动机等电路。合分这些电路的主要问题是可能产生过电压。这时，对断路器的要求是在合分过程中，不应产生危及绝缘的过电压。标志这方面分合能力的主要参数是额定电压 $U_e$ ，能顺利合分的架空线和电缆的长度（公里）、变压器或电容器组容量（千伏安或千乏）以及电动机的功率（千瓦）等。

#### 6. 允许合分次数

断路器应有一定的允许合分次数，以保证足够长的工作年限。根据标准，一般断路器允许空载合分次数（也称机械寿命）应达1000~2000次。控制电容器组、电动机等经常启动的电力设备的断路器，其允许合分次数应当更多。为了加长断路器的检修周期，断路器还应有足够的电寿命（允许连续合分短路电流或负载电流的次数）。一般说来，断路器应有尽可能长的合分最大短路故障的电寿命。对用于保护、控制经常启动的电力设备的断路器，更应有连续合分几千次以上负荷电流的电寿命。

#### 7. 对周围环境的影响

断路器在动作时往往会出现排气，喷烟或喷高温气体等现象，这些现象都不应过分强烈，以免影响周围设备的正常工作，更不应出现喷油，喷火的现象。

在人口稠密地区，断路器在合分时应无过大的噪音。

## 二、一般电气性能方面

高压断路器既要长期装设在高压电网上，就应当与其它高压电力设备一样，能承受所在电网各种电压、电流的作用而不致损坏。

### 1. 电压方面

一定额定电压的断路器，其绝缘部分应能长期承受相应的最大工作电压，而且还应能承受相应的大气过电压和内过电压的作用。

标志这方面性能的参数是：最大工作电压、工频试验电压、全波和截波冲击试验电压、操作波试验电压。试验电压值可参看有关标准。

### 2. 电流方面

断路器长期通过工作电流时，各部分的温度不得超过允许值，以保证断路器的工作可靠。关于断路器各种情况下的允许温度，在有关标准中都有所规定。断路器通过短路电流时，不应因电动力受到损坏，各部分温度也不应超过短时工作的允许值，触头不应发生焊接或损坏。

标志这方面性能的参数是：额定电流 $I_e$ 、额定动稳定电流 $i_{de}$ （峰值）、额定热稳定电流 $I_{re}$ 和额定热稳定时间 $t_{re}$ （2秒或4秒）。

对断路器来说，额定动稳定电流 $i_{de}$ ，额定热稳定电流 $I_{re}$ ，额定开断电流 $I_{ke}$ ，额定短路关合电流 $i_{ge}$ （峰值）都是同一短路电流在不同操作情况下，或不同时刻出现的电流有效值或峰值。断路器标准中规定的各电流额定值的关系见图1-6。

各额定值间的关系还可写成下面的式子

$$i_{ge} = i_{de} \quad (1-2)$$

$$I_{re} = I_{ke} \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} i_{ge} &= 1.8 \times \sqrt{2} I_{ke} \\ &= 2.55 I_{ke} \end{aligned} \quad (1-4)$$



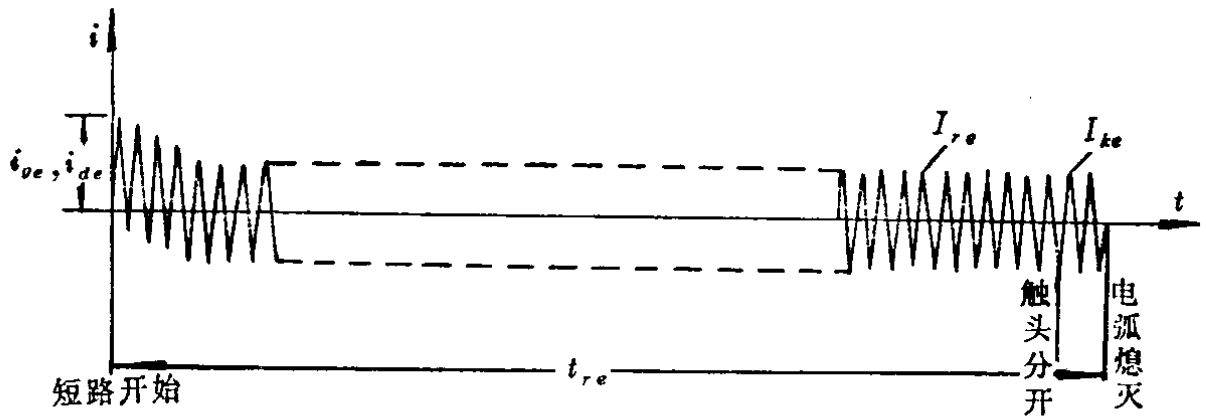


图 1-6 各电流额定值的关系

例如，设计一个断路器，要求额定开断电流  $I_{ke} = 20$  千安，则其它电流的额定值可确定如下

$$I_{re} = I_{ke} = 20 \text{ 千安}$$

$$i_{ge} = i_{de} = 2.55 I_{ke} = 51 \text{ 千安}$$

对各种断路器主要参数的要求见表1-1。

表 1-1 对各种断路器主要参数的要求

| 断路器种类  | 额定电压    | 额定电流  | 额定开断电流 | 开时 | 断间 | 重合闸循环 | 寿命 |
|--------|---------|-------|--------|----|----|-------|----|
| 发电机断路器 | 20千伏及以下 | 2千安以上 | 大      | 中  | 中  | 无     | 低  |
| 输电断路器  | 35千伏及以上 | 2千安以下 | 中      | 短  | 短  | 有     | 低  |
| 配电断路器  | 35千伏及以下 | 1千安以下 | 中      | 中  | 中  | 有     | 低  |
| 控制断路器  | 35千伏及以下 | 小     | 小      | 中  | 中  | 无     | 高  |

### 三、自然环境方面

断路器在周围环境各种条件作用下，都应能可靠工作，这些条件大致叙述如下。

#### 1. 海拔高度

海拔高度对断路器主要有两方面的影响：

(1) 对外部绝缘的影响。海拔高的地区，大气压力低，大气耐压水平降低。例如，在海拔1000米以下能承受工频耐压42千伏、1分钟的断路器，在海拔超过3000米的地区，只能耐压38千