

# 现代高压电器技术

## 第2版

XIANDAI GAOYA DIANQI JISHU

林 莘 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 现代高压电器技术

第2版

林 莘 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了高压开关设备特别是高压断路器的基本功能、高压断路器在电力系统中的作用、电力系统各种短路故障与断路器的开断以及开断时的恢复电压、高压断路器的性能试验、真空和 SF<sub>6</sub> 高压断路器的结构及熄弧机理、其他高压电器的结构原理和应用、封闭式高压组合电器 GIS、智能化高压开关设备的概念和技术、现代高压开关电器的发展趋势及涉及的关键技术等。

本书可供电力设计使用部门、高压电器科研和制造部门的工程技术人员、高等院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代高压电器技术/林莘编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2011. 4  
ISBN 978 - 7 - 111 - 33929 - 8

I. ①现… II. ①林… III. ①高压电器 IV. ① TM51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 052675 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 牛新国 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

版式设计: 霍永明 责任校对: 程俊巧

封面设计: 路恩中 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 6 月第 2 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 22.5 印张 · 463 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 33929 - 8

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010)88379649

读 者 购 书 热 线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

本书出版第1版到现在已经9年了，期间多次碰到业内人士跟本人提到过本书，并说通过阅读获得了很多知识，并有一些夸奖和赞誉。细细想来，原因有以下：电器行业不算大，这方面可供选择的参考书籍不多；第1版写作时确实花了很大力气，尽力反映了现代高压电器技术状况。尽管过去了这么多年，能够全面反映高压电器技术发展的书籍却还是不多，电器方向的本科生和研究生可供参考的寥寥无几。基于以上原因，从2010年起开始下决心修订本书。

本书在修订时在大的框架方面没有改动，主要修订了绪论部分，根据国家标准的变动修改了第二章高压断路器的各种性能，根据近年来的技术发展修改了第七章和第八章真空断路器结构特点及技术发展以及SF<sub>6</sub>断路器的结构及灭弧原理，对第九章其他高压电器进行了修订，根据特高压开关设备的发展修订了第十章SF<sub>6</sub>封闭式组合电器，根据智能电网要求修订了第十一章智能电器。在修订时，依然注重的是系统、深入地介绍高压断路器的有关理论和原理、高压断路器的产品结构、高压断路器的性能试验、电力系统的发展对断路器的更高要求以及国内外最新研究动态和发展趋势、为了提高设备可靠性所采取的措施和所做的研究工作。

由于时间和水平有限，错误和不当之处在所难免，希望读者指正。

编著者

# 第1版前言

为了适应电力系统技术进步和发展的需要，世界各大电器设备制造公司竞相开发研制性能更加先进、结构更加合理、可靠性更高的开关电器产品。特别是由于采用现代设计理论以及相关领域的先进技术，使开关电器设备包含了更多的新技术含量。从某种意义上说先进的开关电器制造技术已步入高新技术领域。

在开关电器设备向着大容量、智能化、组合化、小型化发展的今天，一次设备的高可靠性仍然是开关电器设备最重要的根本问题和追求目标。作为高压电器最重要的设备之一，高压断路器的可靠性特别是其灭弧室本体和操动机构的可靠性就成为关键。为此各大公司及研发制造单位都从产品结构、材料和生产工艺等各方面下了很大力量。

本书力图从高压断路器的基本功能和在电力系统中的作用着手，比较系统和深入地介绍高压断路器的有关理论和原理、高压断路器的产品结构、高压断路器的性能试验、电力系统的发展对断路器的更高要求以及国内外研究最新动态和发展趋势、为了提高可靠性所采取的措施和所做的研究工作、其他高压电器及其新技术。本书撰写时查阅了大量文献资料、总结了作者的有关研究成果。

本书在写作之初和写作过程中得到了行业中志同道合朋友的大力支持和鞭策。

由于各方面水平有限，错误和不当之处在所难免，希望读者指正。

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 高压电器的基本功能 .....	1
第二节 高压断路器的分类和发展状况 .....	3
第三节 高压开关电器的技术发展 .....	7
参考文献 .....	10
<b>第二章 高压断路器的各种性能</b> .....	11
第一节 电流通过能力 .....	11
第二节 绝缘性能 .....	14
第三节 开断性能 .....	16
第四节 合闸能力及操作性能 .....	22
第五节 机械和电气使用寿命 .....	27
第六节 各种条件下的开断与关合性能 .....	28
第七节 环境耐受及其他性能 .....	29
参考文献 .....	31
<b>第三章 电力系统中各种短路故障与断路器开断</b> .....	33
第一节 故障概述 .....	33
第二节 三相短路故障与开断时的恢复电压 .....	35
第三节 各种不对称短路故障及开断时的恢复电压 .....	42
第四节 开断时的工频恢复电压和瞬态恢复电压 .....	46
第五节 近区故障及开断 .....	54
第六节 失步故障及开断 .....	59
第七节 发展性故障及开断 .....	62
第八节 并联断路器开断短路故障 .....	63
参考文献 .....	64
<b>第四章 高压断路器对电容性和电感性小电流的合分及操作过电压</b> .....	65
第一节 断路器开断感性负载及其过电压 .....	65
第二节 断路器开断容性负载及其过电压 .....	73
第三节 空载线路和电容器组的关合及其过电压 .....	82
参考文献 .....	90
<b>第五章 高压断路器性能试验</b> .....	91
第一节 绝缘性能试验 .....	91

第二节	温升试验 .....	93
第三节	机械性能试验 .....	93
第四节	短时耐受电流试验 .....	94
第五节	短路开断与关合能力试验 .....	95
第六节	开断能力试验装置 .....	101
第七节	近区故障开断试验 .....	110
第八节	小电感电流开合试验 .....	113
第九节	空载长线的开断试验 .....	114
第十节	失步开断、关合能力试验 .....	116
	参考文献 .....	117
<b>第六章</b>	<b>开关电弧理论与介质绝缘恢复 .....</b>	<b>118</b>
第一节	概述 .....	118
第二节	电弧的产生和物理特性 .....	119
第三节	直流电弧 .....	131
第四节	交流电弧 .....	135
第五节	电流开断后绝缘强度的恢复特性 .....	142
第六节	交流短弧和长弧的熄灭原理和方法 .....	144
第七节	六氟化硫 (SF <sub>6</sub> ) 气体的基本特性及熄弧原理 .....	146
第八节	真空电弧的基本特性及熄弧原理 .....	150
	参考文献 .....	157
<b>第七章</b>	<b>真空断路器结构特点及技术发展 .....</b>	<b>158</b>
第一节	真空灭弧室的结构特点 .....	158
第二节	真空断路器操作过电压及限制措施 .....	165
第三节	真空断路器的发展水平 .....	170
第四节	真空断路器的分类及结构 .....	174
第五节	配永磁机构的真空断路器 .....	178
第六节	同步真空断路器 .....	191
	参考文献 .....	193
<b>第八章</b>	<b>SF<sub>6</sub> 断路器的结构及灭弧原理 .....</b>	<b>195</b>
第一节	SF <sub>6</sub> 断路器的特点及总体结构 .....	195
第二节	SF <sub>6</sub> 断路器的灭弧原理及结构 .....	197
第三节	SF <sub>6</sub> 断路器灭弧室气压特性 .....	214
第四节	SF <sub>6</sub> 断路器灭弧室电场数值计算 .....	221
第五节	高压大容量断路器开断过程的数值分析 .....	234
第六节	高压断路器的操动机构 .....	248
第七节	提高高压断路器可靠性的措施 .....	262
第八节	高压断路器的发展方向及需要解决的关键问题 .....	267
第九节	其他 SF <sub>6</sub> 高压断路器 .....	274
	参考文献 .....	283

---

<b>第九章 其他高压电器</b> .....	285
第一节 隔离开关 .....	285
第二节 接地开关 .....	288
第三节 高压熔断器 .....	290
第四节 高压限流熔断器 .....	293
第五节 高压限流熔断器的应用 .....	293
第六节 负荷开关 .....	299
第七节 高压负荷开关—熔断器组合电器 .....	303
第八节 故障电流限制器 .....	305
第九节 重合器与分段器 .....	309
第十节 避雷器 .....	311
参考文献 .....	313
<b>第十章 SF<sub>6</sub> 封闭式组合电器 (GIS)</b> .....	315
第一节 GIS 原理及结构特点 .....	315
第二节 GIS 中各部件的结构和功能 .....	321
第三节 SF <sub>6</sub> GIS 暂态电压及绝缘配合 .....	323
第四节 GIS 应注意的技术关键问题 .....	336
参考文献 .....	339
<b>第十一章 智能电器</b> .....	342
第一节 智能电器的定义及特征 .....	342
第二节 智能电器的组成 .....	343
第三节 智能电器的关键技术 .....	344
第四节 智能操动机构 .....	347
参考文献 .....	350



# 第一章 绪 论

## 第一节 高压电器的基本功能

高压电器一般是指额定工作电压在 1200V 以上的电器。高压电器的种类有很多，高压断路器是高压电器中最重要的一类电器。按照各种高压电器的基本功能给出如下定义：

**断路器**（Circuit-breaker）能够闭合、承载和开断正常回路条件下的电流，并能关合、在规定的时间内承载和开断异常回路条件（如短路条件）下的电流的机械开关装置。

高压断路器也应该能够分断空载长线的充电电流（容性电流）、空载变压器的励磁电流（感性小电流）等。通常使用的断路器分合频度不大，不经常承载、开断和关合短路电流，但某些特殊断路器也用于频繁分合。

总体来讲，要求断路器具有如下最基本功能：

1) 在关合状态时应为良好的导体，在长时间工作时各部位温度和温升低于最大允许发热温度和允许温升，能够承受短路情况下热和机械的作用。

2) 在开断状态时，具有良好的绝缘性能。在不同环境条件下，皆能承受对地同相以及不同相端子间的电压。

3) 在关合状态的任意时刻，在尽可能短的时间内，能够开断额定开断电流及以下的各种故障电流。

4) 在开断状态的任意时刻，在短时间内能关合处于短路状态下的电路。

另外，国家标准及其他有关标准对各种其他高压开关设备也给出了明确的定义。

**高压开关**（High-voltage switching device）额定电压在 1200V 及以上，主要用于开断和关合导电回路的电器。

**高压开关设备**（High-voltage switchgear）高压开关与控制、测量、保护、调节装置以及辅件、外壳和支持件等部件及其电气和机械的连接组成的总称。

一般概念中高压开关主要指的是能开断与关合高压回路（带电与不带电）的操作装置，它包括断路器、隔离开关、负荷开关和接地开关。而高压开关设备应包括除变压器等少数几种电力设备以外的几乎所有的高压电器，例如，除去上述几种开关外，还应包括高压熔断器、高压接触器、柱上配电开关设备（除了柱上断路器、负荷开关外，还有自动重合器、分段器、配电自动化开关等）、金属封闭开关

设备即开关柜（包括断路器柜、高压接触器—熔断器组合电器即 F-C 回路开关柜、负荷开关柜及负荷开关—熔断器组合柜即常称为环网柜或环网供电单元等各种开关柜）、各类组合电器、SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）、预装式变电站等。高压开关设备除了前述的开关设备外，还应包括各种控制和测量设备，习惯上又都混称为开关装置。

**隔离开关（Disconnecter）** 在分位置时，触头间有符合规定要求的绝缘距离和明显的断开标志；在合位置时，能承载正常回路条件下的电流及在规定时间内异常条件（例如短路）下的电流的开关设备。

**负荷开关（Switch, Load-breaking switch）** 能在正常的导电回路条件或规定的过载条件下关合、承载和开断电流，也能在异常的导电回路条件（例如短路）下按规定的时间内承载电流的开关设备。按照需要，也可具有关合短路电流的能力。

**接地开关（Earthing switch）** 用于将回路接地的一种机械式开关装置。在异常条件（如短路）下，可在规定时间内承载规定的异常电流；但在正常回路条件下，不要求承载电流。

**熔断器（Fuse）** 当电流超过规定值一定时间后，以它本身产生的热量使熔体熔化而开断电路的开关装置。

**接触器（Contactor）** 手动操作除外，只有一个休止位置，能关合、承载及开断正常电流及规定的过载电流的开断和关合装置。

**重合器（Automatic circuit recloser）** 能够按照预定的顺序，在导电回路中进行开断和重合操作，并在其后自动复位、分闸闭锁或合闸闭锁的自具（不需外加能源）控制保护功能的开关设备。

**分段器（Sectionalizer）** 一种能够自动判断线路故障和记忆线路故障开断的次数，并在达到整定的次数后在无电压或无电流下自动分闸的开关设备。

某些分段器可具有关合短路电流（自动重合功能）及开断、关合负荷电流的能力，但无开断短路电流的能力。

**金属封闭开关设备、开关柜（Metal-enclosed switchgear）** 除进出线外，其余完全被接地、金属外壳封闭的开关设备。

**组合电器（Composite apparatus）** 将两种或两种以上的高压电器，按电力系统主接线要求组成一个有机的整体而各电器仍保持原规定功能的装置。

**气体绝缘金属封闭开关设备、封闭式组合电器（Gas Insulated metal-enclosed Switchgear, GIS）** 至少有一部分采用压力高于大气压的气体作为绝缘介质的金属封闭开关设备。

**预装式变电站（High-voltage/low-voltage prefabricated substations）** 预装式变电站的主要部件是变压器、高压开关设备和控制设备、低压开关设备和控制设备、相应的内部连接线（电缆、母线和其他）和辅助设备。

这些部件应该用一个公用的外壳或一组外壳封闭起来。

在这些高压开关设备中，高压断路器是最基本、最重要的一类电器。在电力系统的运行过程中，时常会发生故障，其中大多数是短路故障。在大容量系统中，短路电流可达几十千安甚至几百千安。由于短路电流的热效应和电动力具有很大的破坏性，因此短路发生后，要求迅速排除短路故障。为了减小短路对电力系统的危害，最主要的措施是迅速将发生短路的部分与系统其他部分隔离，断路器便承担着切除短路故障的任务。

## 第二节 高压断路器的分类和发展状况

按断路器灭弧原理来划分，有油断路器（其中包括多油和少油）、压缩空气断路器、六氟化硫（ $\text{SF}_6$ ）断路器、真空断路器、磁吹断路器和空气断路器。目前用得较多的是真空断路器和  $\text{SF}_6$  断路器。

按照用途来分，断路器可有不同的用途，图 1-1 所示为高压断路器在电力系统中的使用情况。

### 一、发电机保护用断路器

为可靠地保护与方便地控制发电机组，对于发电机回路，无论它是采用单元接线方式，还是采用扩大的单元接线方式，都要求在发电机的出口装设专用的发电机保护断路器，如图 1-1 中的  $\text{QF}_H$  所示。

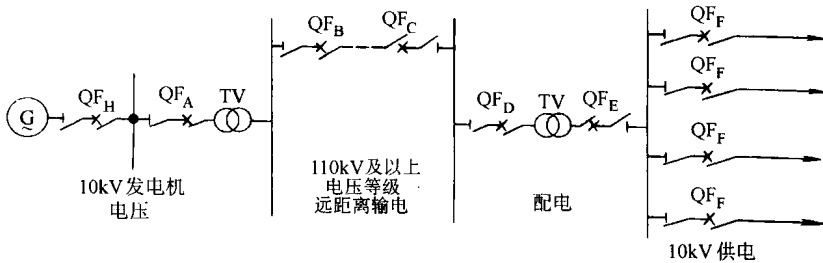


图 1-1 高压断路器在电力系统中的使用情况

早年的发电机保护断路器采用压缩空气技术开断电流。这些断路器的持续载流能力由强迫空气冷却系统来保证，开断电流高达 50kA。压缩空气发电机断路器使用一个主开断单元和一个配有低值电阻的辅助单元。这样的断路器结构复杂，使之很少用于其他小型机组。

近年来由于  $\text{SF}_6$  开关技术的发展和不断成熟，国内外已相继开发研制了  $\text{SF}_6$  发电机保护断路器。从灭弧机理上来看  $\text{SF}_6$  发电机断路器基本上有两种类型：一种是以 ABB 公司生产的采用自能旋弧式原理灭弧的 HE 型发电机断路器；另一种是日本日立公司生产的 FPT 型、三菱公司生产的 SFWA 型和 GEC Alsthom 公司生产的 FKG 型为代表的压气式  $\text{SF}_6$  发电机断路器。两种产品的技术性能基本相似，外形大

多为卧式结构。

我国新东北电气（沈阳）高压开关有限公司自行开发研制了压气式 SF<sub>6</sub> 中等容量发电机断路器，额定电压为 18kV、24kV，额定电流为 6300A、8000A、10000A、12500A，额定短路开断电流为 63kA、80kA、100kA。

## 二、线路用断路器

这类断路器主要用于变电所内，又可分为输电用断路器（见图 1-1 中的 QF<sub>A</sub>、QF<sub>B</sub>、QF<sub>C</sub> 及 QF<sub>D</sub>）和配电用断路器（见图 1-1 中的 QF<sub>E</sub>）。输电用断路器的电压通常为 126 ~ 800kV，目前已达到 1100kV；配电用的为 12 ~ 72.5kV，有时可达到 126 ~ 252kV。

输电用断路器与配电用断路器有所不同。输电用断路器的动作次数少，但要求动作可靠。对于输电用断路器来说，除要求具备快速自动重合闸功能外，还要求有开断近区故障和失步故障、开断和闭合空载长线的的能力。配电用断路器的动作次数多，要求寿命长、维护检修方便。对于配电用断路器除要求具备快速自动重合闸功能外，还要求有开断和闭合电容器组和开断空载变压器等的的能力。

输电用断路器由于电压高、开断容量大，断路器的结构比较复杂。而配电用断路器由于电压低，其结构相对较简单。

在灭弧介质方面，20 世纪 40 年代，以多油断路器为主。到了 50 年代，由于电力系统电压升高和容量增大，逐渐发展成以空气和少油断路器为主，空气断路器做到了 275 ~ 500kV 级。60 年代，性能优异的 SF<sub>6</sub> 断路器和全封闭组合电器问世，由于性能不断改进，使现在 SF<sub>6</sub> 断路器的单断口开断容量为空气断路器的 10 多倍。到了 70 年代，SF<sub>6</sub> 断路器全面取代空气断路器。现在 252kV 及以上电压等级，我国及世界上一些先进国家的公司已完全转为生产 SF<sub>6</sub> 断路器和 SF<sub>6</sub> 封闭式组合电器。

在灭弧室结构方面，最早的 SF<sub>6</sub> 断路器沿用压缩空气断路器的灭弧原理，采用双压式结构，灭弧高压区充以 1.5MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体，灭弧低压区充以 0.3MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体，开断时气体从高压区向低压区流动吹拂电弧从而将电弧熄灭。双压式结构复杂、噪声大，很快被单压式所取代。单压式 SF<sub>6</sub> 断路器利用操作时的机械功来压缩 SF<sub>6</sub> 气体，并利用气体动力学的有关原理对灭弧喷口流道进行优化以获得优良的灭弧性能。由于单压式具有体积小、可靠性高及开断性能好等优点，在电力系统中得到了广泛应用。随着现代分析技术及试验手段的完善发展，以及对电弧进行的深入研究，在此基础上提出了自能式灭弧原理。该原理利用电弧本身的能量使压气室内 SF<sub>6</sub> 气体的压力升高，在电弧过零时产生有效的气吹而熄灭电弧，操动机构仅需提供触头运动所需要的动能，这就大大简化了机构，减少了操作功，目前这一技术已在 110kV 电力系统中广泛使用。为了进一步提高开断容量，在超高压及特高压电力传输系统中的开关设备常常采用压气加自能技术。进入 21 世纪，开关技术已在高电压等级发展到大容量双动自能灭弧结构，操作功大大减少。高压 SF<sub>6</sub> 断路器的

灭弧室发展过程大致可分为5个阶段：双压式阶段、单压式阶段、单断口高电压大电流阶段、自能灭弧式阶段和大容量双动自能灭弧式阶段。

SF<sub>6</sub>断路器灭弧方式的变化实质是由其结构决定的，图1-2所示为压气式断路器的典型结构及灭弧过程，它起源于20世纪60~70年代，在各个电压等级中应用广泛。图1-3所示为自能压气式灭弧室简图，图1-4所示为双动灭弧室结构简图。

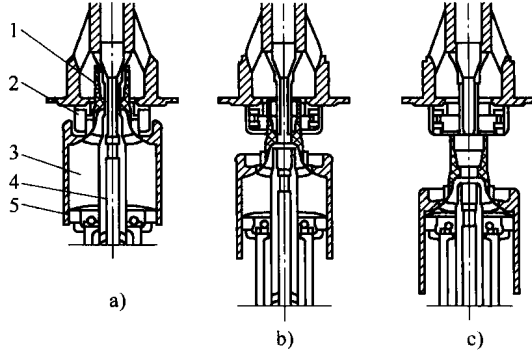


图1-2 压气式断路器的典型结构及灭弧过程示意图

a) 合闸位置 b) 分闸过程 c) 分闸位置

1—静触头 2—触指 3—压气室 4—动触头 5—压气缸

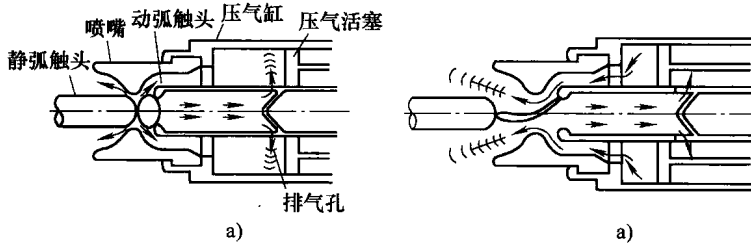


图1-3 自能压气式灭弧室简图

a) 开断初期 b) 开断后期

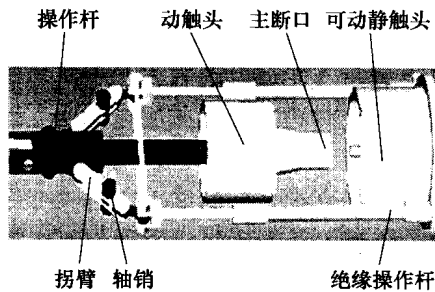


图1-4 双动灭弧室结构简图

在电压等级方面,我国开关制造企业在20世纪80年代引进技术、消化吸收的过程中积累了大量的理论基础和技术经验。新东北电气和西开股份有限公司通过引进国外750kV GIS产品技术并在西北电网投入运行的基础上,研制开发出1100kV GIS产品,断路器为双断口。平高公司在自主开发800kV GIS成功并投入运行的基础上,通过“引进技术,消化吸收再创新”的方式,研制出1100kV双断口罐式SF<sub>6</sub>断路器,并在晋东南—南阳(开关站)—荆州百万伏级示范试验工程中得到成功应用,这是世界上首次正式运行的特高压输电线路。在此之前,前苏联、意大利、日本等也开展了特高压工程研究,但由于用电量需求等原因,这些工程都处于降压或带电试验运行状态。

要保持SF<sub>6</sub>断路器的较高技术和性能,还应将其工作温度范围扩大到-50℃,而且无需加热。解决这个课题的途径主要是采用SF<sub>6</sub>气体与其他气体的混合物作为绝缘和灭弧介质。研究表明,47%氮气与53%SF<sub>6</sub>气体混合气体的电气强度和灭弧能力与纯SF<sub>6</sub>气体没有很大的差别。

### 三、供电用断路器

图1-1中QF<sub>F</sub>为供电用断路器。这类断路器有时直接用于工业企业,使用量最大,品种类型也最多。这类断路器的额定电压为6.9~40.5kV,额定电流一般为1000~2500A。这样一类电压等级的断路器在电器中称为中压断路器。

以往这类断路器有多油、少油、磁吹、自产气固体、空气、真空和SF<sub>6</sub>等各种类型。20世纪70年代初,世界上掀起了中压断路器无油化的浪潮。到70年代末,已确立了无油断路器在中压断路器中的主导地位。1977~1988年,作为无油断路器两大支柱的SF<sub>6</sub>与真空断路器在世界范围内引起了旷日持久的论战。论战的结果是SF<sub>6</sub>与真空断路器都有了长足的发展,原先发展单一产品的制造厂家,注意同时发展两种产品。作为用户,在电压等级较低(如7.2~12kV)、要求频繁操作、户内装设的场合,使用真空断路器较多,而在电压等级较高(如24~40.5kV)、要求单断口容量大及户外装设的场合,使用SF<sub>6</sub>断路器较多。但是由于7.2~12kV等级需要量大,真空断路器所占比例很大。在整个中压市场中,估计真空断路器约占65%,SF<sub>6</sub>断路器约占20%,少油断路器只占15%。

真空断路器不断向高电压、大容量、低过电压和小型化方向发展,使之在中压领域有着广阔的市场。其发展与各制造公司大力开展研究工作分不开。这些研究工作主要表现如下:研制新的触头材料,降低截流过电压,提高真空灭弧室的开断能力;改进触头结构,提高开断能力和缩小尺寸;采用先进的一次排封工艺,提高产量和质量;改进灭弧室结构,提高综合开断能力等。

在高压SF<sub>6</sub>断路器中,灭弧主要为压气式原理,而在中压SF<sub>6</sub>断路器中,出现了多种灭弧原理,除了压气式外,还有旋弧式、热膨胀式及混合灭弧原理。近年来在中压断路器中应用成功的这些灭弧原理也开始用于高压断路器。中压SF<sub>6</sub>断路器不仅用于户内,而且用于户外。用于户外有其独到的优点,那就是外绝缘好解决,

可以做成瓷柱式和金属罐式。其操动机构多为弹簧操动机构。中压 SF<sub>6</sub> 断路器对于不同的参数要求可用不同的灭弧方式。对于较大的容量, 可用压气式或混合式, 而对于中小容量可用旋弧式和热膨胀式。

#### 四、高压直流断路器

第一台高压直流断路器是由前苏联研制的, 它采用反向电流注入法, 使用开断交流的空气断路器。此断路器经多次改进, 终于成功地在 100kV 下开断了 250A 电流。迄今已研制出开断高压直流的多种方案, 而且最大开断能力在额定电压 500kV 下达到 8kA。

### 第三节 高压开关电器的技术发展

由于电力系统对输变电的质量和可靠性要求提高, 对高压开关设备的性能要求也越来越高, 为了满足当今社会对高质量产品的需求, 许多研究设计生产部门开展了大量的工作。另一方面由于基础理论、材料技术、生产设备和加工工艺的不断进步, 使得高压开关设备的技术水平有了长足的进步, 并在许多方面突破了以往传统开关电器的概念, 与几十年前相比无论是在产品种类、结构形式、介质, 还是在综合技术水平上都有很大的差别。特别是特高压工程建设, 带动了电器行业整体水平提高。随着其他行业技术的快速发展, 应用到高压开关领域, 扩大了高压电器的概念。除了在开关电器一次设备方面采用了更先进的技术, 如提高开断能力、提高绝缘性能等, 在二次检测控制方面也有很大的发展, 如开关电器智能化等。近来, 由于智能电网的提出, 智能电器的概念、技术内容和内涵、所具有的功能等成为思考和讨论的热点。另外, 还发展了一些新概念的开关电器, 如固态无触头开关、超导限电流装置、高性能氧化锌避雷器等, 使得高压开关的控制和保护的概念发生了革命性的变化。

目前, 高压开关电器正向着高压大容量、自能化、小型化、组合化、智能化和高可靠性方向发展。

#### 一、高压大容量断路器

随着电力系统工作电压的提高和输电容量的增加, 带来了许多理论问题和技术问题。对短路而言, 从技术经济性和可靠性角度要求, 都需要发展单元断口容量大、电压高的断路器。从上述功能中可以看出, 对断路器的要求很高, 因此给断路器的研制带来了很大困难。多年来围绕高压断路器的许多问题, 如灭弧方式、灭弧室结构、灭弧介质、开断性能及绝缘性能和操动机构等做了大量工作。550kV 级电力系统不断完善、1100kV 特高压输电系统不断发展, 已经成功开发研制出了 550kV、63kA 单断口断路器, 目前 1100kV 双断口断路器在电力系统中得到了应用。

## 二、断路器熄弧的自能化

目前绝大多数开关设备都是机械式有触头开关，因此在开断过程中会在触头间产生电弧。自能式灭弧室就是最大限度地利用电弧自身的能量，使灭弧室建立起气吹熄弧所必需的压力，因而不需要操动机构提供很大的压缩功，自能式 SF<sub>6</sub> 断路器的操作功可降低为压气式的 20%。由于自能式断路器的操作功大大减小，可以采用低操作功的操动机构，这必将大大提高断路器的机械可靠性。随着设计技术、材料和工艺的技术进步，在同等可靠性的前提下，弹簧机构因结构简单、零部件少、体积小而被更多采用。因此，自能式断路器一来可减小体积，二来可提高可靠性而受到用户和开发部门的重视，成为高压断路器的研究热点。

自能式断路器由于熄弧技术先进、操作功小、整体体积小，因而在 126 ~ 252kV 电压等级大有取代压气式断路器之势，在更高电压等级也会尽量利用电弧能量，如采用混压原理等，降低操作功，提高可靠性，减小体积。

## 三、高压开关电器的小型化

高压电器小型化的目的是减少占地空间、进一步与环境相协调和易于组合化。目前，作为良好的绝缘和熄弧介质，SF<sub>6</sub> 气体在高压、超高压和特高压开关电器领域占有不可替代的地位，而 SF<sub>6</sub> 气体又是一种会引起温室效应的气体，为了减小对环境的影响，电器设备的小型化会减少对 SF<sub>6</sub> 气体的用量，因而小型化具有更重要的社会意义。小型化的技术关键是绝缘结构的合理设计、选用高性能的绝缘材料和良好的加工工艺保证。因此高压开关设备的小型化需要依赖于高电压绝缘和高电压技术等相关技术领域的支持。

## 四、高压开关电器的组合化

高压开关电器的组合化主要基于小型化技术，最重要的目的是可以实现体积小、具成套性、可靠性高、少维护、易于安装、抗严酷环境等。由于对各元件和各部位都采取小型化措施以及整体的小型化布置，因此组合电器的尺寸不断减小。组合电器品种很多，组合方式很灵活，结构非常小巧紧凑。气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）几乎囊括了大部分高压开关电器和保护检测电器，使得原来分立电器的功能成为一个整体概念，可以说 GIS 的设计生产水平成为了高压开关设备水平的代表。组合化后的进一步发展是将更多地加入技术创新观念，一是在一次设备方面如采用自能式断路器、设计新型隔离开关和接地开关等，二是在二次检测、控制设备和元件方面提高技术含量，开发新型控制检测单元，适应现代电力系统控制和保护的要求。

## 五、高压开关电器的智能化

智能电网是电网自动化技术的进一步发展和提升，是以统一的信息平台为纽带，集成现代控制理论、传感技术和信息技术，兼容多种能源，具有自我调节和适应能力的新型电网。电力设备是智能电网构成中非常重要的组成部分，也是构建智



能电网的物质基础,为了适应智能电网的需要,同时也是电力设备自身性能提高的要求,发展“数字化电力设备”已经成为趋势。数字化电力设备应具备以下4个方面的特征:电力系统运行、控制所需电参数,以及电力设备自身各种状态物理量的获取和数字化处理;自我监测与诊断能力;能够根据实际工作环境与工况对操作过程进行自适应调节,使得所实现的控制过程和状态是最优的;信息交互能力。数字化电力设备所涉及的关键理论与技术有信息感知、设备诊断、智能操作、网络化信息交互、电磁兼容等。

## 六、高压开关电器的高可靠性

对于高压开关来说,最核心的问题除了很好地满足所要求的功能外就是设备整体的可靠性问题。可靠性包括两个方面:一是电气可靠性;二是机械可靠性。多年来的不断努力,电器的可靠性已经大大提高。电气方面的可靠性通过各种途径有可能解决。相对来说,机械可靠性是困扰高压开关设备整体可靠性的重要原因,它与整个机械工业的设计和加工制造水平息息相关,因此,高压开关的设计制造很大注意力集中在如何提高机械可靠性上,具体包括:减少断口数目;设计自能式灭弧室,降低操动机构的操作功;提高材料强度;努力减少机构的零部件数目,如在中压开关上采用永磁操动机构,采用永磁保持,取消锁、脱扣机构等。尽管机械可靠性方面已有很大的改善,但是进一步提高机械可靠性仍是今后需要不断努力的重要工作内容。

## 七、现代数值计算技术在高压电器中的应用

自20世纪80年代以来,随着计算机技术及软件技术的进步,计算机辅助设计(CAD)与数值仿真技术在各个领域中的应用广泛。在高压断路器的设计中由于采用商用软件结合自编程序,可以对灭弧室进行数值仿真,深入地研究断路器在整个开断过程中复杂的电、热、磁、机等一系列现象,这样一来使断路器的设计开始走向新的设计体系。借助计算机这一现代化工具,将理论分析、试验研究和计算机仿真有机地结合起来,使产品设计更加科学和准确,大大减少了设计周期,减少了试验的盲目性和费用。目前较先进的高压550kV、63kA单断口SF<sub>6</sub>断路器,1100kV、50kA双断口SF<sub>6</sub>断路器,126~252kV自能式SF<sub>6</sub>断路器等均采用了数值计算技术,大大提高了产品的技术性能,减少了断口数目,缩小了产品体积。在气体绝缘金属封闭开关设备GIS以及其他组合电器的设计中也广泛采用了计算机辅助设计技术,使得整个开关设备结构布置更加合理,体积进一步缩小。

综上所述,高压开关设备在形式、结构、研究手段以及电力系统对其要求上都发生了较大的变化,因而有必要将新的理论和内容反映出来。本书从设备的角度出发,力图阐明高压开关设备的功能、高压断路器在电力系统中的作用、各种高压开关设备的结构、高压开关设备的性能试验、高压开关设备的技术进步及发展等。