

# 高压断路器

上册

清华大学高压教研组编

水利电力出版社

61

2

# 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

# 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。

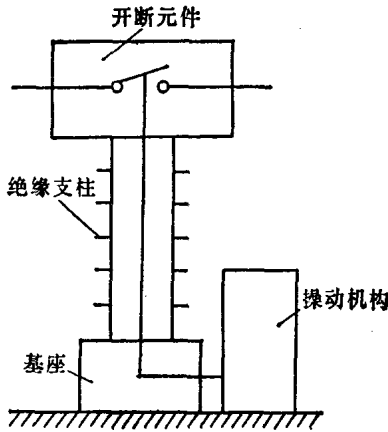


图 1-1 高压断路器典型结构简图

## 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

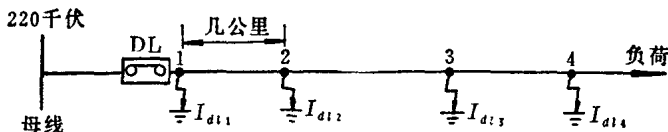


图 1-2 断路器开断短路故障情况



时断路器 $DL$ 应开断的电流最大，因此，应选用高压断路器的 $I_{k0} > I_{d11}$ 。

当线路在2, 3, 4等处短路时，短路电流 $I_{d12}$ ,  $I_{d13}$ ,  $I_{d14}$ 均较 $I_{d11}$ 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

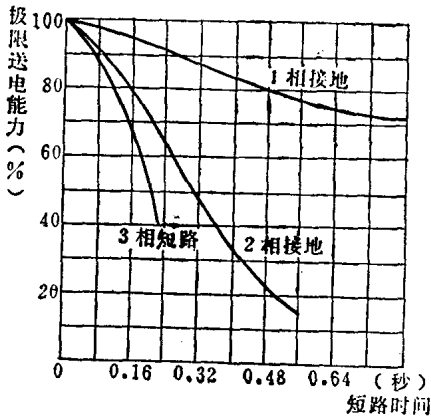


图 1-3 短路故障时间对输电线路输送能力的影响

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。

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。

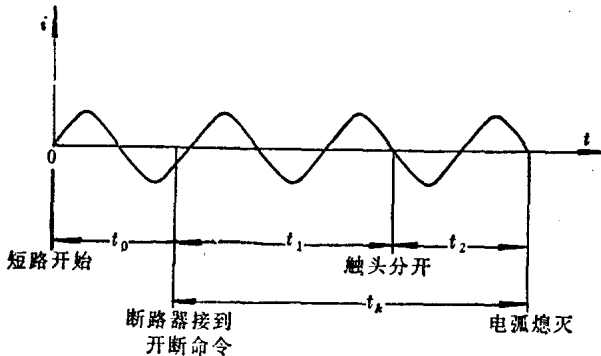


图 1-4 断路器开断电路时的电流和时间

$t_0$ —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  $i_{gc}$ （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。

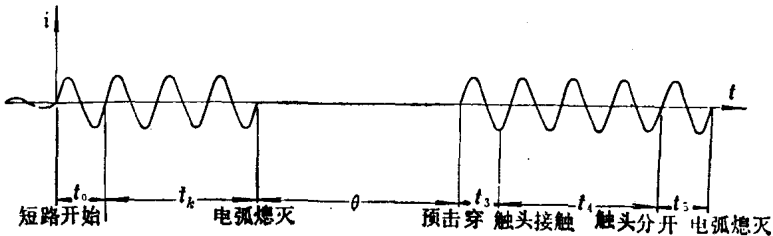


图 1-5 自动重合闸操作循环（包括强送电）的有关时间

$t_0$ —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。标志这方面合分能力的主要参数是额定电压 $U_n$ ，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

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

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

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

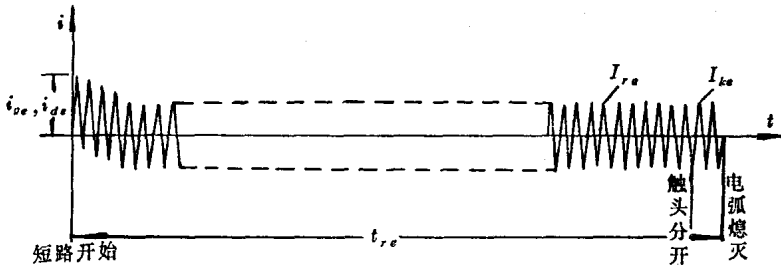


图 1-6 各电流额定值的关系

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

$$I_{re} = I_{ke} = 20 \text{ 千安}$$

$$i_{gc} = i_{dc} = 2.55 I_{ke} = 51 \text{ 千安}$$

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

伏。根据标准规定，用于高海拔（高于1000米）地区的产品，当海拔不超过3500米，在低海拔地区进行耐压试验时，试验电压应提高，其试验电压为标准规定值乘以系数 $x$ （ $x > 1$ ）

$$x = \frac{1}{1.1 - \frac{H}{10000}} \quad (1-5)$$

式中 $H$ 为安装地点的海拔高度（米）， $1000 < H < 3500$ 。

（2）对电器发热温度的影响。高海拔地区，空气稀薄，散热差，因此允许通过的电流应小一些。

在我国，海拔低于1000米的地区仅占全国面积的35%，但全国90%以上的变电站都在此地区内，所以有关标准规定一般电气设备的使用环境均按海拔低于1000米考虑。

## 2. 环境温度

断路器标准规定，产品使用的环境温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ 至 $+40^{\circ}\text{C}$ 。温度过低，会使断路器内部的变压器油、液压油及润滑油的粘度增加，断路器合闸、分闸速度降低。另一问题是温度过低使密封材料的性能劣化，造成漏气漏油。温度过高，可能造成导电部分过热及电容套管的密封胶渗出等。特别是装设在户外的产品，在阳光直射下很容易过热，标准规定，周围环境温度每增加 $1^{\circ}\text{C}$ ，工作电流应降低1.8%；每降低 $1^{\circ}\text{C}$ ，可提高工作电流0.5%，但不得超过20%。温度过高，空气绝缘能力也会降低。标准规定，用于高温地区的断路器在常温地区进行耐压试验时，试验电压要适当提高，从 $+40^{\circ}\text{C}$ 开始，每超过 $3^{\circ}\text{C}$ ，试验电压提高1%。

## 3. 湿度

我国长江以南地区，湿度很大，全年很长时间的湿度在90%以上。这样大的湿度容易引起断路器的金属件锈蚀，绝缘件受潮，油漆层脱落，甚至影响机构的可靠动作。

## 4. 风力

过大的风力有可能使结构细长的断路器变形甚至断裂，在断路器结构设计中应考虑这种风力负荷。据气象学提供的数据，10

级风作用在一个平方米上的力约为70公斤。我国强台风地区的风力可达11~12级。

#### 5.大雨

户外断路器如密封不良，将漏进雨水，使绝缘强度降低、金属零件生锈。根据标准规定，断路器应作防雨性能试验。具体作法是用降雨设备从断路器五个方面（四个侧面及上面），雨滴与水平面成 $45^\circ$ ，淋雨24小时，雨量不小于每分钟3毫米。

#### 6.污秽

沿海地区和重工业集中地区，尤其是火电厂、炼油厂、水泥厂、化工厂和沿海油田等地区，空气中污秽严重，经常发生断路器绝缘件污闪事故。特别是秋末冬初和冬末春初之际，以及天气久晴之后，绝缘件上积秽较多，碰到毛毛雨天气就更为严重。

#### 7.地震

我国处于太平洋和南亚两大地震区间，是一个多地震国家。少油、空气等高压断路器结构细长，地震时容易造成断裂损坏。

#### 8.湿热地区

湿热地区的特点是：湿度高，相对湿度高达95%；雨量大，最大降雨强度可达10分钟50毫米；气温高，最高温度可达 $40^\circ\text{C}$ ，阳光直射下黑色物体表面最高温度可达 $80^\circ\text{C}$ ；此外还有霉菌，昆虫等造成的生物危害。这些对电力设备都有不利影响。因此，我国除生产一般电气设备外还专门生产一类三防产品（防湿热，防霉，防盐雾）以满足湿热地区的需要。

#### 9.干热地区

干热地区自然环境的特点是：空气温度为 $-5\sim 50^\circ\text{C}$ ，阳光直射下黑色物体表面最高温度可达 $90^\circ\text{C}$ ，有昆虫砂尘。在这种气候条件下，断路器的绝缘工作条件将更困难。

### 第三节 高压断路器的特点

高压断路器与其它高压电力设备如电机、变压器、电抗器、



电容器等相比，有以下特点：

(1) 结构的多样性：高压断路器从灭弧原理上讲有多油、少油、空气、六氟化硫、真空、磁吹、自产气等多种类型。各类产品在原理、结构上差别很大。即使是同一类型的断路器，由于厂家、生产年代、参数的不同，在结构上又常有很大差别。这一点与电机、变压器等结构类型较少的产品比较，是很突出的。由于断路器的原理和结构不同，产品的性能、可靠性和经济性有时会有很大的差别。

(2) 试验的重要性：发电机、变压器等电力设备的基本工作过程，现在已比较清楚，理论分析与设计计算的方法也比较成熟。而断路器的基本现象——电弧的物理过程至今尚不很清楚，有关电弧的理论分析、设计计算方法更是十分粗糙。一种新结构的断路器常常要经过大量试验研究，多次的修改才能成功。因此，高压断路器的试验设备和试验技术对断路器的发展起着决定性的作用。

(3) 要求高度的可靠性：高压断路器是电力系统最重要的保护设备。它与被保护的设备如发电机、变压器等相比，价格要低很多，但断路器发生故障所造成的损失，如引起其它电力设备的损坏或系统停电，这些损失比断路器本身的价值要大得多。因此要极端重视断路器工作的可靠性，在设计，加工，装配，调整，检验，运行，维修等各方面都要精心，以保证断路器在各种环境下，各种工作过程中不出故障，而且，对周围环境也不带来有害的影响。

由于高压断路器所承担的重要作用，运行部门十分重视维护工作，并积累了大量的经验。统计分析，断路器在使用中出现的故障，对研制新产品有很大帮助。

高压断路器的故障，按照发生次数的多少排列，大致顺序为：

- (1) 动作失灵的故障——如拒分、拒合、动作卡滞等。
- (2) 密封失效的故障——如漏水（雨）、漏油、漏气等。