

高压开关设备

生产运行实用技术

郭贤珊 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

高压开关设备

生产运行实用技术

郭贤珊 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内
容
提
要

本书从生产运行的角度对高压开关设备技术进行了阐述,主要介绍了高压开关设备如断路器、GIS、隔离开关等设备的工作原理、特点及分类,并介绍了混合技术气体绝缘开关设备、特高压开关设备以及高压开关设备的发展情况,详细分析了近年来高压断路器、隔离开关、GIS(包括混合技术气体绝缘高压开关设备)、支柱绝缘子等设备生产运行的情况和近年来的事故、障碍情况,并介绍了主要的典型事故并附以大量现场图片,阐述明确,形象生动。同时总结了目前高压开关设备存在的几个主要问题,对高压开关设备的安全生产运行、试验、检修等方面也进行了介绍。

本书适用于电力生产运行、管理、检修人员学习参考,也可供大专院校师生和生产厂家人员从生产运行的角度了解高压开关设备。

图书在版编目(CIP)数据

高压开关设备生产运行实用技术/郭贤珊编著. —北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-4234-8

I. 高... II. 郭... III. 断路器 IV. TM561

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第039153号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年6月第一版 2006年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 403千字

印数0001—3000册 定价28.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

高压开关设备是电力系统中装备量最大的一次设备，是电力系统一次设备中惟一的控制和保护设备，是接通和断开回路、切除和隔离故障的重要设备。它的性能好坏直接决定电网的安全运行，而我国又是高压开关设备应用和制造大国。

高压断路器是高压开关设备中技术含量最高、地位最重要的具有灭弧功能的开关设备。高压开关设备的发展是以高压断路器的发展为代表的，高压断路器的技术进步又以灭弧技术的发展为主线，高压断路器经历了多油—少油—压缩空气—SF₆（真空）的发展历程，目前SF₆断路器在高压、超高压和特高压领域独领风骚，并已做到1100kV。

高压隔离开关（包括支柱绝缘子）是电力系统中使用量最大应用范围最广泛的高压开关设备。由于高压隔离开关主要是起隔离作用，而且结构简单，造价低廉，因此隔离开关又是最不受制造部门和使用部门重视的电气设备。长期以来，制造部门将高压隔离开关作为与断路器配套的一种附加产品进行生产，产品的性能和质量难以保证。电力系统运行部门在高压开关专业管理工作中多年来忽略了对高压隔离开关的管理，尤其是运行维护和检修的管理。导致目前隔离开关已成为开关类设备中故障率最高、运行情况最差的开关类设备。本书介绍了高压隔离开关设备的工作原理、特点和运行情况，并详细分析了目前存在的主要问题，介绍了一些典型事故，并介绍了我国高压隔离开关的完善化改造情况。

混合技术气体绝缘开关设备（复合型组合电器）目前在我国的的发展应用很快，是结合了GIS和敞开式开关设备的优点的开关设备。本书对这方面的技术发展情况进行了详细介绍。

第一章重点介绍了高压断路器的发展过程、工作原理和技术性能、SF₆高压断路器的特点，高压断路器的分类、结构形式、操动机构、以及合闸电阻、并联电容器等相关附件的工作原理和特点。

第二章介绍了几种主要高压开关设备的特点和工作原理，包括真空断路器、交流隔离开关、GIS和现在发展应用很快的混合技术气体绝缘开关设备的原理和应用情况，简要介绍了高压开关设备和特高压

开关设备技术的发展情况。

第三章详细地介绍了交流高压断路器、GIS（包括混合技术气体绝缘开关设备）、隔离开关和接地开关、支柱绝缘子的运行情况，详细分析了目前这些设备生产运行中存在的主要问题，并重点对 SF₆ 断路器大修、合分时间、隔离开关完善化、断路器提升杆断裂等主要问题进行了专题介绍，并介绍了一些典型事故。

第四章介绍了高压开关设备的运行技术，高压开关设备的安全运行贯穿设备选型、安装调试、运行维护、缺陷处理和检修等环节，本书也对高压开关设备的安全运行中的选型、监造、安全操作、技术监督、事故预案及故障处理等进行了介绍。

第五章重点讲述了高压开关设备的试验，对高压断路器、GIS、隔离开关等高压开关设备的型式试验、交接试验、预防性试验等进行了介绍，分析不同故障的可能原因，介绍了高压开关设备的检修，重点对 SF₆ 高压断路器、隔离开关的检修进行了介绍。

本书内容来源于生产运行实际，编者也力求从高压开关设备生产运行的角度来介绍和分析高压开关设备。希望对电力系统广大生产管理、运行、试验、检修人员，以及高压开关设备的技术爱好者有所帮助。

本书在编写中得到了华中电网有限公司教授级高工李仲夫、国家电网公司生产部李龙高工、湖北超高压培训中心张全元同志的帮助。中国电科院开关所宋杲同志提供了大量运行分析资料，在此表示感谢！

湖南省超高压公司李浙、王中和同志参与编写了第五章检修部分，并修改了第三、四、五章。

在编写过程中引用和参考了一些文章，没有一一表明出处，在此一并致谢！

由于编写经验不足，水平有限，不妥之处希望大家提出修改补充意见。

编者

2006年4月

目 录

前 言

第一章

高压开关设备原理及相关知识 1

第一节 高压开关设备相关概念 3

第二节 电力系统对交流高压断路器的要求 5

第三节 高压开关设备的发展历程 5

第四节 高压断路器工作原理 9

第五节 高压断路器的主要性能参数 13

第六节 高压断路器分类 21

第七节 高压开关设备型号名称 29

第八节 高压断路器相关附件 32

第九节 操动机构 41

第二章

典型高压开关设备介绍及技术发展 55

第一节 真空断路器 57

第二节 混合技术气体绝缘开关设备 60

第三节 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 69

第四节 高压开关设备发展趋势 80

第五节 特高压技术与特高压开关设备 83

第六节 隔离开关和接地开关 88

第三章

高压开关设备运行分析 107

第一节 交流高压断路器运行分析 109

第二节 GIS 和 HGIS 运行状况分析 132

第三节 交流高压隔离开关运行分析 139

第四节 支柱绝缘子运行分析 167

第五节 高压开关设备生产运行中存在的主要问题 171

第四章

高压开关设备运行 209

第一节 高压开关设备选型 211

第二节 高压开关设备监造 214

第三节 高压开关设备安装及投产验收 215

| | | |
|--------------------------|--|------------|
| 第四节 | 高压开关设备的安全运行 | 217 |
| 第五节 | 高压开关设备的运行与操作 | 223 |
| 第六节 | 高压开关设备缺陷管理 | 225 |
| 第七节 | 事故处理及预案 | 228 |
| 高压开关设备试验及检修 | | 231 |
| 第一节 | 高压开关设备试验 | 233 |
| 第二节 | 高压开关设备检修 | 247 |
| 第三节 | 高压开关设备检修准备 | 250 |
| 第四节 | 高压断路器大修基本流程 | 251 |
| 第五节 | 高压断路器设备大修安装时的注意事项 | 258 |
| 第六节 | 高压 SF ₆ 断路器大修中固体分解产物的安全环保处理 | 259 |
| 第七节 | SF ₆ 气体回收再生处理利用 | 263 |
| 第八节 | SF ₆ 高压开关设备检修中的安全防护 | 269 |
| 第九节 | 高压隔离开关维护和检修 | 273 |
| 参考文献 | | 277 |

GAOYAKAIGUANSHIBEISHENGCHANYUNXINGSHIYONGJISHU

第一章

高压开关设备原理及 相关知识





第一节 高压开关设备相关概念

高压开关是指额定电压 1kV 及以上主要用于开断和关合导电回路的电器。高压开关设备是高压开关与其相应的控制、测量、保护、调节装置以及辅件、外壳和支持等部件及其电气和机械的连接组成的总称,是电力系统一次设备中唯一的控制和保护设备,是接通和断开回路、切除和隔离故障的重要控制设备。随着电力系统的发展、技术的进步,高压开关设备从过去的简单几种,发展到现在数以百计的型号,生产厂家也为数众多,成为国民工业的重要支柱。

高压开关设备主要包括高压断路器、负荷开关、隔离开关、接地开关、熔断器、重合器、分段器、交流金属封闭开关设备(开关柜)、预装式变电站、气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)、组合电器等。下面简要介绍几种主要的高压开关设备概念。

断路器:能够关合、承载、开断运行回路正常电流,并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。交流高压断路器是电力系统中最重要、最复杂的开关设备,它担负着控制和保护的双重任务。如果断路器不能在电力系统发生故障时迅速、准确、可靠地切除故障,就会使事故扩大,造成大面积的停电或电网事故,因此,高压断路器的好坏、性能的可靠程度是决定电力系统安全的重要因素,高压断路器的发展也直接影响到电力系统的发展。

隔离开关:在分闸位置时,触头间有符合规定要求的绝缘距离和明显的断开标志;在合闸位置时,能承载正常回路条件下的负荷电流及在规定时间内异常条件(例如短路)下的故障电流的开关设备。当回路电流“很小”时,或者当隔离开关每极的两接线端之间的电压在关合和开断前后无显著变化时,隔离开关具有关合和开断回路电流的能力。

接地开关: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范围内的异常电流;但在正常回路条件下,不要求承载电流。某些接地开关可有关合短路电流的能力。接地开关可与隔离开关组装在一起。

负荷开关:能在正常的导电回路条件或规定的过载条件下关合、承载、开断电流,也能在异常的导电回路条件(如短路)下在规定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。

重合器:能够按照规定的顺序,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(不需要外加能源)控制保护功能的开关设备。可以自动按照设定的动作循环进行关合操作的且自具功能的断路器,操作顺序由本身自带的控制器完成,自备电源。一般动作顺序由电流-时间曲线确定。

分段器: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。分段器自动进行故障隔离,一般没有灭弧功能。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。它包括铠装式金属封闭开关设备、间隔式金属封闭开关设备和箱式金属封闭开关设备。铠装式金属封闭开关设备是指主要组成部件（如每一台断路器、互感器、母线等）分别装在接地的用金属隔板隔开的隔室中的金属封闭开关设备。间隔式金属封闭开关设备与铠装式金属封闭开关设备一样，其某些元件也分装在单独的隔室内，但具有一个或多个符合一定防护等级的非金属隔板。箱式金属封闭开关设备是指除铠装式、间隔式金属封闭开关设备以外的金属封闭开关设备。

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS，gas insulated metal-enclosed switchgear）：为封闭式组合电器。至少有一部分采用高于大气压的气体（而不采用处于大气压下的空气）作为绝缘介质的金属封闭开关设备。

组合电器：将两种或两种以上的高压电器，按照电力系统的主接线要求组成的一个有机的整体而各电器仍保持原规定功能的装置。

空气绝缘开关设备（AIS，air insulated switchgear）：一般指高压断路器与其他电器元件之间的连接暴露在空气中，又称敞开式高压开关设备。

复合式 GIS（HGIS，Hybrid GIS）：介于 GIS 和敞开式开关设备之间的组合电器，是一种混合技术气体绝缘开关设备。例如汇流母线采用敞开式，而其他电器采用 GIS。

混合技术气体绝缘开关设备：20 世纪末出现的一种开关设备，它是空气绝缘或（和）气体绝缘组合的紧凑型开关设备，高压断路器为 SF₆ 气体绝缘，部分高压电器元件之间为 SF₆ 气体绝缘，其他电器元件之间连接采用空气绝缘，以可靠性极高的单线布置为特征。其优势是比 AIS 大大节省了占地面积，比 GIS 大大节省了费用。在 2004 年国际大电网会议上，混合技术气体绝缘开关设备的优势被予以肯定。这种设备在降低费用的同时，带来极为灵活的解决方案。它减少了使用的元件数量，同时提高了可靠性。由于它使用标准化模块，可以在故障情况下以极短的时间恢复运行。它的另一个优势是安装时间最短。在故障情况下可以使用移开式开关设备（移动车），在 4~8h 内消除故障。

信息技术（智能）开关设备（ITS，Information Technology Switchgear）：三菱等公司提出的一种概念，典型代表产品就是 MITS（Mitsubishi Information Technology Switchgear），是将断路器、隔离开关、接地开关、光电式电压电流互感器布置在一个外壳内的复合高压开关设备，应用了相位控制装置、复合传感技术、数字在线监测技术和网络技术的高压开关设备。

交流高压断路器能在系统故障与非故障情况下实现多种操作，是电力系统最主要的控制与保护装置，是高压开关设备众多品类中的主导产品，也是一系列高压成套装置中的主要元件。气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）、组合电器、开关柜、重合器等都是以断路器为基础的开关设备。目前使用的高压断路器又以 SF₆ 高压断路器和真空断路器为主要代表，本书以介绍 SF₆ 高压断路器、隔离开关、接地开关、组合电器以及支柱绝缘子为重点。

第二节 电力系统对交流高压断路器的要求

电力系统对交流高压断路器有以下要求：

(1) 绝缘能力：高压断路器长期运行在高电压下，需有一定的绝缘承受能力，能够长期承受断路器额定电压及以下电压，并能短时承受允许范围的工频过电压、操作过电压和雷电过电压，而其绝缘性能不发生劣化。要求高压断路器对地及断口间具有良好的绝缘性能，在额定电压以及允许的过电压下不致发生绝缘破坏，在额定电压下长期运行时，绝缘寿命在允许范围内。

(2) 通流能力：断路器能够长期承受额定电流及以下电流，其温升不超过规定允许值。并能短时承受规定范围内的短路电流，其电气和机械性能不发生劣化。要求高压断路器在合闸状态下为良好导体，不仅对正常负荷电流而且对规定的短路电流也能承受其发热和电动力的作用。

(3) 关合、开断能力：断路器能在规定时间内可靠开断其标称额定短路电流及范围内的电流，而不发生重燃和重击穿，在规定时间内能可靠关合规定范围内的故障电流而不致发生熔焊，能承受其电动力影响而不致发生机械破坏。必要时还要开断和关合空载长线或电容器组等电容负荷，以及开断空载变压器或高压电动机等小电感负荷。

(4) 断路器的动作特性应满足电力系统稳定的要求，尽可能缩短切除故障时间，减轻短路电流对其他电力设备的冲击，提高输送能力和系统的稳定性。

(5) 断路器能够在允许的外部自然环境中长期运行，其性能应不发生劣化，且使用寿命不受影响。

(6) 断路器具备一定的自保护功能、防跳功能、如失灵保护、防止非全相合闸功能、合分时间自卫功能、重合闸功能等。

(7) 断路器的监视回路、控制回路应能与保护系统、监控系统可靠接口。

(8) 断路器的使用寿命能够满足电力系统要求，包括机械寿命和电气寿命，如现在一般要求断路器机械上可以连续操作 3000 次以上，开断额定短路电流 20 次以上，断路器整体寿命应在 20 年以上。

(9) 高压断路器还应保证在一般的自然环境条件下能够正常运行，并保证一定的使用寿命。

第三节 高压开关设备的发展历程

一、高压开关设备的技术发展

高压断路器是高压开关设备中技术含量最高、地位最重要的具有灭弧功能的开关设备。高压开关设备的发展是以高压断路器的发展为代表的，高压断路器的技术进步又以灭

弧介质的发展为主线，高压断路器经历了多油—少油—压缩空气—SF₆（真空）的发展历程，目前前面三种类型的断路器已经逐步淘汰。而 SF₆ 断路器在高压、超高压和特高压领域独领风骚，目前已做到 1100kV。高压开关设备品种众多，目前大量使用的有瓷柱式（GCBP），罐式（GCBT），还有 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）和复合电器（混合技术气体绝缘开关设备 HGIS）等。在配电领域又以真空断路器最为突出，是各种中低压开关柜的主体。

SF₆ 高压断路器的发展也是日新月异，经历了双压式（20 世纪 60 年代）—单压式（20 世纪 70 年代）—自能式（20 世纪 80 年代）—智能式（二次技术智能化，20 世纪 90 年代）的过程。目前最高电压等级的 1100kV 断路器已经带电运行多年，单断口电压做到 550kV，开断能力达到 63~80kA，电寿命可以达到不检修开断额定短路电流 20 次以上，机械寿命可以达到 10000 次以上，开断时间达到 40ms 以内。我国罐式断路器也做到单断口 550kV，瓷柱式做到 550kV 双断口。

双压式：SF₆ 断路器的最初形式，灭弧装置有两种压力系统，低压系统的压力一般在 304~507kPa 范围内，主要用作灭弧室的绝缘介质，高压系统的压力在 1013~1520kPa，它只在灭弧过程中起吹弧作用。双压式 SF₆ 断路器结构复杂，压力高，环境温度适应范围小，技术指标落后，故障率高，目前已淘汰。

单压式：也称压气式，单压式 SF₆ 断路器结构简单，环境温度适应范围广。压气式发展也经历了一个过程，从吹弧方面来看，第一代单吹结构，开断电流小（一般为 31.5kA），断口电压低（一般为 170kV）。第二代为双吹结构，开断电流增至 40~50kA，断口电压仍较低。第三代为双吹结构并辅以热膨胀效应（混合灭弧），开断电流大，可以达到 63~80kA，有的甚至达到 100kA，断口电压高，现在一般做到 252kV，最高做到 550kV。压气式断路器的发展，首先从灭弧技术的进步开始，采用先进的灭弧技术，优化灭弧室结构，提高开断能力和断口电压水平，大大降低了操作功，使 SF₆ 高压断路器的操动机构也从原来的液压机构，到气动机构，再发展到弹簧机构。

自能式：目前自能式 SF₆ 高压断路器有两种灭弧原理，一种是热膨胀原理，另一种是旋弧原理。目前大多数自能式断路器采用热膨胀原理。自能式 SF₆ 断路器利用断路器开断时的电弧能量来加热灭弧室的 SF₆ 气体，建立压力差，形成吹弧气流来熄灭电弧。采用自能式灭弧的断路器所需要的操作功大大减小，一般为压气式的 20%~50%，第二代热膨胀式 SF₆ 断路器的操作功仅为压气式的 1/9。弹簧机构在自能式断路器上普遍采用。

智能式：智能式高压断路器主要体现在二次系统上，通过计算机技术、传感技术、网络技术实现开关设备控制、监测和保护的智能化，实现开关设备状态在线监测。

二、我国高压开关设备的制造情况

我国高压开关设备的制造有几十年的历史，SF₆ 高压断路器的制造经历了自主开发、技术引进、消化吸收和创新提高的过程。最早是 1973 年在丹江口水电站投产的 126kV GIS，采用的 SF₆ 断路器为单压式、定开距、双断口，是由西安高压电器研究所、西安高压开关厂和长江流域规划办公室联合研制，西安高压开关厂生产的。1980 年又研

制了我国第一间隔 252kV GIS，并于 1982 年在江西南昌斗门变电站投入运行。1979 年在我国平武工程选用了法国 M.G 公司的 FA 系列断路器后，平顶山高压开关厂引进了 M.G 公司的技术，从此我国 SF₆ 断路器的制造技术进入了一个新的开端。平顶山高压开关厂率先引进 M.G 公司 FA 系列 66~500kV 瓷柱式断路器和 GIS 技术，在 20 世纪 80 年代全部实现国产化，其中 LW6 系列产品在我国电力系统的发展起了很大的作用，是我国装备最多的 SF₆ 断路器。后来西安高压开关厂 1985 年开始引进日本三菱的 SFM 断路器制造技术，开始生产 126~550kV 瓷柱式和罐式断路器以及 GIS。沈阳高压开关厂 1985 年引进日本日立公司的 OFPT 系列断路器和 GIS 制造技术，目前能生产 72.5~550kV 的 SF₆ 断路器和 GIS。上海华通开关厂也引进了 BBC 公司的 ELF 系列断路器技术，能生产 126~252kV 瓷柱式断路器。

目前世界上生产高压开关设备的企业主要是欧洲和日本的几个跨国公司，如 ABB、西门子、Schneider、AREVA 和日本的三菱、东芝、AE 帕瓦株式会社等公司，这些公司代表了世界高压开关设备制造的最高水平，其中日本公司虽然发展起步晚，但通过自身努力，在超高压、特高压以及 GIS 等技术上走在了世界前面，是最先研制出 550kV 单断口 SF₆ 断路器的国家，其 GIS 的复合化、小型化技术也领先全球。我国高压开关生产企业主要有西安西开电气股份公司（原西安高压开关厂，简称西开或西高）、平顶山平高电气股份公司（原平顶山高压开关厂，简称平开或平高）、北京北开集团、山东泰开电气公司、新东北电气（沈阳）高压开关有限公司（原沈阳高压开关厂，简称沈开或沈高）等。随着我国经济的快速发展和对外开放的加大，一大批国外著名开关制造企业开始在中国建立合资企业，如西门子（杭州）高压开关有限公司、苏州阿海珐开关有限公司、北京 ABB 开关有限公司、厦门 ABB 开关有限公司等。目前我国生产高中压开关设备的企业已有两百多家。

目前我国西安西开电气股份公司是生产高压开关设备的最大企业，也是高压开关设备技术最为先进的企业之一。该公司引进日本三菱技术后，生产瓷柱式和罐式两个系列 SF₆ 断路器，目前瓷柱式 LW15—550 和罐式 LW13—550 均做到 550kV/4000A/63kA，配合三峡工程该公司又引进了 ABB 公司 ELK 系列 GIS 制造技术，并研制了 LW25—252/4000—40 型自能式 SF₆ 断路器。2004 年该公司独立研制出 550kV 单断口罐式断路器，采用液压机构，已经于 2004 年在 KEMA 试验室通过全部型式试验，在湖北咸宁 500kV 变电站挂网试运行，为进一步开发 800kV 和 1000kV 特高压断路器打下了坚实的基础。

平顶山平高电气股份公司生产的 LW6 系列断路器在我国广为使用，目前该公司自行开发了 LW10B—550 双断口 550kV SF₆ 高压断路器，是瓷柱式国产先进产品，2003 年通过 CESI 试验室的型式试验。其还研制了 LW6B 系列产品，占领了很大市场，并先后开发了 LW35—126/252 型自能式 SF₆ 断路器。合资公司平高东芝负责生产罐式和 GIS 等高压开关设备。

新东北电气（沈阳）高压开关有限公司的 SF₆ 断路器有瓷柱式和罐式两个系列。先后引进了 M.G 公司和日立公司的技术，生产 LW6 系列瓷柱式 SF₆ 断路器，LW11 和 LW12 系列为日立技术，LW11 做到 252kV，LW12 做到 550kV。LW33 为该公司研制的自能式

SF₆断路器，做到单断口 126kV。

我国高压、超高压 SF₆断路器的技术进步主要表现在：

(1) 西安西开电气股份公司 2004 年完成了 550kV 单断口罐式 SF₆断路器产品的开发，使我国成为世界上为数不多的掌握该技术的国家之一，为我国进一步研制 800kV、1100kV SF₆断路器和 GIS 设备奠定了技术基础。

(2) 我国已掌握了 252kV 自能式 SF₆断路器制造技术。

(3) 西安西开电气股份公司自行研制了具有自主知识产权的三相共箱型 ZF□—126/T3150—40 型智能化 GIS。

(4) 252kV SF₆断路器和 GIS 参数上了一个新档次，都达到 252kV/4000A/63kA，成为国内电力系统使用的主要产品。

(5) 针对国家发展特高压电网的计划，西开提出了以 2 个 550kV 单断口断路器灭弧室串联的罐式方案，平高提出了四个 252kV 断口断路器灭弧室串联的瓷柱式方案，目前正在研制中。

2004 年，我国高压、超高压 SF₆断路器和 GIS 生产有了大幅度增长。生产 550kV SF₆断路器 372 台，增长 409%；363kV SF₆断路器 43 台，增长 95%；252kV SF₆断路器 2375 台，增长 209%；126kV SF₆断路器 7444 台，增长 85.6%；72.5kV SF₆断路器 1251 台，增长 60%。生产 550kV GIS 8 间隔，363kV GIS 19 间隔，252kV GIS 679 间隔，126kV GIS 2280 间隔，与上年相比都有大幅度增长。

三、高压开关设备在我国的应用情况

我国最早使用 SF₆ 高压断路器是在 1970 年，东北电管局引进了 3 台西门子公司的 H—912 型 220kV 双压瓷柱式 SF₆ 断路器，安装在沈阳虎石台变电站，至今仍在运行。1974 年华北电管局引进了日立公司的 13 台 220kV 罐式 SF₆ 断路器，安装在陡河电厂。1977 年武汉钢铁公司引进 BBC 公司的 6 间隔 110kV GIS。1980 年贵州电力局又从日本富士公司引进了 6 台 BAK2 型 220kV 罐式 SF₆ 断路器，安装在贵阳鸡场变电站和贵州铝厂。1981 年上海供电局引进日本三菱公司的 6 间隔单压式 220kV GIS，安装在上海泰和变电站，而宝钢从东芝公司购买了 6 间隔 220kV GIS 和 40 间隔 110kV GIS。1981 年随着我国首个 500kV 输变电工程（平武工程）引进的法国 M.G 公司的 FA 系列 16 台 500kV 和 10 台 220kV 瓷柱式 SF₆ 断路器的投运，我国高压断路器应用步入一个新的里程碑。随后大批量的进口、国产的 500kV 及以下电压等级的 SF₆ 断路器陆续进入电网运行。

目前我国已是 SF₆ 断路器的使用大国，2003 年统计在运的 66kV 以上高压断路器有 57867 台。其中国家电网公司系统运行的有 550kV 高压开关设备 1157 台，其中瓷柱式断路器 903 台，占总数的 78.0%，罐式断路器 224 台，占 19.4%，GIS 间隔 16 个，占 1.4%。其中进口及合资的有 856 台，占总台数的 74.0%，进口 550kV 高压开关设备中最多的 ABB 公司有 288 台，其次西门子公司的有 366 台；国产的 287 台，占 24.8%，其中最多的是西高的 LW13/15 系列，有 100 台，其次是沈高 86 台，平高 59 台。而且每年还以较快的速度增长，特别是随着西北电网 750kV 示范工程的投产和百万伏特高压工程的

建设,我国高压开关设备技术的发展将迎来新的春天。

第四节 高压断路器工作原理

SF₆气体在高压开关设备中的应用是高压开关设备发展中最具深远影响的里程碑, SF₆断路器的出现才使高压开关设备从中压、高压、超高压一直走到特高压,成为高压开关设备中最具影响的开关设备。因此,了解高压断路器应重点了解 SF₆断路器。下面通过 SF₆断路器来介绍高压断路器的工作原理。

SF₆断路器的优势在于 SF₆气体的优异特点,因此要首先了解 SF₆气体的特点。

一、SF₆气体电气特性

(1) SF₆是卤族元素氟的化合物,卤族元素电负性较强,易于吸附电子形成负离子同时释放出能量。

(2) 负离子平均自由行程远比电子小,又容易与正离子复合而变成中性粒子,减少了间隙中的自由电荷。

(3) SF₆的分子直径比空气中氮、氧分子的要大,使电子在 SF₆气体中的平均自由行程缩短,因而不易积累能量,减弱了电子碰撞游离的能力。

(4) SF₆的分子量是空气的 5 倍,因此 SF₆离子与空气中氮、氧离子相比,在同样的场强作用下,速度要慢得多,这更有利于复合而使气体中的带电粒子减少。这种特性使 SF₆成为一种高电气强度的气体介质,在均匀电场下 SF₆的电气强度约为同一气压下空气的 2.5~3 倍,3 个大气压下 SF₆的电气强度约与变压器油相当。

二、SF₆气体绝缘介质的其他特性

(1) 电场均匀性对 SF₆气体击穿电压的影响远比空气大,而和压缩空气的击穿特性相似,即 SF₆气体在极不均匀电场下的击穿电压与之在均匀电场下的相比,降低程度比空气中要大得多。在 SF₆气体中影响固体绝缘沿面放电电压的主要因素有:①电场分布的均匀程度;②固体绝缘与电极结合部的气隙情况;③介质表面的光滑与清洁度。

(2) SF₆气体中的水分对绝缘的影响:①SF₆气体中微量水分虽然对 SF₆气体本身的绝缘强度影响不大,但水分凝露附着在断路器内部的盆式绝缘子、绝缘拉杆等固体绝缘件上时,会大大降低这些绝缘件的沿面闪络电压,从而影响断路器的运行性能;②在电弧的作用下,水分会参与 SF₆气体的分解反应,而生成剧毒的、腐蚀性很强的氟化氢、亚硫酸等分解物,它们会对高压断路器内部零部件产生腐蚀作用,降低绝缘件的绝缘性能,腐蚀金属部件的表面镀层,影响灭弧室内的电场均匀性,从而影响到断路器的绝缘性能和灭弧性能。一般来说, SF₆断路器中水分含量越大,对断路器的损害越严重,而且有毒分解物的存在也是断路器检修人员应注意的安全问题;③气压过高时, SF₆容易液化,在严寒地区使用受到限制。

三、SF₆气体的灭弧特性及灭弧原理

SF₆气体作为灭弧介质，有许多独特的优点：

(1) SF₆分子中完全没有碳元素。

(2) SF₆气体中没有空气，这可以避免触头氧化，大大延长了触头的电寿命。

(3) SF₆在电弧作用下所形成的全部化学特性比较活泼的杂质在电弧熄灭后极短的时间内又能重新合成，这样既可消除对人体的危害，又可保证处于封闭中的 SF₆气体的纯度和灭弧能力。

(4) SF₆是一种最好的电负性气体，能很快地吸附自由电子而结合成带负电的离子，又容易与正离子复合成中性粒子，去游离能力强。

(5) SF₆气体的分解温度（2000K）比空气（主要是氮气）的分解温度（7000K左右）低，而所需要的分解能高，因此，SF₆气体分子分解时吸收的能量多，对弧柱的冷却作用强。

(6) SF₆气体中电弧的熄灭原理与空气中电弧及油中电弧的熄灭原理不同，不是依靠气流等的等熵冷却作用，而主要是利用 SF₆气体特异的热化学和强电负性等特性，才使 SF₆气体具有强大的灭弧能力，对于 SF₆断路器来说，提供大量新鲜的 SF₆分子并使之与电弧接触是熄灭电弧最有效的方法。

四、SF₆高压断路器的特点

(1) 断口电压高，适合应用于高压、超高压和特高压领域，结构简单，可靠性高，体积小，无火灾危险。

(2) 开断能力强，开断性能好。目前 SF₆断路器可以开断 80~100kA 的短路电流，开断时间小。由于 SF₆气体具有强电负性，离解温度低，离解能大，电弧在 SF₆气体中可以形成有利于熄弧的“电弧弧柱结构”，熄弧时间小，一般 5~15ms，同时对其他类型断路器反应较为沉重的开断任务如反相开断、近区故障、空载长线、空变等开断任务也能轻松完成。开断小的感性电流时截流电流值小，操作过电压低。

(3) 寿命长，可以开断 20~40 次额定短路电流不用检修，额定负荷电流可以开断 3000~6000 次，机械寿命可达 10000 次以上。现在的产品一般可以做到 20~30 年不用检修。

(4) 品种多、系列性好，有瓷柱式（GCBP）和罐式（GCBT）两大系列，以 SF₆断路器为基础，发展了 GIS、HGIS 等多种产品。

(5) SF₆断路器没有燃烧危险。SF₆气体不燃烧，也不支持燃烧，运行更安全。不含碳分子，在电弧反应中没有碳或碳化物生成，绝缘和灭弧性能好。

(6) SF₆气体在 1997 年全球变暖京都议定书中被列为受限制的温室气体，其中世界上每年一半左右的 SF₆气体是用于高压开关设备，控制和减少使用 SF₆气体是高压开关设备的一项重要任务。在没有更好的替代物之前，提高 SF₆高压开关设备的断口电压、降低漏气率、减少废气排放、进行回收利用是降低 SF₆使用量的重要措施。