

张节容 钱家骊 王伯翰 吉嘉琴 徐国政

高压电器原理和应用

A large, stylized graphic of a lightning bolt, composed of several overlapping, jagged, triangular shapes in shades of yellow and red, extending from the top right towards the bottom left of the cover.

清华大学出版社

内 容 提 要

本书叙述高压断路器、操动机构、熔断器、负荷开关、隔离开关以及电流、电压互感器的基本理论和工作原理。

基本理论部分包括：电动力，发热，电接触，电弧以及各种电路的关合与开断过程和试验方法。

工作原理部分包括：油断路器，气吹断路器，真空断路器，断路器的操动机构，熔断器，负荷开关与隔离开关，以及电流、电压互感器的工作原理，性能，结构分析和运行中的一些问题等。

本书可作为高等工科院校电器专业，高电压技术与设备专业的教材；电力及有关专业的参考教材；函授大学电器专业的自学教材。本书也可供从事高压电器设计，试验研究，运行维修的技术人员学习参考。

高压电器原理和应用

张节容 钱家骥 王伯翰

吉嘉泰 徐国政

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京海淀昊海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：23 字数：574 千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数：0001-8000

ISBN 7-302-00304-1/TM·4 (课)

定价：4.95元

前 言

高压电器的理论牵涉面较广，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，既有稳态过程也有暂态过程方面的内容；在力的方面则牵涉到静力学、动力学和流体力学方面的内容。

与其它电力设备的理论相比较，高压电器的理论还比较粗糙，不够系统，加上高压电器所涉及的产品品种与问题又十分复杂，也很难形成成套的设计与计算方法。

根据上述情况，作者在编写本书时希望能够比较基本、比较系统地介绍有关的理论和原理，介绍或推导出便于分析或估算的计算公式，以便帮助读者能够比较全面地考虑有关高压电器的技术问题，比较好地理解各种现象和过程，能作出必要的判断或估算，也为阅读有关文献杂志深入研究一些难度较大的问题打下基础。

本书前半部是高压电器的基本理论部分。内容包括：电动力，发热，电接触，电弧以及各种电路的开断过程与试验方法。

后半部是高压电器的工作原理。内容包括：油断路器，气吹断路器，真空断路器，断路器的操动机构，熔断器、负荷开关与隔离开关，电流、电压互感器的工作原理、性能、结构分析和运行中的一些问题。

本书第一、四、六、八、九、十二、十三章由张节容编写；第五、十四章由钱家骊编写，第十、十一章由王伯翰编写，第二、三章由吉嘉琴编写，第七章由徐国政编写，并由张节容作最后审校。

本书可作为高等工业院校的电器专业，高电压技术与设备专业，电力及有关专业的教材；函授大学电器专业的自学教材。本书也可供从事高压电器设计，试验研究，运行维修人员学习参考。

由于编者各方面水平有限，错误及不当之处在所难免，希望读者指正。

目 录

前言

第一章 绪论

第一节 高压电器的用途和分类	1
第二节 高压电器的主要要求	3
第三节 高压电器的特点	8
第四节 我国高压电器的生产情况	9

第二章 电动力

第一节 概述	10
第二节 计算电动力的两种基本方法	13
第三节 平行导体间的电动力	15
第四节 垂直导体间的电动力	18
第五节 导体截面形状对电动力的影响	20
第六节 交流电动力	24
第七节 短路时的电动力	29
第八节 电动力计算举例	31
第九节 推力电磁机构电动力的计算	32
思考题和习题	39
参考文献	41

第三章 发热

第一节 允许温度	42
第二节 热的产生	45
第三节 绝热升温	51
第四节 传热的基本方式及其计算	55
第五节 少油断路器长期发热的计算举例	69
第六节 发热体升温过程	72
思考题和习题	76
参考文献	77

第四章 电接触

第一节 电接触的分类和要求	78
第二节 接触电阻	78
第三节 影响接触电阻的因素	84
第四节 接触电阻计算公式	87
第五节 电接触在长期工作中的问题	88
第六节 电接触通过短路电流	92
第七节 触头的关合过程	94
第八节 触头的电磨损	97

第九节 多接触点的滑动接触.....	100
思考题和习题.....	104
参考文献.....	105
第五章 电弧	
第一节 电弧现象.....	106
第二节 电弧的物理过程.....	107
第三节 电弧特性.....	113
第四节 直流电弧的燃烧和熄灭.....	117
第五节 交流电弧的熄灭.....	123
第六节 开关电弧的动态数学模型.....	132
思考题和习题.....	135
参考文献.....	136
第六章 短路故障的开断	
第一节 恢复电压的基本概念.....	137
第二节 单相电路开断时的恢复电压.....	139
第三节 三相电路开断时的恢复电压.....	142
第四节 三相电路开断时的瞬态恢复电压.....	150
第五节 瞬态恢复电压的表示方法和影响因素.....	152
第六节 近区故障.....	159
第七节 失步故障.....	163
第八节 发展性故障.....	167
第九节 并联开断.....	168
思考题和习题.....	170
参考文献.....	170
第七章 高压断路器的开断与关合试验	
第一节 概述.....	171
第二节 短路开断试验的有关规定.....	171
第三节 试验参数的量测与试验结果的处理.....	172
第四节 短路开断试验装置.....	175
第五节 断路器开断试验的方法.....	182
第六节 近区故障开断试验.....	184
第七节 电感性小电流的开断试验.....	185
第八节 空载线路的开断试验.....	186
思考题和习题.....	186
参考文献.....	187
第八章 电容性和电感性小电流的合分	
第一节 合分电容性负荷的基本情况.....	188
第二节 关合空载输电线路.....	189
第三节 关合电容器组.....	192
第四节 开断单相电容器组.....	198

第五节 开断三相电容器组.....	201
第六节 开断空载输电线路.....	205
第七节 隔离开关开断空载母线.....	210
第八节 降低容性电路开断时的过电压的并联电阻.....	214
第九节 开断空载变压器和电抗器.....	218
第十节 开断高压感应电动机.....	223
思考题和习题.....	231
参考文献.....	231
第九章 油断路器	
第一节 概述.....	232
第二节 多油断路器和少油断路器.....	234
第三节 油断路器的灭弧室.....	236
第四节 灭弧室压力过程分析.....	240
第五节 影响灭弧性能的因素.....	246
第六节 多断口少油断路器的均压问题.....	254
第七节 油断路器开断空载线路的性能.....	256
思考题和习题.....	260
参考文献.....	260
第十章 真空断路器	
第一节 概述.....	261
第二节 真空绝缘与击穿.....	262
第三节 真空电弧.....	266
第四节 真空开关的触头.....	273
思考题和习题.....	277
参考文献.....	277
第十一章 气吹断路器	
第一节 SF ₆ 的主要性质.....	278
第二节 流动气体的特性.....	285
第三节 气吹灭弧原理.....	291
第四节 SF ₆ 断路器.....	296
第五节 SF ₆ 全封闭组合电器 (GIS)	304
思考题和习题.....	307
参考文献.....	307
第十二章 操动机构	
第一节 概述.....	308
第二节 对操动机构的要求.....	308
第三节 操动机构分类.....	313
第四节 断路器操动机构的特点.....	324
思考题和习题.....	325
参考文献.....	325

第十三章 高压熔断器、隔离开关和负荷开关

第一节	熔断器的工作原理与参数	326
第二节	高压熔断器的结构	330
第三节	石英砂熔断器的限流特性	334
第四节	全量程保护熔断器	335
第五节	熔断器动作的选择性	337
第六节	熔断器使用中的常见故障	338
第七节	隔离开关	339
第八节	接地开关	341
第九节	负荷开关	342
	思考题和习题	343
	参考文献	343

第十四章 高压互感器

第一节	互感器的用途、要求和基本参数	344
第二节	电压互感器	346
第三节	电磁式电流互感器	351
第四节	高压互感器的新进展	356
	思考题和习题	359
	参考文献	360

第一章 绪 论

第一节 高压电器的用途和分类

国民经济的发展对电能的需要不断提出新的要求，促进了大容量水电站，火电站和原子能电站的加速建设。为了就近取得一次能源或是由于环境保护的要求，这些大容量的电站往往离开负荷中心很远。要把强大的电能通过输电线路输送到负荷中心，光有发电机、变压器与输电线路是不够的，还需要有各种的高压电器。

高压电器是在高压（电压高于 3kV）线路中用来实现关合、开断、保护、控制、调节、量测作用的电器设备。按照高压电器功能的不同，可以分成三大类。

1. 开关电器

主要用来关合与开断正常的电路与故障的电路，或用来隔离高压电源。根据性能不同又可分为：

(1) 高压断路器——它能关合与开断正常情况下的各种负载电路（包括空载变压器，空载输电线路等），也能在线路中出现短路故障时关合与开断短路电流，而且还能实现自动重合闸的要求。它是开关电器中性能最为全面的一种电器。

(2) 熔断器——俗称保险。当线路中负荷电流超过一定限度或出现短路故障时能够自动开断电路。电路开断后，熔断器必须更换部件后才能再次使用。

(3) 负荷开关——只能在正常工作情况下关合和开断电路。负荷开关不能开断短路电流。

(4) 隔离开关——用来隔离电路或电源。隔离开关只能开断很小的电流。例如长度很短的母线空载电流，容量不大的变压器的空载电流等。

(5) 接地开关——供高压与超高压线路检修电气设备时，为确保人身安全而进行接地用。接地开关也可用来人为地造成电力系统的接地短路，达到控制保护的目的。

2. 量测电器

(1) 电流互感器——用来测量高压线路中的电流，供计量与继电保护用。

(2) 电压互感器——用来测量高压线路中的电压，供计量与继电保护用。

3. 限流与限压电器

(1) 电抗器——实质上就是一个电感线圈，用来限制故障时的短路电流。

(2) 避雷器——用来限制过电压。使电力系统中的各个电器设备免受大气过电压和内过电压等的危害。

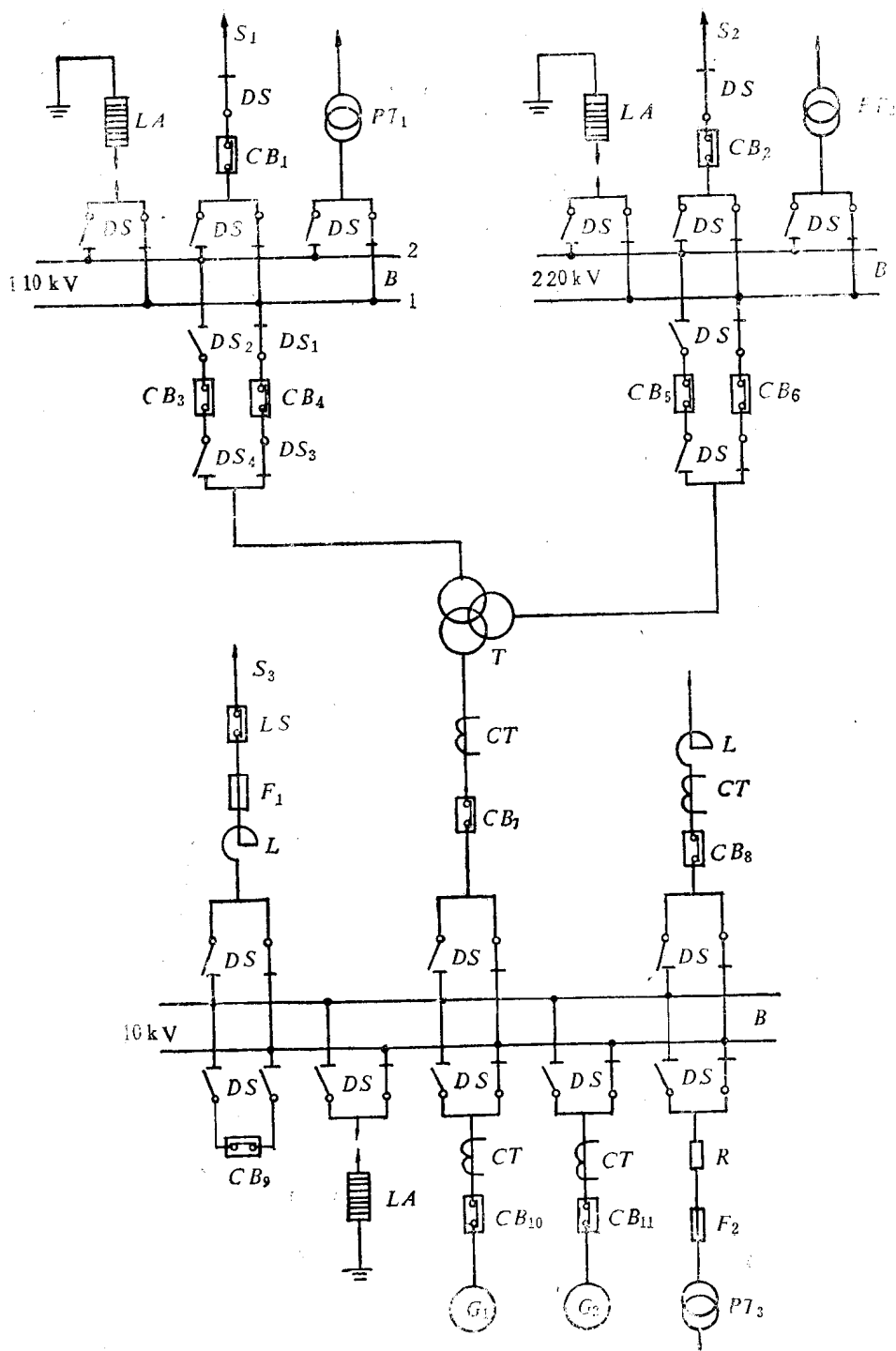


图 1.1 电力系统中各种高压电器

G——发电机；B——母线；CB——断路器；DS——隔离开关；LS——负荷开关；F——熔断器；
CT——电流互感器；PT——电压互感器；T——变压器；L——电抗器；LA——避雷器；R——电阻器

这些高压电器都是保证电力系统安全可靠运行必不可少的电器设备。本书中只讨论高压开关电器与量测电器。我们可以通过图 1.1 的实例清楚地看到它们的功能。分述如下：

- (1) 根据需要,可利用断路器 CB 或负荷开关 LS 人为地关合或开断某些电路。
- (2) 当 $S_1, S_2, S_3 \dots$ 等处发生短路故障时,可由断路器 CB_1, CB_2 , 熔断器 $F_1 \dots$ 开断电路。
- (3) 110kV, 220kV 及 10kV 的母线电压由电压互感器 PT_1, PT_2 , 与 PT_3 测量。
- (4) 各线路上的电流由串接在各线路中的电流互感器 CT 测量
- (5) 当 110kV 母线 1 需要停电检修, 负荷需由母线 1 倒换到母线 2 时, 可先关合隔离开关 DS_2 和 DS_4 , 再关合断路器 CB_2 使母线 2 带电。接着再由各分支线路中的隔离开关使负荷倒换到母线 2 上, 随后再开断断路器 CB_1 及隔离开关 DS_1 和 DS_3 , 母线 1 不再带电。
- (6) 断路器 CB_1 需要检修时, 可先令断路器 CB_1 开断电路, 再将断路器两侧的隔离开关开断, 保证断路器确与电源隔离并安全接地后方可对断路器 CB_1 进行检修。
- (7) 避雷器 LA 用来限制过电压
- (8) 电阻器 R 用来限制短路电流, 是熔断器 F 自身要求配置的。
- (9) 电抗器 L 用来限制短路电流。

第二节 高压电器的主要要求

1. 一般电气性能方面的要求

高压电器既要长期装设在电力系统中, 就应能承受各种电压、电流的作用而不致损坏。

(1) 电压方面

一定额定电压的高压电器, 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

高压电器导电部分长期通过工作电流时, 各部分的温度不得超过允许值。有关允许温度的规定可参看有关标准。高压电器导电部分通过短路电流时, 不应因电动力而受到损坏, 各部分温度不应超过短时工作的温度允许值, 触头不应发生熔焊或损坏。

标志这方面性能的参数是: 额定电流 I_n , 额定动稳定电流 I_{dm} (峰值), 额定热稳定电流 I_{th} 和额定热稳定时间 t_{th} (2s 或 4s)。

额定动稳定电流 I_{dm} , 额定热稳定电流 I_{th} , 额定短路开断电流 I_k , 额定短路关合电流 I_{cs} (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，它们之间的关系可用图 1.2 表示。

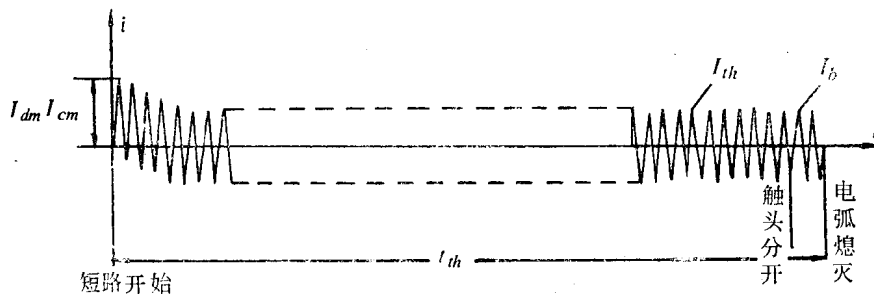


图 1.2 各电流额定值之间的关系

各电流额定值之间的关系可用下式表示：

$$I_{dm} = I_{cm} \quad (1-1)$$

$$I_b = I_{th} \quad (1-2)$$

$$I_{cm} = 1.8 \times \sqrt{2} I_b = 2.55 I_b \quad (1-3)$$

例如，设计一个断路器，要求额定开断电流 $I_b = 31.5 \text{ kA}$ ，则其它电流的额定值为：

额定动稳定电流 $I_{dm} = 2.55 \times 31.5 = 80 \text{ kA}$ ；

额定关合电流 $I_{cm} = I_{dm} = 80 \text{ kA}$ ；

额定热稳定电流 $I_{th} = I_b = 31.5 \text{ kA}$ 。

2. 自然环境方面的要求

高压电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

海拔高度对高压电器主要有两方面的影响：

(i) 对外部绝缘的影响。海拔高的地区，大气压力低，耐压水平随之降低。例如在海拔 1000m 以下能承受工频耐压 42kV，一分钟的高压电器，在海拔超过 3000m 的地区，只能耐压 38kV。根据标准规定，用于高海拔地区（高于 1000m，低于 3500m）的电器产品，如在低海拔地区进行耐压试验时，试验电压应该提高。其试验电压为标准规定值乘以修正系数 $x (x > 1)$

$$x = \frac{1}{1.1 - \frac{H}{10000}} \quad (1-4)$$

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

(ii) 对电器发热温度的影响。高海拔地区空气稀薄，散热差，允许通过的电流应该减小一些。

在我国，海拔低于 1000m 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，一般电器设备的使用环境按海拔低于 1000m 及 2500m 两档考虑

(2) 环境温度

高压电器有关标准规定，产品使用的环境温度为 -40°C 至 $+40^{\circ}\text{C}$ 。温度过低会使变压器油、液压油及润滑油的粘度增加，影响开关电器的分、合闸速度。温度过低还会使 SF_6 气体液化，使 SF_6 电器设备无法正常工作。密封材料在低温下会出现性能劣化，造成电器设备的漏气漏油。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电器产品，要考虑日照的影响，在太阳光的直射下很容易过热。标准建议，周围环境温度每增加 1°C ，额定电流应减小1.8%；每降低 1°C ，额定电流可增加0.5%，但最大不得超过20%。温度过高，空气绝缘性能也会降低。标准规定，用于高温地区的高压电器在常温地区进行耐压试验时，试验电压要适当提高。从 40°C 开始，每超过 3°C ，试验电压提高1%。

(3) 湿度

我国长江以南地区，湿度很大，全年很长时间的相对湿度在90%以上。这样大的湿度，容易引起金属零件锈蚀，绝缘件受潮，油漆层脱落甚至影响运动部分的可靠动作。

(4) 风速

过大的风速有可能使结构细长的高压断路器，隔离开关等设备出现变形甚至断裂。在高压电器结构设计时应考虑风力负荷的影响。据气象学提供的数据，10级风作用在 1m^2 上的风力约为70kgf。我国强台风地区的风力可达11级。风力的影响不容忽视。

(5) 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，经常出现高压电器绝缘件表面的污闪事故。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严重。

(6) 大雨

户外用高压电器如密封不良，将会漏进雨水，使绝缘强度降低，金属零件生锈，高压电器设计时应考虑防雨措施。

(7) 地震

我国处于太平洋和南亚两大地震区，是一个多地震国家。某些结构细长的高压电器，抗震性能差，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，最大降雨强度可达十分钟50mm；气温高，最高温度可达 40°C ，阳光直射下的黑色物体表面最高温度可达 80°C ；此外还有霉菌，昆虫等造成的生物危害。这些对电器设备都有不利影响。因此，我国除生产一般电器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

干热地区的特点是：环境温度为 -5°C ~ 50°C ，阳光直射下的黑色物体表面最高温度可达 90°C ；有昆虫，砂尘。在这种气候条件下，高压电器的绝缘工作条件将更困难。

3. 其它方面的要求

高压电器的品种很多,要求也不相同。例如对于测量用的电流、电压互感器还有误差方面的要求。断路器是高压电器中结构最为复杂,功能最为全面的开关电器,因此对于断路器的要求常常比其它高压电器高得多,这些要求可归纳为:

(1) 开断短路故障

电力系统中发生短路故障时,短路电流比正常负荷电流大很多,这时电路很难开断。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主要参数是:额定电压 $U_n(\text{kV})$ 与额定开断电流 $I_n(\text{kA})$ 。

(2) 关合短路故障

电力系统中的电器设备或输电线路有可能在未投入运行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”。当断路器关合有预伏故障的电路时,在关合过程中,通常在动、静触头尚未机械接触前,触头间隙在电压作用下即被击穿(称为预击穿),随即出现短路电流。短路电流产生的电动力往往对断路器的关合造成很大的阻力,有些情况下甚至出现动触头合不到底的情况。这样在触头间会形成持续的电弧,可能造成断路器的损坏或爆炸。为了避免出现这一情况,断路器应具有足够的关合短路电流的能力。标志关合短路电流能力的参数是断路器的额定短路关合电流 I_{cs} ,用峰值表示。

(3) 快速开断

电力系统发生短路故障后,要求继电保护系统动作越迅速,断路器开断电路越快越好。这样可以缩短电力系统短路故障存在的时间,减小短路电流对电器设备造成的危害。更重要的是,在超高压电力系统中,缩短短路故障的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,如图 1.3 所示。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断路器的全开断时间 $t_0(\text{s})$ 。 t_0 是从断路器接到分闸信号,到短路电流开断(电弧熄灭)的全部时间。

全开断时间为固有分闸时间 t_1 和燃弧时间 t_2 之和。固有分闸时间为断路器接到分闸信号到动、静触头分离这一段时间。燃弧时间是从触头分离到各相中电弧全部熄灭的时间,如图 1.4 所示。对于超高压断路器,固有分闸时间 t_1 与燃弧时间 t_2 都应尽量缩短。

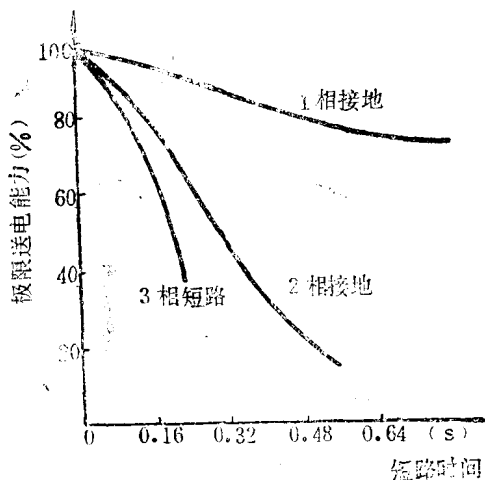


图 1.3 短路故障时间对输电线路输送能力的影响

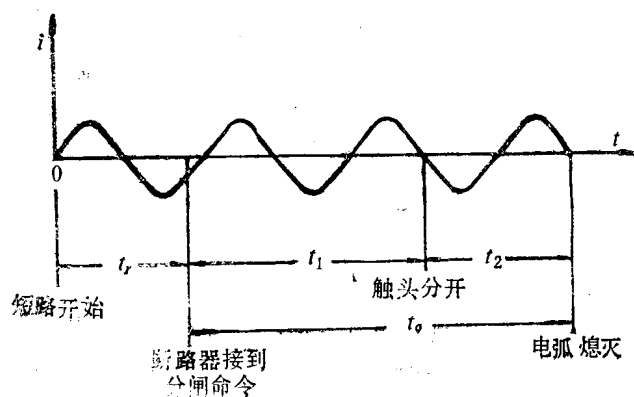


图 1.4 断路器的开断时间

t_r —— 继电保护动作时间； $t_0 = t_1 + t_2$ ； t_0 —— 短路故障时间， $t_s = t_r + t_0$

(4) 自动重合闸

架空线路的短路故障，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，断路器开断故障电路；随后经很短时间 θ 又自动关合电路。断路器重合后，若短路故障仍未消除，则断路器将再次开断故障电路。此后，在有些情况下，由运行人员在断路器开断故障电路一定时间后（例如 180s），再次发出合闸信号，让断路器关合电路，叫做“强送电”。强送电后，若故障仍未消除，断路器还需开断一次短路故障。断路器的上述操作过程称为“自动重合闸操作顺序”，写为

“分—— θ ——合分—— t ——合分”

其中 θ 是从断路器开断电路到电路重新接通的时间，称为无电流时间，其值为 0.3s，必要时可选用 0.5s； t 为强送电时间，一般为 180s。

断路器在自动重合闸操作顺序的有关时间（未包括强送电）见图 1.5。

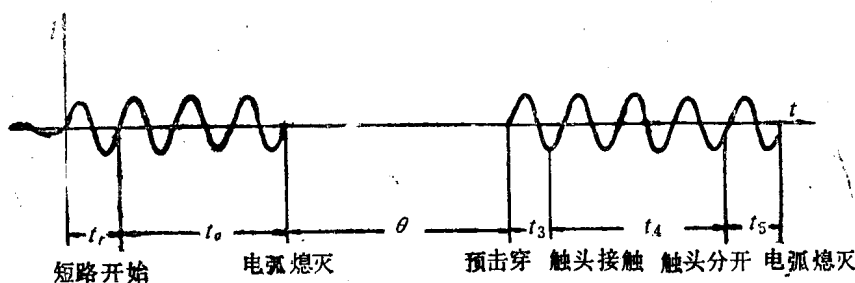


图 1.5 自动重合闸操作顺序（不包括强送电）的有关时间

t_0 —— 断路器全开断时间； t_3 —— 预击穿时间； t_4 —— 金属短接时间； t_5 —— 燃弧时间； t_{s1} —— 第一次短路故障时间， $t_{s1} = t_0 + t_3$ ； t_{s2} —— 第二次短路故障时间， $t_{s2} = t_0 + t_4 + t_5$

采用自动重合闸的断路器，在上述很短时间内应能可靠地连续关合和开断几次短路故障。这种连续多次开合短路故障比开断一次短路故障的负担显然要严重得多。此外，在超高压电力系统中，为了提高系统的稳定性，要求断路器的动作时间愈短愈好，为此图 1.5 中的几个时间都应设法缩短，提高断路器的分合闸速度是缩短短路故障时间行之有效的方法。

对于保护发电机、电动机、变压器、电容器组以及电缆线路等的断路器，一般不采用自动重合闸的操作方式。这类断路器只需满足非自动重合闸操作顺序即可。非自动重合闸的操作顺序为

“分—— t ——合分—— t ——合分”

t 取 180s。

(5) 分合各种空载和负载电路

运行过程中，断路器有时需要关合、开断空载输电线路、空载变压器、电容器组、并联电抗器、高压电动机等电路。合分这些电路的主要问题是可能产生高的过电压。标志这方面分合能力的主要参数是额定电压 U_n (kV)，能顺利分合各种负载的电流 I (A)。

(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）为 2000 次。控制电容器组、电动机等经常操作的断路器，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荷电流的次数）。一般说来，断路器应有尽可能长的合分短路电流的电寿命。对用于保护、控制的经常操作的断路器，更应有连续合分几千次以上负荷电流的电寿命。电寿命也可用累计开断电流值（kA）来表示。

(7) 对周围环境的影响

断路器在开断短路电流时往往会出现排气、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、喷火现象，在人口稠密地区，断路器操作时的噪音也不得过大。

第三节 高压电器的特点

高压电器与电力系统中其它设备如发电机、变压器、电抗器和电容器相比有以下特点：

(1) 高压电器包括的范围很广，各种电器设备都是电力系统中的重要设备，任一环节出现问题都将对电力系统造成严重的危害。因此要求高压电器的性能必须绝对可靠。在设计、加工装配、调整、检验、运行、维修方面都要精心。以保证在各种环境下，各种工作过程中都不出故障，而且对周围环境也不带来有害的影响。

(2) 绝大部分的高压电器都在户外工作，要经受酷暑严寒，风吹雨打的考验。特别是对于具有运动部分的高压开关电器来说，如何做到不进水，不锈蚀，该动时能够正确动作，不该动作时不会误动，是件十分复杂的事情。

(3) 高压电器特别是高压开关电器牵涉到的问题很多。特别是电弧的物理过程至

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。一种新结构的高压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。

(4) 高压电器的品种繁多，结构与原理也不尽相同。就以高压断路器为例，从灭弧原理上讲就有多油、少油、空气、六氟化硫、真空、磁吹、自产气等各种类型；操动机构又有手动、电磁、弹簧、气动、液压等不同结构。即使是同一类型的断路器，由于厂家、生产年代、技术参数不同，在结构上又常有很大的差别。因此高压电器的设计很难形成一套较为系统较为完整的设计方法。

第四节 我国高压电器的生产情况

解放前，我国基本上没有高压电器制造工业，几乎全部高压电器都来自国外。解放后，高压电器制造工业得到了飞速的发展。目前，除了沈阳高压开关厂，西安高压开关厂，平顶山高压开关厂，华通开关厂，北京开关厂五大开关厂外，各省市还有很多中小型高压开关厂，能够生产 500kV 及以下电压等级的各种高压电器产品。在试验基地方面，我国先后在西安高压电器研究所，沈阳高压开关厂，华通开关厂，北京电力科学研究院建立了断流容量试验室，为推动高压电器新产品的研究与制造，创造了良好的条件。

近年来，在开放政策的指导下，很多工厂又从国外引进了先进技术，使我国高压电器制造水平又向前迈进了一大步。很多工厂都能生产 500kV 及以下电压等级的六氟化硫断路器以及 220kV 及以下电压等级的六氟化硫全封闭组合电器，在技术参数上已达到了国外的先进水平。我国自行设计的 60, 110, 220kV 少油断路器，额定开断电流已由原来的 20kA 增加到 31.5kA 和 40kA，开断空载长线时可以做到无复燃和重击穿，达到了国际先进水平。10kV 与 35kV 的配电用断路器也由原来单一的品种——少油断路器发展出真空断路器与六氟化硫断路器，这些新产品的出现将为配电设备无油化问题创造了条件。

在隔离开关方面，已能生产 500kV 及以下电压等级的单柱式、双柱式和三柱式隔离开关。

在互感器方面，已经生产出电容式电压互感器，电磁式电压互感器以及各种类型的电流互感器，并正在开展光电互感器的研制工作。

我国高压电器制造工业基本上已能满足我国电力工业发展的需要，但与国外相比，我国高压电器制造水平还存在很大的差距。最突出的问题是新产品研制周期长，产品的质量不够稳定。主要原因在于基本理论的研究工作不够广泛与深入；工艺与材料方面的研究工作远远落后生产发展的需要；工厂的技术装备及工人的技术水平还不能满足新产品发展的需要。随着这些问题的解决，我国高压电器的制造水平必将以更高的速度向前发展。

第二章 电 动 力

第一节 概 述

在磁感应强度为 B 的磁场里以速度 v 运动的电荷 Q 会受到磁场力的作用。磁场对运动电荷的作用力 F 称为洛伦兹力。当电荷以速度 v 垂直于磁感应强度 B 运动时，运动电荷受到的磁场力最大， $F=QBv$ ，当 v 与 B 成一定的夹角 θ 时（见图 2.1），运动电荷受到的洛伦兹力 F 仅取决于与磁场相垂直的速度分量，其大小为

$$F=QBv\sin\theta \quad (2-1)$$

力的方向如图 2.1 所示，垂直于 B 和 v 所组成的平面。

载流导体在磁场中也会受到磁场对电流的作用力，本质上就是导体中定向运动的电荷在磁场中所受到的洛伦兹力的迭加。这种力称为电动势。

图 2.2 中，假定磁场是均匀的，磁感应强度为 B ，导体的长度为 l ，截面积为 S ，通过的电流为 I ，而且电流 I 的方向与 B 的方向互相垂直；又设 m 和 Q 分别为运动电荷的质量和电量，则每个电荷受到的洛伦兹力为

$$f=QBv$$

设导体中单位体积内的运动电荷数为 n ，则长度为 l 的导体内电荷总数为

$$N=nlS$$

所以全部电荷受到的洛伦兹力的合力，即导体所受的电动势为

$$F=Nf=nlSQBv$$

又因 $I=QnvS$ ，所以上式可写成

$$F=BIl \quad (2-2)$$

如果电流 I 与磁感应强度 B 的方向成 β 角，见图 2.3(b)，则电动势的大小为

$$F=BIl\sin\beta \quad (2-3)$$

电动势 F 的方向可按图 2.3(b) 中所示的左手定则确定，即：手心向着 B ，伸直的四指与 I 同向，则大拇指的指向就是电动势 F 的方向。

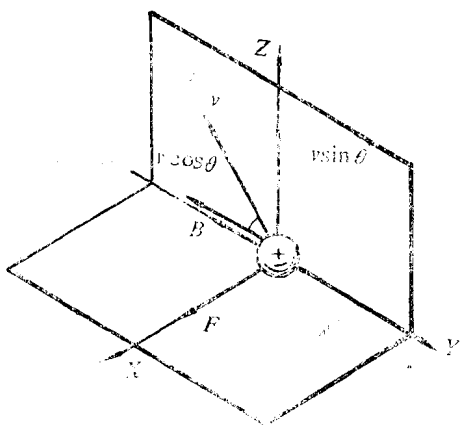


图 2.1 洛伦兹力的大小和 v 与 B 的关系