

XianDai GaoYa DianQi JiShu

现代高压 3 电器技术

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

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、电力系统中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 SF₆ 高压断路器的结构及熄弧机理、其它高压电器的结构原理和应用、各种高压组合电器如 GIS、C-GIS 和户外紧凑型开关设备、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到的技术关键等。

本书可供电力设计部门、高压电器科研和制造部门的工程技术人员，高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代高压电器技术/林莘编著. —北京: 机械工业出版社, 2002.5

ISBN 7-111-09969-9

I. 现… II. 林… III. 高压电器 N. TM51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 014790 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贾玉兰 版式设计: 张世琴 责任校对: 程俊巧

封面设计: 陈 沛 责任印制: 何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·12 印张·353 千字

0 001—4 000 册

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

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、其它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工作成果。

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，肯定有错误和不当之处，希望读者指正。

目 录

前言

第一章 绪论	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 高压电器的技术发展	7
参考文献	11
第二章 高压断路器的各种性能	12
第一节 电流通过能力	12
第二节 绝缘性能	15
第三节 开断性能	17
第四节 合闸能力及操作性能	24
第五节 机械和电气使用寿命	29
第六节 各种条件下的开断与关合性能	30
第七节 环境耐受及其它性能	32
参考文献	33
第三章 电力系统中各种短路故障与断路器开断	34
第一节 故障概述	34
第二节 三相短路故障与开断时的恢复电压	36
第三节 各种不对称短路故障及开断时的恢复 电压	44
第四节 开断时的工频恢复电压和瞬态恢复电压	50
第五节 近区故障及开断	59
第六节 失步故障及开断	65
第七节 发展性故障及开断	69
第八节 并联断路器开断短路故障	70
参考文献	72

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	73
第一节 断路器开断感性负载及其过电压	74
第二节 断路器开断容性负载及其过电压	84
第三节 空载线路和电容器组的关合及其过电压	96
参考文献	105
第五章 高压断路器性能试验	106
第一节 绝缘性能试验	106
第二节 温升试验	108
第三节 机械性能试验	109
第四节 短时耐受电流试验	110
第五节 短路开断与关合能力试验	111
第六节 开断能力试验装置	119
第七节 近区故障开断试验	130
第八节 小电感电流开合试验	134
第九节 空载长线的开断试验	135
第十节 失步开断、关合能力试验	137
参考文献	139
第六章 开关电弧理论与介质绝缘恢复	140
第一节 概述	140
第二节 电弧的产生和物理特性	142
第三节 直流电弧	156
第四节 交流电弧	160
第五节 电流开断后绝缘强度的恢复特性	170
第六节 交流短弧和长弧的熄灭原理和方法	171
第七节 六氟化硫 (SF₆) 气体的基本特性及熄弧原理	175
第八节 真空电弧的基本特性及熄弧原理	180
参考文献	188
第七章 真空断路器结构特点及技术发展	189
第一节 真空断路器的结构特点	190
第二节 真空断路器的操作过电压及触头材料	195

第三节	真空断路器的发展水平	199
第四节	真空断路器的结构	203
第五节	配永磁机构的真空断路器	209
第六节	同步真空断路器	225
参考文献		226
第八章	六氟化硫 (SF₆) 断路器的结构及技术发展	228
第一节	SF ₆ 断路器特点及总体结构	228
第二节	SF ₆ 断路器的灭弧原理及结构	230
第三节	SF ₆ 断路器灭弧室气压特性	249
第四节	SF ₆ 断路器灭弧室电场数值计算	257
第五节	高压大容量断路器开断过程的数值分析	267
第六节	高压断路器的操动机构	283
第七节	提高高压断路器可靠性的措施	293
第八节	高压断路器的发展方向及需要解决的关键问题	300
第九节	其它 SF ₆ 高压断路器	308
参考文献		315
第九章	其它高压电器	317
第一节	隔离开关	317
第二节	接地开关	322
第三节	高压熔断器	324
第四节	高压限流熔断器	328
第五节	高压限流熔断器的应用	329
第六节	负荷开关	337
第七节	高压负荷开关-熔断器组合电器	341
第八节	故障电流限制器	344
第九节	重合器与分段器	348
第十节	避雷器	349
参考文献		352
第十章	高压组合电器	353
第一节	SF ₆ 封闭式组合电器 (GIS) 的发展方向及 技术问题	353

第二节	SF ₆ 绝缘金属封闭式组合电器 (C-GIS) (充气柜) 的发展 方向及技术问题·····	360
第三节	户外紧凑型组合式开关设备·····	364
	参考文献·····	367
第十一章	高压开关设备的智能化 ·····	368
第一节	高压开关设备智能化的概念·····	368
第二节	高压开关设备智能化的主要技术·····	369
	参考文献·····	375

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电压在 3kV 以上的电器。高压电器的种类很多，然而高压断路器却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定义如下：

断路器 (circuit-breaker) 能关合、承载、开断运行回路正常电流，也能在规定时间内关合、承载及开断规定的过载电流（包括短路电流）的开关设备。

高压断路器也应该能够开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）等等。通常使用的断路器分合频率不大，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。

总的来讲，要求断路器具有如下最基本的功能：

(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的和机械的作用。

(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，国家标准及其它有关标准对各种其它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 1kV 及以上主要用于开断或关合电路的电器。

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联结组成的总称。

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（高压开关柜即断路器柜、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、SF₆ 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 (disconnector) 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，能承载正常线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。

负荷开关 (switch, load-breaking switch) 能关合、开断及承载运行线路正常电流（包括规定的过载电流），也能在规定的时间内承载规定的异常电流（如短路电流）的开关。

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

故障电流开断的次数，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（自动重关合功能）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）至少有一部分地采用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元件是变压器、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。

这些元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（SF₆）断路器、真空断路器、磁吹断路器和空气断路器。目前用得较多的是少油断路器、真空断路器和六氟化硫断路器。

按照用途来分，断路器可有不同的用途，图 1-1 示出高压断路器在

电力系统中的使用情况。

1. 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 QF_H 。

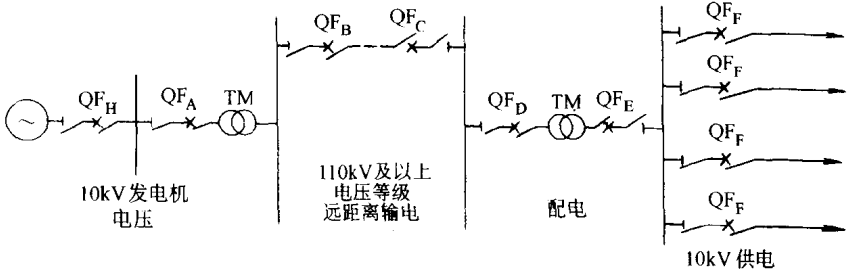


图 1-1 高压断路器在电力系统中的使用情况

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。这种断路器的结构复杂，很少用于其它小型机组。

近年来，由于 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 SF_6 发电机保护断路器。从灭弧机理上来看， SF_6 发电机断路器基本上有两种类型，一种是由 ABB 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 型和阿尔斯通 (Alsthom) 公司生产的 FKG 型为代表的压气式 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。

我国沈阳高压开关厂自行开发研制了压气式 SF_6 中等容量发电机断路器。额定电压为 18、24kV，额定电流为 6300、8000、10000、12500A；额定短路开断电流为 63、80、100kA。

2. 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_A 、 QF_B 、 QF_C 、 QF_D ）和配电用断路器（见图 1-1 中的 QF_E ）。输电用断路器的电压通常为 126~750kV，配电

用的为 12~72.5kV，有时可做到 126~256kV。

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。

20 世纪 40 年代，以多油断路器为主。到了 20 世纪 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 275~500kV 级。20 世纪 60 年代，性能优异的 SF₆ 断路器和全封闭组合电器问世。此后，采用电场数值计算，改进灭弧室结构，断路器由双压式变为单压式。由于性能不断改进，使现在 SF₆ 断路器的单断口开断容量为空气断路器的十多倍。到了 20 世纪 70 年代，SF₆ 断路器全面取代空气断路器。现在 245kV 及以上电压等级，世界上一些先进国家的公司已完全转为生产 SF₆ 断路器和 SF₆ 封闭式组合电器。

不少公司已在生产 245kV、单断口、开断电流 40~50kA 和 550kV，双断口、开断电流 63kA 的瓷柱式和罐式断路器。英国的雷诺 (Reyrolle) 公司和日本现在都在生产 420kV、开断电流达 50kA 的单断口罐式断路器。日本三菱、日立和东芝公司现都已研制出了 550kV 单断口、开断电流为 50~63kA 的罐式断路器。三菱公司为了提高 SF₆ 断路器的性能和可靠性，便于维护和检修，研制成 72~204kV、40kA 级配弹簧操动机构的罐式 SF₆ 断路器。为了提高这种断路器的开断性能，又开发了 168~204kV、40kA 的新型灭弧室。他们利用现代技术，合理地减小灭弧室的压气室，使从压气室到绝缘喷口的气流通道更加合理，利用电弧的能量提高压气室内的温度和压力，在电流过零点附近提高吹弧气流速度，从而提高灭弧室的开断能力。

Alsthom 公司开发的 SF₆ 断路器，从压气式发展到热膨胀+助吹式，最近又开发了热膨胀+助吹+助推活塞式。热膨胀+助吹原理是

利用电弧加热 SF_6 气体而得到的高压力形成压差来熄弧。用热膨胀原理解决大电流开断问题，用附加的吹弧容积（助吹）来解决小电流开断问题。这样可以充分利用电弧能量，至少能将操作功减少 50%，并可以配用低操作功的弹簧操动机构。该公司利用这种原理制造出了 52、72.5、100 和 123kV 四个电压等级的配用 BLRXE 型弹簧操动机构的 SF_6 断路器。热膨胀+助吹+助推活塞原理是利用后置活塞，吸收 SF_6 压力作用于灭弧室下部分的能量，这就增大了操作断路器的能量，减少了压缩功。这种能量吸收装置可减少操作功 30%。该公司据此原理开发出了 145~245kV SF_6 断路器，配用 BLRXE 型弹簧操动机构。对于 245kV 以上级，仍采用压气式，配用液压操动机构。我国现已研制出了 126kV 级自能式吹弧（也即热膨胀+助吹原理）的配用弹簧操动机构的 SF_6 断路器，正着手开发 252kV 级自能吹弧式 SF_6 断路器。可以预见，最近一段时期，将会大力发展 126~252kV 级自能式 SF_6 断路器。

要保持 SF_6 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°C ，而且无须加热。解决这个课题的途径主要是采用 SF_6 气体与其它气体的混合物作为绝缘和灭弧介质。研究表明，氮气 47% 与 SF_6 53% 气体的混合气体的电气强度和灭弧能力与纯 SF_6 气体没有很大的差别。

3. 供电用断路器 图 1-1 中 QF_F 为供电用断路器。这类断路器有时直接用于工业企业中，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之为中压断路器。

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_6 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 20 世纪 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。从 1977 到 1988 年，作为无油开关两大支柱的 SF_6 与真空开关在世界范围内引起了旷日持久的论战。论战的结果， SF_6 与真空开关都有了长足的发展，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 SF₆ 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。在整个世界中压市场中,估计真空断路器约占 65%, SF₆ 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在: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 SF₆ 断路器中,灭弧主要为压气式原理,而在中压 SF₆ 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 SF₆ 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 SF₆ 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。

4. 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,还是综合技

术水平都有很大的差别。特别是其它行业技术的快速发展，应用到高压开关领域，使许多以前想到而无法实现的设想变成了现实，扩大了高压电器的概念，除了在电器一次设备方面采用了更先进的技术，如提高开断能力、提高绝缘性能缩小体积等，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。另外，还发展了一些新概念的开关电器，如固态无触点开关、超导限流装置、高性能氧化锌避雷器等，使得高压电器的控制和保护的概念发生了革命性变化。从上述各种高压电器的定义可以看出，国家标准随着高压开关设备的不断变化，术语也在逐渐增加，如分段器、重合器、各种组合电器等都是新加的。可以说，现在的高压开关设备所包含的内容较过去要广泛得多。为了向社会提供高质量的电能，高压开关设备领域应坚持技术进步，不断促进和推动电力系统装备技术水平的提高和管理手段的现代化。

目前，高压开关设备正向着高压大容量、自能化、小型化、组合化和智能化的方向发展。

(1) 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级电力系统的不断发展，以及考虑到将要发展的1100kV特高压输电系统，使得开发研制550kV、63kA甚至更高参数的单断口断路器成为下一步的目标。

(2) 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点开关，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SF₆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、材料和工艺技术的进步，在同等可靠性的前提下，弹簧操动机构因结构简单、零部件少、体积小巧而被更多采用。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。

(3) 高压开关电器的小型化 高压开关电器小型化的目的是为了减少占地空间、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，SF₆ 气体在高压、超高压和特高压开关设备领域占有不可替代的地位，而 SF₆ 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，高压开关设备的小型化会减少对 SF₆ 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是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。

(4) 高压开关设备的组合化 高压开关设备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，因此高压开关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。

(5) 高压开关电器的智能化 由于计算机技术、数据处理技术、控制理论、传感器技术、通信技术(网络技术)、电力电子技术的发展，高压开关设备的二次检测、控制设备和元件等方面有了很大的改革。采用数据采集与处理、故障诊断、自动控制与操作等技术，开发了罗氏