

电机工程手册

第24篇 高压开关设备

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

73.21073/210

73.21073
210
24:1

电机工程手册

第24篇 高压开关设备

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会



机械工业出版社

本篇主要介绍高压开关设备(包括断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器、接地短路器和以上述开关元件为主的组合或成套电器)的概况、用途、分类、基本原理、结构特点以及基本的、常用的技术数据。

全篇共分12章。第1章概述,着重勾划概貌;第2、3、4、5章介绍交流电弧的熄灭过程、绝缘和绝缘结构、载流导体与电接触、传动与运动特性等高压开关设备所共有的一些基本问题;第6、7、8、9、10章分别介绍各种开关产品和操动机构的结构特点、设计制造关键问题及运行维护中应注意的主要事项等;第11章介绍制造工艺特点及较重要的特殊工艺;第12章介绍产品的性能试验。

电机工程手册

第24篇 高压开关设备

(试用本)

西安高压电气研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

浙江新华印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 13·字数 370 千字

1979年9月浙江第一版·1979年9月浙江第一次印刷

印数: 00,001—57,000·定价: 0.97 元

*

统一书号: 15033·4615

编辑说明

(一)我国自建国以来,机械工业在毛主席的革命路线指引下,贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验,同时采用国外先进技术,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二)这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。

(三)这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的基础理论,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查。读者在综合研究和处理技术问题,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四)参加这两部手册编写工作的,有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员,更为广泛。许多地区的科技交流部门,为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、

定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五)为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六)本篇是《电机工程手册》第24篇。由西安高压电器研究所主编，参加编写的有沈阳高压开关厂、北京开关厂、湖南大学、西安高压开关厂、上海开关厂、平顶山开关厂、湖南开关厂、南京电瓷厂、抚顺电瓷厂等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会编辑组

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 概 述

- 1 作用24-1
- 2 电力系统对高压开关设备的具体要求
.....24-3
- 3 分 类24-3
- 4 基本组成24-3
- 5 主要技术参数24-4
- 6 技术发展24-4

第2章 交流电弧的熄灭过程

- 1 电弧的特征和熄灭原理24-5
 - 1.1 气体电弧.....24-5
 - 1.2 真空电弧.....24-9
- 2 电路的开断过程24-10
 - 2.1 分类及特点24-10
 - 2.2 一般短路开断24-10
 - 2.3 其它开断和关合过程24-16

第3章 绝缘和绝缘结构

- 1 绝缘分类和特点24-18
 - 1.1 绝缘分类24-18
 - 1.2 绝缘特点24-21
- 2 绝缘距离的确定24-21
 - 2.1 确定绝缘距离的一般方法24-21
 - 2.2 空气中和油中绝缘距离的确定24-24
 - 2.3 压缩空气、 SF_6 气体及真空中的绝缘
距离的确定24-24
 - 2.4 特殊环境的绝缘要求24-27
- 3 电压分布与均压措施24-28
 - 3.1 多节支柱绝缘子的电压分布及有关计算
.....24-28
 - 3.2 断口的电压分布和均压措施24-29

第4章 载流导体与电接触

- 1 载流导体的发热与热计算.....24-30
 - 1.1 发热及允许温升24-30
 - 1.2 长期工作时的热计算24-31
 - 1.3 短时通过短路电流的热计算24-37
- 2 电动力24-37
 - 2.1 电动力的计算方法24-38
 - 2.2 交流电流产生的电动力24-38
- 3 电接触24-40
 - 3.1 分类及要求24-40
 - 3.2 接触电阻24-42
 - 3.3 可分触头的工作情况24-43
 - 3.4 触头材料及触头结构24-43
 - 3.5 触头设计要点24-45

第5章 传动与运动特性

- 1 机械传动.....24-48
 - 1.1 连杆机构及其常用类型24-48
 - 1.2 四连杆机构的特性24-50
 - 1.3 断路器分、合闸速度及其计算24-51
- 2 液压传动.....24-53
 - 2.1 分类、特点24-54
 - 2.2 管路系统压力损失计算24-54
 - 2.3 液压缸活塞运动速度的近似计算24-55
- 3 压缩空气传动24-55
 - 3.1 容器充、放气过程及其参数24-55
 - 3.2 压缩空气传动特性计算24-57
- 4 缓 冲24-58
 - 4.1 分类及其特点24-58
 - 4.2 油缓冲器制动特性计算24-58
 - 4.3 弹簧缓冲器制动特性计算24-59
 - 4.4 气体缓冲器制动特性计算24-59
 - 4.5 橡皮缓冲器特性计算24-59

第6章 断 路 器

- 1 油断路器24-61

1.1	基本组成及动作原理	24-61
1.2	设计要点	24-61
1.3	总体布置	24-62
1.4	绝缘结构	24-65
1.5	传动系统	24-66
1.6	触头系统	24-69
1.7	灭弧系统	24-71
1.8	某些部件的设计	24-79
1.9	安装、运行与检修	24-81
2	压缩空气断路器	24-82
2.1	分类	24-83
2.2	结构原理	24-84
2.3	总体布置	24-87
2.4	气吹灭弧室	24-88
2.5	主绝缘结构	24-93
2.6	某些部件设计	24-95
2.7	安装、使用与维修	24-100
3	六氟化硫(SF ₆)断路器	24-102
3.1	总体结构	24-102
3.2	灭弧室结构	24-102
3.3	单压式SF ₆ 灭弧室的主要结构参数	24-103
3.4	使用与维护	24-104
4	固体产气断路器	24-106
4.1	结构示例和动作原理	24-106
4.2	设计要点	24-107
4.3	使用与维护	24-109
5	磁吹断路器	24-109
5.1	结构原理	24-109
5.2	电弧螺管式磁吹灭弧装置设计要点	24-110
5.3	维护要点	24-111
6	真空断路器	24-111
6.1	总体结构	24-111
6.2	真空灭弧室	24-112
6.3	操动机构	24-118
6.4	使用与维护	24-118

第7章 隔离开关

1	用途与分类	24-119
2	结构简介	24-119

2.1	结构形式	24-119
2.2	结构示例	24-121
3	设计要点	24-123
3.1	总体设计	24-123
3.2	绝缘结构	24-124
3.3	导电结构	24-125
3.4	机械结构	24-127
4	安装与运行	24-130
4.1	安装方式	24-130
4.2	开断小电流性能	24-131
4.3	电接触性能	24-131
4.4	机械操作性能	24-131

第8章 简易电器

1	接地短路器	24-131
1.1	分类与特点	24-131
1.2	结构示例及动作原理	24-132
1.3	设计要点	24-132
1.4	使用与维护	24-133
2	负荷开关	24-133
2.1	分类与特点	24-133
2.2	结构示例	24-133
2.3	设计要点	24-134
2.4	使用与维护	24-134
3	高压熔断器	24-134
3.1	限流式熔断器	24-134
3.2	跌落式熔断器	24-135

第9章 成套电器与组合电器

1	成套配电装置	24-137
1.1	分类	24-137
1.2	设计要点	24-137
1.3	固定式成套配电装置的结构设计	24-141
1.4	手车式成套配电装置的结构设计	24-141
1.5	发展动向	24-143
2	矿用配电装置	24-143
2.1	分类	24-143
2.2	特点	24-144
2.3	组成	24-144
2.4	结构	24-145
2.5	设计要点	24-145

2.6 使用与维护	24-146
3 全封闭组合电器	24-146
3.1 概述	24-146
3.2 结构示例	24-147
3.3 设计要点	24-148
4 敞开式组合电器	24-150
4.1 分类与特点	24-150
4.2 设计要点	24-151
4.3 结构	24-151
4.4 安装与运行	24-151

第10章 操动机构

1 分类及其特点	24-152
1.1 断路器的操动机构	24-152
1.2 隔离开关的操动机构	24-152
2 手动机构	24-152
2.1 结构示例及动作原理	24-154
2.2 自由脱扣机构	24-154
2.3 脱扣器	24-154
3 直流电磁机构	24-155
3.1 结构示例及动作原理	24-155
3.2 合闸电磁铁	24-155
3.3 传动机构的出力特性及其改善措施	24-157
3.4 脱扣部分	24-158
4 弹簧机构	24-159
4.1 分类及其特点	24-159
4.2 结构示例及动作原理	24-159
4.3 结构初步设计	24-160
5 液压机构	24-162
5.1 分类及其特点	24-162
5.2 基本组成及动作原理	24-162
5.3 部分液压件的初步设计	24-162
5.4 压力整定值的选定	24-163
5.5 控制阀动作时间的近似计算	24-164
6 气动机构	24-164
6.1 基本组成及动作原理	24-164
6.2 气阀设计要点	24-165
7 隔离开关的操动机构	24-166
7.1 手动机构	24-166

7.2 电动机机构	24-166
7.3 气动机构	24-167

第11章 制造工艺

1 零部件的制造工艺特点	24-168
2 绝缘件的绝缘处理	24-169
2.1 绝缘处理工艺过程及其要点	24-169
2.2 绝缘漆的选用及绝缘处理要点	24-170
3 环氧树脂绝缘子的浇注	24-170
3.1 浇注设备	24-170
3.2 浇注工艺	24-170
3.3 注意事项	24-171
4 三聚氰胺灭弧片的压制	24-171
4.1 压制工艺	24-171
4.2 注意事项	24-171
5 铝母线超声波搪锡	24-171
5.1 搪锡设备	24-171
5.2 搪锡工艺	24-172
5.3 长母线的局部搪锡	24-172
6 玻璃布管和金属法兰的环氧树脂粘接	24-172
6.1 用途和特点	24-172
6.2 粘接剂	24-172
6.3 粘接接头设计	24-172
6.4 粘接件的预处理、粘接操作及固化	24-172

第12章 试 验

1 机械性能试验	24-174
1.1 机械操作试验	24-174
1.2 运动特性试验	24-175
1.3 密封试验	24-177
1.4 防雨试验	24-177
1.5 破冰试验	24-177
1.6 耐寒试验	24-178
1.7 耐地震试验	24-178
1.8 机械寿命试验	24-178
2 载流性能试验	24-179
2.1 长期发热试验	24-179
2.2 回路电阻测量	24-180

2.3 动、热稳定试验	24-180
3 开断与关合能力试验	24-181
3.1 一般短路的开断与关合能力试验	24-181
3.2 失步开断和关合试验	24-186
3.3 空载长线的开断与关合试验	24-186
3.4 小电感电流的开断与关合试验	24-187
3.5 电容器组的开断与关合试验	24-187
3.6 近区故障开断试验	24-187
4 绝缘性能试验	24-187
5 环境条件适应性试验	24-187
5.1 湿热带气候条件试验	24-187
5.2 高原气候条件试验	24-188
5.3 污秽试验	24-188

附 录

附录 1 高压开关设备型号编制办法(摘要)	24-188
附录 2 高压开关设备的主要技术参数的代	

号、单位和含义	24-190
附录 3 油断路器主要技术参数	24-191
附录 4 油断路器行程、速度不同期性数据	24-193
附录 5 空气断路器主要技术参数和结构特征	24-194
附录 6 产气断路器主要技术参数	24-195
附录 7 磁吹断路器主要技术参数	24-195
附录 8 户内隔离开关主要技术参数	24-195
附录 9 户外隔离开关主要技术参数	24-196
附录 10 接地短路器主要技术参数	24-196
附录 11 负荷开关主要技术参数	24-197
附录 12 限流式熔断器主要技术参数	24-197
附录 13 跌落式熔断器主要技术参数	24-198
附录 14 敞开式组合电器主要技术参数	24-198
附录 15 直流电磁机构的基本技术数据	24-199
附录 16 蓄能式液压操动机构的基本技术数据	24-199
参考文献	24-200

常用符号表

A_F ——力的机械利益	t_a ——燃弧时间
A_M ——力矩的机械利益	t_b ——开断时间
A_n ——喷口截面积	t_c ——合闸时间
A_p ——活塞截面积	t_{c-0} ——金属短路时间
E ——电动势, 电场强度	t_d ——无电流间隙时间
E_a ——电弧电压梯度	t_0 ——固有分闸时间
F_c ——归算力	U_a ——电弧电压
F_e ——电力	U_{eff} ——电压有效值
F_f ——摩擦力	U_f ——闪络电压
F_s ——弹簧力	U_i ——冲击电压
f ——摩擦系数	U_l ——线电压
I_b ——开断电流	U_m ——电压峰值
I_{cr} ——临界电流	U_n ——额定电压
I_{mk} ——关合电流	U_p ——相电压, 工频电压
I_n ——额定电流	U_r ——恢复电压
I_{nb} ——额定开断电流	U_w ——介质恢复强度
I_{peak} ——峰值电流	V_a ——平均速度
I_{pw} ——动稳定电流	V_{cs} ——刚合速度
I_{rem} ——剩余电流	V_0 ——分闸速度
j ——电流密度	V_{0j} ——刚分速度
k ——绝热指数	V_{0m} ——最大分闸速度
l ——行程	ω ——角速度
l_c ——开距	γ ——重度
l_g ——工作气隙长度	ρ ——密度
l_i ——超行程	θ ——温度
M_c ——归算质量	Δt ——动作不同期性
P_{cr} ——临界压力	

第1章 概述

1 作用

高压开关设备用于开断和关合额定电压为3千伏及以上的电力设备,它在电力系统中的应用,示意如图24.1-1。

根据电力系统安全、可靠和经济运行的需要,高

压开关设备应能开断和关合正常线路与故障线路,隔离高压电源,起控制、保护和安全隔离三个方面的作用,详见表24.1-1。

为确保上述作用的实现,高压开关设备应满足下列基本要求:

(1) 可靠性要求高。高压开关设备是电力系统

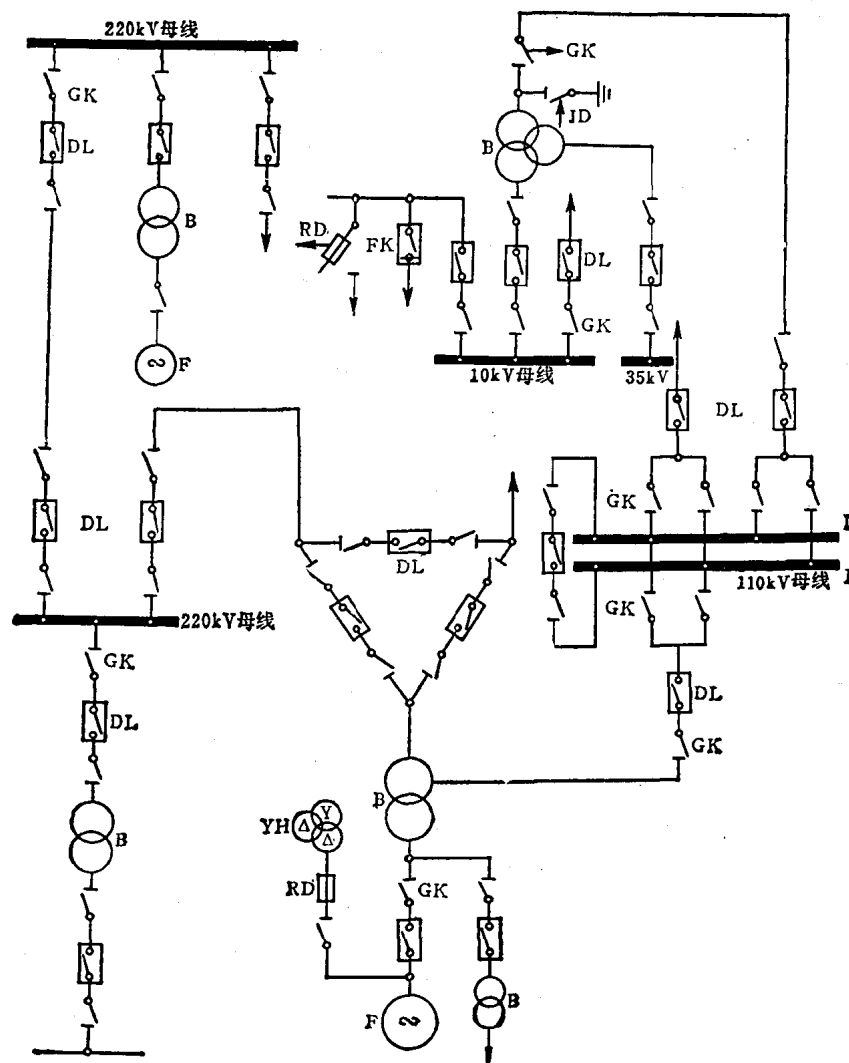


图 24.1-1 高压开关设备在电力系统中的应用

DL—断路器 GK—隔离开关 JD—接地短路器 RD—熔断器 FK—负荷开关
F—发电机 B—变压器 YH—电压互感器

表 24-1-1 高压开关设备的作用

M—母线 DL—断路器 GK—隔离开关 L—线路			
作 用		说 明	
控 制	断开线路, 停止供电; 合上线路, 恢复供电 接通某一部分线路、设备, 并断开另一部分并列运行的线路、设备, 以改变运行方式	GK ₁ 、GK ₂ 合上后, 再合上 DL, 使线路 L 从母线 M 受电; 打开 DL, 使线路 L 断电 GK ₂ 合上, GK ₁ 断开, 将线路 L 的负荷从母线 M ₁ 转换到母线 M ₂ 上	
保 护	开断故障线路及设备, 保证系统的稳定性	线路 L 或接在 L 上的电气设备发生故障时, DL 立即断开, 将故障与电力系统隔离, 防止事故扩大, 保障系统继续运行	
安全隔离	将检修设备或安装设备与高压电源隔离, 以保证检修、安装人员及设备的安全	需检修 DL 时, 先断开 DL, 再断开 GK ₃ 、GK ₁ (或 GK ₂), 并使 DL 两端接地	

表 24-1-2 电力系统对高压开关设备的具体要求

项	目	要	求	有此项要求的开关
开	断一般短路	可靠、快速断开短路电流, 对多数断路器还有重合闸的要求		断路器、熔断器
	断其他短路	能可靠断开、合上近区故障、失步故障等		部分断路器
	合短路	合上短路时, 触头能顺利合上, 不损坏触头及其他元件, 并可靠地保持在合闸位置		断路器、接地短路器
关	断、合负载线路	可靠地断开、合上, 在某些场所要求能频繁操作		断路器、负荷开关
性	能	断、合空载变压器、电抗器、空载长线、空载电缆、电容器组等	可靠地断开、合上, 不引起超过技术条件规定的过电压	断路器、负荷开关 ^①
绝	缘	长期耐受最高工作电压	开关设备导电回路对地、相间、断口间不发生闪络或击穿, 隔离开关的断口绝缘要求较其他开关设备高	所有开关设备
载	流	长期通过额定负载电流	各部分温升不超过标准所规定的数值	断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器
能	力	短时通过故障电流时的稳定性	能承受短路电流的电动力效应和热效应的作用, 无机械损伤, 不过热。触头可靠地保持在合闸位置, 无熔焊, 能顺利进行操作	断路器、隔离开关、负荷开关、接地短路器
机	械	操动特性、机械寿命、密封性能	三相之间和每相各断口之间, 触头的分合、不同期性均应满足技术条件的要求; 按规定次数操作后, 零部件不损坏, 运动特性(包括速度)仍符合要求, 密封性能良好	所有开关设备
稳	定	性能	适应环境条件的性能	所有开关设备
其	它	抗老化性能	户外设备在风砂、冰雪、雨雾、日照等环境条件下, 在规定年限内保证以上各项性能要求(某些开关还应具备抗地震及防污、防盐雾、防潮、防霉菌的性能)	所有开关设备
		噪音控制	符合有关技术条件的要求	所有开关设备
		对无线电干扰以及对环境污染的控制		

① 负荷开关可能具有该项断开、合上性能的一部分或全部。

表 24-1-3 高压开关设备的分类

分 类	包 括 品 种	主 要 作 用	电 气 性 能 特 点					
			负 载 电 流			短 路 电 流		
			长 承 时 受	开 断	关 合	动 稳 热 定	开 断	关 合
断 路 器	油、压缩空气、SF ₆ 、真空、固体产气、磁吹	控 制 及 保 护	○	○	○	○	○	○
负 荷 开 关	压气式、油浸式、SF ₆ 、真空、固体产气式	控 制	○	○	○	○	×	△
熔 断 器	户外跌落式、户内限流型	保 护	○	△	×	×	○	×
接地短路器	敞开式、封闭式	保 护 (间接)	×	×	—	○	×	○
隔 离 开 关	户内型: 闸刀式、插入式 户外型: 单柱、双柱、三柱等	安 全 隔 离	○	×	×	○	×	×

注: ○—表示具有该项性能; ×—表示不具有该项性能; △—表示该项性能不保证。

的控制、保护设备。如果设备质量不高,在线路发生故障时,不能正常动作,事故得不到控制,影响范围将会迅速扩大,造成大面积停电。如一台 10~35 千伏开关设备发生故障,可能造成几个至十几个工矿企业停电;而一台 220 千伏及以上电压等级的开关设备发生故障,可能影响一个至几个地区的正常供电,甚至迫使发电机停止运行。因此,高压开关设备的正常运行,是电力系统安全供电的重要条件。

(2) 能承受很大的瞬时功率。电力系统中的故障电流往往几倍、几十倍于额定电流,持续时间达几秒钟,高压开关设备应具有能承受、开断及关合这类故障电流的能力。

(3) 动作时间快。开断故障电流的时间快慢,会影响电力系统传输功率的大小和运行的稳定性。为此,电力系统通常要求断路器接到继电器动作讯号后,在百分之几秒内开断故障电流;在“合分”操作中,触头短接时间能在 0.1 秒以内。

些特殊环境条件的需要,常将开关与其它电器(如电压互感器、电流互感器、避雷器、电缆头等),有机地组装在一起,构成组合电器或成套配电装置。

4 基本组成

高压开关的品种虽然较多,但都是由开断元件、支撑绝缘件、传动元件、基座及操动机构五个基本部分组成,见方框图 24-1-2 及示意图 24-1-3。

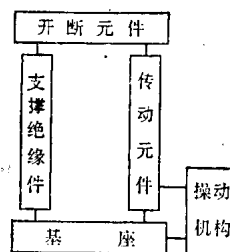


图 24-1-2 高压开关的组成示意图

2 电力系统对高压开关设备的具体要求

(见表 24-1-2)

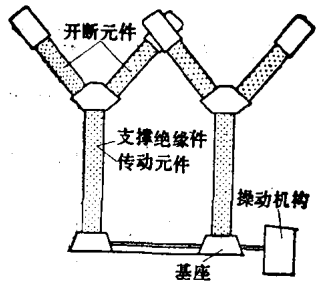
3 分 类

高压开关分类见表 24-1-3。

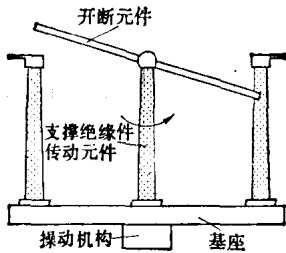
为了节约占地面积,便于安装、维护或适应某

开断元件是这些基本组成部分中的核心元件,开关设备的控制、保护及安全隔离等方面的任务,都需由它来完成。其它组成部分,都是配合开断元件,为完成上述任务而设置的。

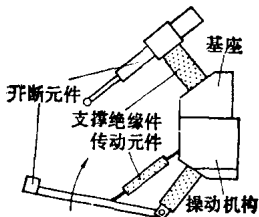
各基本组成部分的主要零部件及功能见表 24-1-4。



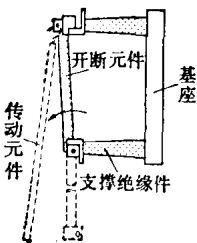
a) 断路器



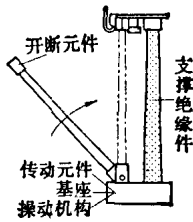
b) 隔离开关



c) 负荷开关



d) 熔断器



e) 接地短路器

图 24-1-3 高压开关基本组成部分示意图

5 主要技术参数

高压开关设备的主要技术参数是额定电压、额定电流、额定开断能力、动稳定电流及热稳定电流等(详见附录 2)。

这些主要技术参数的大小,决定着产品的技术难度、繁简程度及外形尺寸。参数之间应合理配合,

表 24.1-4 高压开关基本组成部分的主要零部件及其功能

名称	主要零部件	功能
开断元件	主灭弧室、主触头系统、主导电回路、辅助灭弧室、辅助触头系统、并联电阻等	开断及关合电力线路,安全隔离电源
支撑绝缘件	瓷柱、瓷套管、绝缘管等构成的支柱本体、拉紧绝缘子等	保证开断元件有可靠的对地绝缘,承受开断元件的操作力及各种外力
传动元件	各种连杆、齿轮、拐臂、液压管道、压缩空气管道等	将操作命令及操动力传递给开断元件的触头和其他部件
基座	开关本体的底架、底座等	整台产品的基础
操动机构	弹簧、液压、电磁、气动及手动机构的本体及其配件等	为开断元件分合闸操作提供能量,并实现各种规定的操作

否则会使技术性能不稳定,或使经济指标显著下降。参数等级的划分,标准中均有规定。额定电流和额定开断电流的数据,应纳入 R10 系列。

6 技术发展

自十九世纪末生产第一批高压开关设备以来,产品的额定电流已由几百安提高到几万安,额定开断电流已从几千安增大到几十万安,额定电压从几千伏提高到 100 万伏以上,而燃弧时间则由 200 毫秒左右缩短到 10 毫秒左右。

为了满足电力系统进一步发展的需要,有关高压开关设备今后的技术发展,有以下几点值得注意:

(1) 加快产品可靠性的研究 研究开关设备在各种环境条件(包括工业污秽、盐雾、湿热、霉菌及一定烈度的地震)下的机械稳定性、动作准确性、密封性能及其他各项电气性能,尽快地制订出相应的考核标准及检验方法。

(2) 研究性能良好的介质和耐弧材料 性能良好的灭弧介质和耐弧材料对开关设备的发展曾起过巨大的推动作用。今后需继续深入研究液体、固体及气体灭弧介质,研究各类金属耐弧触头及不易炭化、烧损少的绝缘耐弧材料;为了限制断路器的操

作过电压,应加强阻值低、通流能力大的并联电阻的研究。

(3) 发展大容量、快速动作、断口电压高的新系列产品 大力提高开关产品的标准化、系列化及通用化的水平,努力发展组合电器及成套配电装置,在 110 千伏及以上电力系统中,则应特别注意发展全封闭组合电器,以满足城市、山区、沿海地区 110kV 及以上变电所的建设需要,并方便安装、运行及维护。

(4) 加强灭弧过程的研究并创建相应规模的试

验基地 开断故障电流时,电弧的产生及熄灭的物理过程比较复杂。目前,由于这方面理论上的不完备,必须对灭弧室进行大量的科学研究,经过数以百计的高电压、强电流试验后才能最终确定其结构。因此,为了提高产品质量和发展高参数的新产品,必须建立相应规模的试验基地,开展各类试验方法的等价性的研究。瞬时变化的各种电的及非电参数的测试技术也要相应跟上,以取得丰富的试验数据,加深对电弧燃烧及熄灭的物理过程的认识,进一步提高开关设备的开断及关合性能。

第2章 交流电弧的熄灭过程

高压开关在开断负载电流或短路电流时,分开的触头间会产生温度很高的电弧,使开断过程复杂化。

随着系统容量和单机容量的不断提高,短路电流不断增大,开断过程中电弧放出的能量也越来越大。因此,需要把电弧限制在灭弧装置内,在很短的时间内将电弧熄灭掉,并且在开断过程中不应产生危及系统绝缘的过电压。

现代高压大容量断路器都采用了先进的灭弧装置。

1 电弧的特征和熄灭原理

高压开关设备中产生的电弧有两种:在一个绝对大气压及以上气体中燃烧的电弧——通常称为气体电弧;在 10^{-4} 毫米汞柱以下的真空容器内燃烧的电弧——通常称为真空电弧。

1.1 气体电弧

除真空开关外,所有其他开关设备在开断过程中所产生的电弧,都属于气体电弧。油断路器、固体产气断路器等,虽然采用液体和固体绝缘介质灭弧,但都是利用电弧能量将液体、固体介质分解成为气体,而后用气体来灭弧的。

1.1.1 气体电弧的特征

a. 电弧的产生 断路器开断短路电流时的单相等值电路,见图 24-2-1。随着触头逐步分离,动、

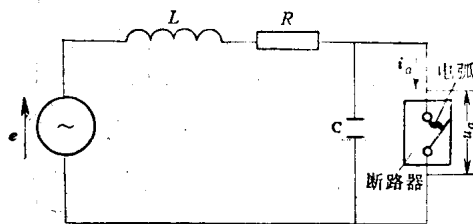
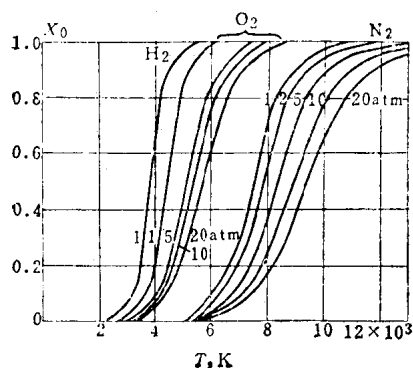


图 24-2-1 断路器开断短路电流时的等值电路

i_a —电弧电流 u_a —电弧电压 e —电源电压
 L —线路的电感 C —断路器触头间电容与
线路对地电容之和 R —线路的电阻

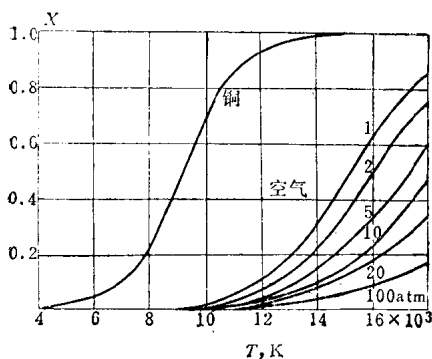
静触头之间的接触压力不断下降,接触电阻迅速增大,接触处的温度急剧升高。在触头刚分瞬间,间隙距离约为 10^{-5} 厘米时,电场强度可高达 $10^6 \sim 10^6$ 伏/厘米,触头表面将产生热电子发射和强场发射。在电场力作用下,电子的运动速度不断增高,与中性分子或原子不断发生碰撞。电子能量达到一定程度时,在碰撞过程中,将产生出更多的电子和离子(电场游离)。当离子浓度超过一定数量时,气体间隙的导电性能随之建立。由于电源不断地把能量供给间隙,使其中气体介质温度不断升高。当上升到一定温度时,分子大量分解为原子(热分解);温度继续上升至热游离临界温度时,剧烈运动的原子或分子互相碰撞,大量游离成为电子和离子(热游离)。热分解与热游离的程度与压力、温度及气体的性质有关,见图 24-2-2 和图 24-2-3。

当热游离成为游离的主要因素时,触头间隙的电位梯度迅速下降。电弧就是这样一种自持的气体

图 24-2-2 不同气体的热分解度 X_0

与温度、压力的关系

$$X_0 = \frac{\text{已分解为原子的粒子数}}{\text{初始分子的粒子数}}$$

图 24-2-3 不同气体的热游离度 X

与温度、压力的关系

$$X = \frac{\text{已游离的粒子密度}}{\text{初始粒子密度}}$$

放电。它的主要特征是：温度高(10^4K 级)，热游离度大，电流密度大(10^4安/厘米^2 级)，弧柱的电位梯度低(几十至几百伏/厘米)。

b. 电弧的组成 根据电弧轴向电位降的变化情况，电弧可分为三个区域：阴极电位降区、弧柱和阳极电位降区，见图 24-2-4a；根据弧柱横截面导电率的差异，又可将电弧分为弧心和弧套（俗称弧焰）两部分，见图 24-2-4b。弧心是电弧导电的核心部分，它的热游离度大，电导率高，几乎所有的电流都从弧心通过。弧套是包围弧心的高温气体层，一般处于热分解温度，电导率很低。在弧心和弧套的交界处，电导率的变化十分显著。当电弧电流增大，输入能量增加时，弧心主要是以径向热传导使弧套温度升高，弧心截面扩大。而弧柱的能量，则主要通过弧套向外散失。

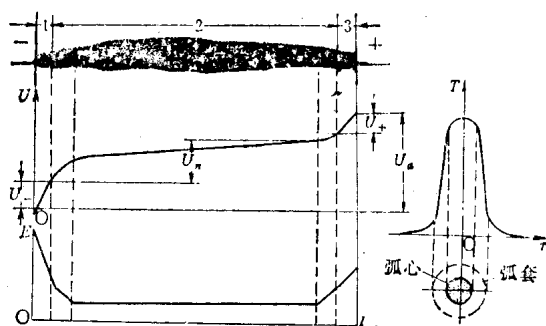
a) 电弧三个区域的电位降和
电位梯度的分布b) 弧柱的组成及其
径向温度分布

图 24-2-4 电弧的组成

1—阴极电位降区 2—弧柱 3—阳极电位降区

c. 电弧的燃烧与熄灭 在弧柱中进行游离过程的同时，还存在着去游离过程——离子的复合及扩散^①。在电弧稳定燃烧阶段，游离与去游离基本处于平衡状态；在电弧点燃阶段，游离占优势；在电弧熄灭阶段，去游离占优势。

高温，是电弧热游离的主要条件。温度愈高，热游离作用愈强，去游离的复合作用愈弱；反之，温度降低时，热游离作用减弱，去游离复合作用增强。热游离减弱，去游离增强的趋势发展到一定程度时，电弧就很难维持。因此，采取冷却电弧是熄灭电弧的有效办法。

在 50 赫兹的高压电网中，交流电弧电流每经 0.01 秒就要过零一次。电流过零前，输入弧柱的瞬时功率已急剧下降；电流过零时，输入弧柱的瞬时功率等于零。由于这时弧柱温度迅速下降，去游离作用大大增强，因而是极为有利的熄弧时机。交流高压开关设备的灭弧装置，都是利用这个有利时机，在触头打开的同时，用外能（流动的空气或 SF_6 气体、油流等）或者用电弧的能量，分解电弧周围的固体或液体灭弧介质，产生具有较高压力的气流，强烈地冷却电弧并使之熄灭。

1.1.2 几种介质的灭弧原理和特点

为了提高开断能力，在电弧电流过零后，应设法加快触头间隙介质绝缘强度的恢复速度（包括被电弧劣化的气体、液体间隙及固体零件的沿面绝缘强

① 复合主要是指正、负离子间的复合，电子与正离子的复合以及带电粒子在固体介质表面的复合。扩散主要是由弧柱与周围环境介质间的温度差或离子浓度差所引起的。

度的恢复速度),如选用灭弧能力强的灭弧介质和耐烧损的触头材料、绝缘材料以及设计合理的灭弧室结构(包括动、静触头及喷嘴结构)等。

常用的灭弧介质有:气体灭弧介质(如空气、 SF_6 等),液体灭弧介质(如变压器油等)以及固体灭弧介质(如有机玻璃、电工钢纸板等)。

按灭弧能源,灭弧方式可分为:

(1) 自能式 依靠电弧本身的能量来灭弧。如油是靠电弧能量分解出气体形成高速气流来灭弧。

(2) 外能式 依靠外界能源供给能量来灭弧。如用压缩空气灭弧。

(3) 混合式 综合利用上述二者,但往往以一种为主。

图 24-2-5 为上述三种灭弧方式燃弧时间的一般特性。

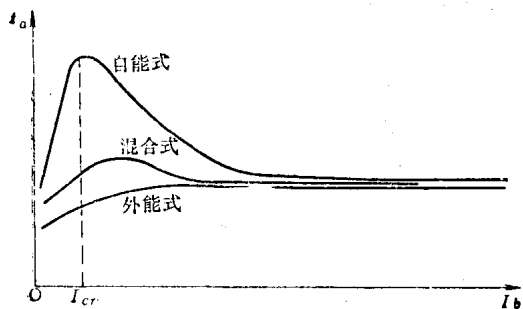


图 24-2-5 三种灭弧方式的 $t_a=f(I_b)$

t_a —燃弧时间 I_b —开断电流 I_{cr} —临界电流

a. 电弧在油中的燃烧和熄灭 电弧在油中燃烧时,油很快会在电弧的高温作用下分解、蒸发并在电弧周围形成汽泡。其中气体约占汽泡体积的60%;油的蒸汽约占40%。由电弧能量分解油形成的汽泡体积,在一个大气压及293K的条件下,约为40~60厘米³/千瓦秒。

汽泡中气体成分,决定于油的成分和油的分解过程。各种气体成分占气体体积的百分比,分别大致为:氢气70~80%;乙炔15~20%;甲烷等5~10%。由于汽泡中主要是氢气和油的蒸汽,因而可以认为,在油中主要是靠氢气来灭弧。

氢气具有很高的导热能力。当温度为3000~4000K时,氢气的导热系数最高,相当于氮气的12倍。

在油断路器中,汽泡体积受到周围油的惯性和器壁(如油箱或灭弧室)的限制,汽泡的压力升高。压

力升高后,一方面可以进一步提高氢气的导热能力,另一方面,也增加了气体介质的绝缘强度。这些都有利于灭弧。实验证明,在大气压力下,氢气中电弧的时间常数为20~30微秒,比氮气中的电弧要小很多。随着气压增加,电弧的时间常数还会更小。

在油中简单开断情况下,电弧基本上处于静止的汽泡中,电弧与汽泡之间相对运动小,氢气的冷却作用得不到充分发挥。同时,由于汽泡压力高,而油箱又不能承受太高的压力,这样便使开断电流受到很大限制。为了提高开断能力,应增设灭弧装置(灭弧室),以缩短燃弧时间,从而减轻油箱所承受的压力。

自能灭弧时,燃弧时间与开断电流的大小有关,见图24-2-5。开断时,有两种相互矛盾的因素在起作用:一方面,随着开断电流增大,电弧能量增加,游离作用加强,给灭弧带来了困难;另一方面,开断电流越大,分解气体越多,压力越高,吹弧能力增强。因此,当开断电流为某一数值时,电弧能量相对地较多而吹弧能力又较弱。这时,燃弧时间可能显著加长。相当于最长的燃弧时间的电流,称为临界电流(I_{cr})。用简单断口灭弧的油断路器,临界电流通常在额定开断电流的15%附近,燃弧时间(t_a)最长可达0.06~0.08秒。开断电流大于临界电流以后,灭弧能力愈来愈强,燃弧时间愈来愈短,但灭弧室的烧损及油的炭化加重,压力也愈来愈高。当开断电流增加到某一数值后,压力会增加到接近灭弧室或油箱的极限强度,出现触头严重烧伤、油严重炭化,甚至发生严重的喷油等现象,这时说明开断能力已接近极限值。

采用外能式原理的灭弧室,一般不会出现临界电流值(见图24-2-5)。

b. 电弧在压缩空气中的燃烧和熄灭 电弧在压缩空气中的熄灭过程,是利用预先贮存在断路器中的高压空气(一般为15~50大气压),在灭弧间隙中形成高速气流强烈地吹袭电弧,进行绝热等熵冷却。

电弧在高速气流中燃烧时,弧隙中的热量将及时地被气流带走,弧根在气流作用下迅速移动,热发射和金属蒸汽大大减少。当电流近零和过零时,弧隙温度迅速下降,弧柱直径明显减小。电流过零后,气吹作用更加强烈,弧隙温度将迅速降到热游离温度以下,弧隙中的残余物将被清除,并由新鲜的压缩空气取代。

气流对电弧的冷却作用,主要体现在气体流量(单位时间内通过弧隙的气体重量)和气流速度。在绝热等熵冷却过程中,单位容积中的能量输出

$$E = -v \frac{\partial P}{\partial x} \quad (24.2-1)$$

式中 v ——轴向气流速度

$\frac{\partial P}{\partial x}$ ——弧隙中的轴向气体压力梯度

因此,压缩空气断路器必须贮备有足够的压缩空气,并在灭弧室内装设合适的喷口,使弧隙中的气流获得必要的流速,并保持高的压力梯度。

纵吹喷口附近的气流特性,如图 24.2-6 所示。无电弧时,要求最小截面处的气流达到临界速度 V_c (音速),气压为临界压力 P_{cr} (等于 $0.528P_0$)。有电弧时,电源能量不断输入弧隙,气体体积膨胀,比容增大,压力也随之上升。因而使最小截面处的气流速度下降(但喷口后腔气流一般仍可达到临界速度),气流减少。当电弧电流大到一定数值后,喷口最小截面处的气流速度可等于零(即流量为零),气压等于(或高于)贮气罐中压力 P_0 ,产生了热阻塞。在这种情况下,弧隙中残留着大量的导电粒子,来不及及时清除,电弧电流过零后,弧隙介质的绝缘强度,不仅数值低,而且恢复速度也慢,因而,在外加恢复电压作用下,容易发生重燃。

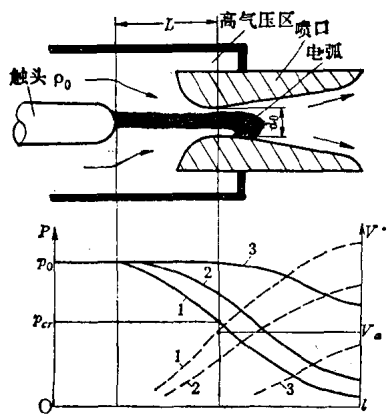


图 24.2-6 纵吹喷口附近的气流特性

1—无电弧时 2—电弧电流较小时 3—电弧电流大,接近产生热阻塞时

——压力 ----流速

用压缩空气灭弧的特点如下:

(1) 压缩空气灭弧属于强气吹外能灭弧。在开断中、小电流时,电弧的热制动效应小,电弧容易熄灭,不可能出现燃弧时间显著增长的临界电流。但

在开断小电感电流时,易产生截流,可能引起过电压。

(2) 由于气流对残余弧道的去游离作用强烈,弧隙电阻大,在开断过程中弧隙电阻对暂态恢复电压几乎不起阻尼作用,恢复电压的起始陡度对开断能力的影响十分明显。

(3) 为了加快电弧电流过零后弧隙介质绝缘强度的恢复过程,必须有一个合理的、压力损失小的气流场,以使喷口最小截面处的气流达到音速,喷口后腔气流为超音速,且不产生激波(特别是正激波)。在喷口前腔的气流场应避免涡流和死区,以提高触头与喷口间隙中流动气体的绝缘强度及吹弧效果。

为了加强对电弧的冷却效果,还必须使气流速度具有较大的轴向分量和径向分量。因此,喷口与触头(或喷口)之间的开距通常都取得比较小。对应于一定的灭弧室结构和电气参数,有一个最佳的灭弧开距数值。

c. 电弧在 SF_6 气体中的燃烧和熄灭 SF_6 气体是目前所知的最理想的气体灭弧介质。它的物理特性如表 24.2-1 所示。

表 24.2-1 SF_6 气体的物理特性

名 称	单 位	SF_6	空气
分 子 量		146	29
密 度 (1atm, 25°C)	kg/m ³	6.10	1.18
比 热 (1atm, 100°C)	kcal/kg·°C	0.187	0.243
粘 度 (1atm, 100°C)	kg/m·h	0.0695	0.0768
导热系数 (1atm, 100°C)	kcal/h·m·°C	0.0145	0.0274
相对介电系数 ϵ_r (1atm, 25°C)		1.002	1.0005
绝热指数 C_p/C_v		1.07	1.4
音 速 (1atm, 15°C)	m/s	130	340

SF_6 气体是一种负电性气体,具有很强的吸附自由电子的能力 ($\text{SF}_6 + e \rightarrow \text{SF}_6^-$)。当温度升高至热分解临界温度以上时, SF_6 分解为硫原子与具有很强的吸附自由电子能力的氟的单原子 ($\text{SF}_6 \rightarrow \text{S} + 6\text{F}$)。负电性能对电弧电流过零后的去游离极为有利。其原因是:一方面,自由电子被大量吸附;另一方面, SF_6 吸附电子后,形成负离子 SF_6^- , 它的运动速度比电子慢得多,易于与 SF_6^+ 复合为中性分子 ($\text{SF}_6^- + \text{SF}_6^+ \rightarrow 2\text{SF}_6$)。由于吸附与复合的综合作用,使弧隙带电粒子密度急剧减少。由于以上原因, SF_6 气体在电流过零时,去游离过程格外迅速。