

高压开关设备状态 监测与诊断技术

苑舜 编著

高压开关设备状态监测 与 诊 断 技 术

苑 舜 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书对高压开关设备的国内外发展概况及有关检修现状进行分析,且对在国内运行的高压开关设备,尤其对东北电网的开关设备故障进行了统计分析,同时对电力设备的诊断技术的发展进行了论述。在此基础上对SF₆断路器、真空断路器及全封闭组合电器的状态监测及诊断技术进行了全面的论述,其中包括监测方法及监测系统的论述,以及诊断判别方法和相关理论的描述。

本书主要面向开关设备的制造厂家、电力系统运行单位和电力设备研究机构的设计人员、专业管理人员及开发研究人员,也可作为高校相关专业的师生,尤其可作为开关设备研究方向的研究生的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

高压开关设备状态监测与诊断技术/苑舜编著. —北京:机械工业出版社, 2001.2

ISBN 7-111-08486-1

I. 高… II. 苑… III. ①高电压-负荷开关-状态监测②高电压-负荷开关-故障诊断 N. TM564.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第72521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:牛新国 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:李雨桥 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·10.25印张·251千字

0 001—2 500册

定价:19.00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

前 言

高压开关设备在电网正常发送电时，是一个固定的静止设备，而在电网需要改变送电路径或出现故障时，它将作为切断或接通线路及切除故障点的设备，所以它是一种长期静态运行而需要动作时快速响应的保护性设备。它若出现故障就不能完成其切换线路的功能。而对其状态判别必须通过静止状态的有关参数信号的采集和处理来诊断动作时是否存在问题。

本书通过对高压断路器和 GIS 的故障分析之后，提出监测及诊断方法。本书第一章介绍了高压开关设备的现状及国内外发展动态，指出了 SF₆ 开关设备和真空开关设备两大发展方向；第二章针对东北地区近年来运行中开关设备出现的问题和事故进行统计分析，指出常见的事故类型；第三章介绍了国际上对故障诊断技术的新发展和有关理论基础；第四章针对高压开关设备预测维修及诊断自动化，对状态维修现状及发展进行论述；第五章针对 SF₆ 断路器绝缘及开断问题进行分析，提出诊断方法和诊断设备；第六章对真空断路器的事故和真空度等进行监测和诊断；第七章对 GIS 绝缘事故进行分析，从而提出监测及诊断手段；第八章对所有开关设备机械问题进行监测和诊断。

本书在稿件审核过程中得到了周章教授级高级工程师的热情帮助，在书稿的组织工作中得到辽宁电力科学研究院大连高科技中心同志们的大力协助，在此表示感谢！

书中有不完善或错误之处，请读者指正。

联系地址：辽宁省电力公司生产部 (邮编：110006)

作者

目 录

前言	
绪论	1
第一章 高压开关设备现状及发展趋势	3
第一节 高压 SF ₆ 封闭式组合电器 (GIS)	3
第二节 高压 SF ₆ 断路器	7
第三节 高压真空断路器	12
第四节 高压油断路器	16
第二章 高压开关设备的劣化现象及事故统计分析	17
第一节 高压开关设备的劣化现象分析	17
第二节 220kV 高压断路器的事故统计分析	32
第三节 63kV 断路器在东北电网内发生的事故情况及缺陷情况统计分析	38
第四节 SF ₆ 组合电器 (GIS) 事故调查	39
第三章 开关设备故障诊断的基础知识	44
第一节 开关设备故障诊断的任务	44
第二节 开关设备故障诊断的基本方法及其发展	45
第三节 开关设备故障诊断的内容和类型	46
第四节 诊断所需测量信号分类	48
第五节 诊断推理及专家系统的开发	49
第六节 神经网络、小波变换及分形几何在故障诊断中的应用的基础知识	52
第四章 电力设备的状态监测及诊断技术	59
第一节 我国电力设备在线监测技术应用状态	59
第二节 电力设备状态维修和诊断自动化	61
第三节 高压断路器状态监测的方法	67
第四节 高压开关设备的状态检修技术	75
第五节 高压开关设备在线监测的色度方法	77
第五章 SF ₆ 断路器状态监测与诊断	81
第一节 SF ₆ 断路器故障检查与监测	81
第二节 SF ₆ 断路器监测装置原理及应用	85
第六章 真空断路器状态监测与诊断	94
第一节 真空断路器的检查	94
第二节 真空断路器运行状态诊断方法	97
第七章 SF ₆ 全封闭组合电器 (GIS) 绝缘状态监测及诊断技术	107
第一节 GIS 使用中的某些特殊问题	107
第二节 GIS 外部诊断法	110
第三节 GIS 局部放电超声传播特性及监测	120
第四节 GIS 中快速暂态过电压的监测	129
第五节 GIS 外部诊断自动化系统简介	131
第八章 高压开关设备机械状态监测与诊断	141
第一节 机械状态监测方法	141
第二节 机械故障诊断系统	145
第三节 高压断路器机械特性的在线监测	149
第四节 高压开关设备导电连接处温度的状态监测	152
第五节 断路器的机械故障在线监测中的电磁兼容研究	154
参考文献	158

绪 论

国际大电网会议第 13 研究委员会对高压断路器的可靠性进行过两次世界范围的调查。第一次调查是于 1974~1977 年进行的,调查对象为 63kV 及以上各种灭弧原理的高压断路器。第二次调查是于 1988~1991 年进行的,调查对象集中在 72.5kV 及以上现代单压式 SF₆ 断路器。调查结果表明,断路器的可靠性在近 14 年来有了大的改进。这些改进主要表现在减少了灭弧室数和运行件数,主要故障下降了 50%。

第二次调查结果表明,从主要故障在部件上的分布看,操动机构占 43%,各运行电压下的元件占 21%,控制和辅助回路占 29%,其他占 7%。这就是说,操动机构所占故障首当其冲,控制和辅助回路不可小视,居第二位。再从次要故障看,操动机构占 44%,各运行电压下的元件占 31%,控制和辅助回路占 20%,其他占 5%。这就是说,控制和辅助回路次要故障率占第三位,但其故障率亦相当高。

现代高压单压式 SF₆ 断路器主要故障的分布中,控制与辅助回路之所以占主要故障 29% 和次要故障 20%,是由于采用的是传统的机电和控制辅助回路。将控制和辅助回路的主要故障和次要故障按产生的原因再细分,分合闸回路故障占主要控制回路故障的 34% 或者断路器所有故障的 10%,基于此种调查结果,GIGRE (国际大电网会议) 第 13.06 工作组(断路器的可靠性)在它的报告中,就其诊断问题指出:“迫切希望改进控制和辅助回路的可靠性。”

传统的断路器使用一排硬线连接的机电式继电器,其典型控制功能包括单项控制、反跳跃、相位移、失气压闭锁及因分闸储能不足而闭锁。

机电式控制元件近年来也有了改进,故这种方法用于断路器 40 多年来基本上无什么改变。制造行业也曾因如下原因不愿用微处理器为中心的控制元件:1. 在严重的电磁环境条件下,电子器件可靠性低;2. 增加了复杂程序;3. 增加了维修量;4. 硬件容易落后;5. 存在与现有的微处理器的接口技术有关的问题。

控制技术不断地在发展和进步,60 年代的集成电路,70 年代的微处理器,以及更多的电子器件进入高压开关设备,使之控制技术由最初的机电技术转变为电子技术,进而转变为以微处理器为基础的数字技术。80 年代初起,数字控制技术普遍用作以处理器为中心的集中解决方案。

以微处理器为中心的控制技术不断改进结构方案,加上它独具的优点,使之对电力系统担心的许多问题大有改观。

总之,机电控制装置引起的现代高压断路器主要故障率相当高,高达 29%,而采用微处理器为中心的控制装置不仅可以提高断路器的可靠性,而且可取得如下效益:1. 降低设备制造价;2. 减少土建费用;3. 可自诊断;4. 改进维修性;5. 有可能采用先进的通信能力;6. 降低监视和诊断费用;7. 可进行选项分合闸。

电力公司推进变电站二次技术改革,是与生产制造厂的技术部门合作进行的,如美国 AEP 电力公司与德国 AEG 制造公司,BPA 电力公司与 ABBT&D 公司,澳大利亚太平洋电力公司与澳大利亚 ABB 公司等。还有制造公司、电力使用部门和大专院校配合的,如 AEG 公

司、斯图加特大学和 Kali（钾碱）公司。

高压开关设备制造公司特别是欧洲几家大公司，都在大力推进二次技术的改革，如 ABB 公司、Siemens 公司、AEG 公司、GEC 公司、Alsthom 公司、MG 公司等。

当前对高压 SF₆ 断路器在线检测主要内容有：1. SF₆ 气体；2. 操动机构系统；3. 脱扣器和脱扣回路；4. 控制和辅助回路；5. 动力传动链。通过这些监视，可发现 90% 以上的故障。

对于 GIS 的诊断主要内容有三：一为检测电弧放电，用光电检测器确立电弧在气室的确切位置；二为监视 SF₆ 气体，用传感器监视温度、压力和密度，及时掌握气体状态；三为测量局部放电，检测方法有电磁式和光电式。

对于真空断路器可以通过监测手段判别真空灭弧室的真空度和力学性能。在线检测具有很大的优点，它通过连续检测确切了解运行状况，可以通过趋势分析，识别存在的故障，从而可以采取必要的措施，改以往的“定期检修”为“状态检修”，从而提高设备的利用率和节省检修费用。

高压开关设备的状态监测和故障诊断已有很长时间的研究历史，但至今还有许多关键技术没有解决，然而，通过检测监视、故障分析、性能评估等，为高压开关设备结构修改、优化设计、合理制造和生产过程都将提供需要的数据和信息，这对开关设备的制造厂家无疑是非常急需的材料；同时状态的检测和诊断将保证高压开关设备发挥最大的设计能力，制定合理的检测维修制度，以使在允许的条件下充分挖掘开关设备潜力，延长服役期限和使用寿命，降低开关设备全寿命周期费用，提高开关设备运行的可靠性、安全性和有效性，以期把故障损失降低到最低水平，这对电力系统的专业技术人员和运行维护人员也是十分关键的技术。

第一章 高压开关设备现状及发展趋势

高压开关设备主要是用于关合及开断电力线路，以输送及倒换电力负荷，以及从电力系统中退出故障设备和线段，以保证系统安全运行的重要设备。实际电力系统运行中，高压开关设备数量多，检修量大，大修费用高。如何实现预测维修、科学化管理是实现最佳经济效益和社会效益的最好途径。实现状态预测、诊断和维修，首先要了解开关设备的现状和发展趋势。

第一节 高压 SF₆ 封闭式组合电器 (GIS)

1.1 SF₆ 封闭式组合电器

SF₆ 封闭式组合电器（气体绝缘金属封闭开关设备）是将断路器、隔离开关、快速接地开关、电流互感器、避雷器、母线、套管和/或电缆终端等电气元件封闭组合在接地的金属外壳中，以 SF₆ 气体作为绝缘介质，简称 GIS，其作用相当于一个开关站。由于 GIS 具有体积小、占地面积少、不受外界环境影响、运行安全可靠、配置灵活和维护简单、检修周期长等优点，加之在技术上的先进性和经济上的优越性，已广泛应用于城市供电、发电厂、大型工矿企业、石油化工、冶金和铁道电气化等高压输变电系统中。特别是在利用边远地区水力资源和核能发电方面，超高压 GIS 更显示出常规设备无与伦比的优越性。GIS 无论从参数水平和技术经济上都日趋完善。目前 GIS 完成了系列化发展，已有 1150kV 以下各电压等级的 GIS 在世界各地运行。随着电力系统向超高压、高可靠性和紧凑性发展，GIS 已成为今后的主要方向。GIS 结构式有以下几种：

——分相式。主回路分别装在独立的圆孔外壳内，不会发生相间故障；电场较均匀，但外壳消耗材料多，密封面多，体积较大；外壳中感应电流大。

——主母线三相共筒式。仅三相主母线共用一个圆筒外壳，结构简化，尺寸减小，总体布置较方便；分支母线及分支回路中电器设备仍为分相式。

——全三相共筒式。每个元件的三相集中安装于一个圆筒外壳中，环氧浇注件支撑与隔离，外壳数量少，外壳尺寸小，省材料，减少密封环节；外壳电流小；相间电场分布互相有影响，可能导致相间及三相短路故障，电场较复杂。

——复合式。在三相共筒的基础上使元件复合化，在同一个外壳中，同时装几个元件，结构进一步简化，尺寸更小。

——箱式。每个功能单元的所有部件集中于一个矩形金属箱中，充气空间利用率高，体积小，无外装部件，安装与使用方便。

1.2 国外发展概况

国外第一台 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备是 1966 年开始运行的。70 年代，大容量的

SF₆ 断路器的研制成功,使 GIS 的参数水平不断提高,结构简化,可靠性增强。由于使用了氧化锌避雷器,降低了 GIS 绝缘水平,使 GIS 进一步小型化,运行可靠性也有很大提高,完成了 63~550kV 系列 GIS 的研制,并开发出 63~550kV 三相母线共筒和 63~240kV 全三相共筒式 GIS 及 63kV 箱式 GIS (C—GIS)。到了 80 年代,GIS 得到进一步发展。550kV 断路器的断口数从 4 个减少到 2 个,并形成了 63~550kV GIS 的批量生产。1980 年世界上第一台 800kV GIS 投运,使 GIS 向超高压方向迈出了一大步。300kV 全三相共筒式 GIS 也研制出来,并开发了 145kV 以下的复合型 GIS 和多种 C—GIS 产品。进入 90 年代,GIS 向高电压、大容量、小型化和提高可靠性方向发展。550kV 单断口技术已研制成功,为特高压 GIS 的开发打下了基础,现正研制 1100kV GIS,并使其进入实际运行;使用高性能 ZnO 避雷器,降低了雷电冲击水平,提高了 GIS 性能,又减小了尺寸;在较低电压等级上发展三相共筒式结构,GIS 结构大大减小;同时,为使 GIS 运行更加安全可靠,GIS 在线系统也在研制试验中。

当前国外生产 GIS 的主要厂家有 ABB 集团公司、GEC—Alsthom 公司、西门子公司、AEG 公司、MG 公司、东芝公司、三菱公司和日立公司。另外俄罗斯的列宁格勒电器厂和意大利的 NMGS 公司也生产 GIS 产品。

ABB 公司可生产额定电压 72~800kV 的 GIS,开断电流至 63kA。特殊条件下达到 80kA。在 170kV 及以下等级,一般为三相共筒式结构。GEC—Alsthom 公司是生产高压开关势力最强的公司之一,曾经投运过世界上第一间隔 800kV GIS,60~800kV GIS 已成系列,145kV GIS 采用三相共筒式结构,重量大大减轻,开断电流增大。西门子公司利用定开距开断电流大的优势,开发出 550kV、100kA 的 GIS。AEG 公司在 GIS 方面只开发单相式结构,提高了开断电流。日本三家公司都已开发出 550kV 单断口断路器用于 GIS 之中,且其额定开断电流达 50/63kA,目前正在开发研制 1100kV GIS。日本 GIS 均采用了高性能 ZnO 避雷器,将 550kV GIS 的雷电冲击耐压水平从 1800kV 降至 1425kV,既提高了性能又减小了尺寸,500kV 主母线可作成三相共筒式结构,300kV GIS 可做成全三相共筒结构。东芝公司的 GIS 系列为额定电压 72~800kV,额定电流 800~12000A。三菱公司开发出新型大容量 GIS 的额定电流为 4000~8000A。另外,俄罗斯、意大利等国都在研制 GIS。俄罗斯的 1150kV GIS 已挂网运行多年,但因种种原因现在并无发展。意大利的 550kV 单断口断路器已研制成功。以上几家公司代表了当今 GIS 的世界水平。

1.3 国内发展概况

GIS 是开关行业的高技术产品,1967 年国内研究机构与开关制造厂会同用户单位一道开始研制 110kV GIS,并于 1973 年首次投运成功。1980 年研制成功我国第一套 220kV 单断口 GIS。接着国内开关厂相继研制出 110kV 和 220kV GIS 产品。从 1985 年开始,我国三家高压开关厂相继从 MG 公司、日本三菱公司和日立公司引进了 GIS 的制造技术。平顶山高压开关厂较早从国外引进 GIS 制造技术,采用国产原材料,立足于自制设备,经消化、吸收,全部零件实现了国产化,现生产 63~220kV 的 GIS。西安高压开关厂自 1985 年同三菱公司合作生产以来,引进了 110~550kV 的 GIS 的全部生产技术,现在各个电压等级的产品在国内外都有运行实绩,其中 110kV GIS 的产品全部实现国产化,550kV GIS 国产化样机也通过了两部鉴定。沈阳高压开关厂 1985 年从日本日立公司引进 63~550kV GIS 制造技术,经消化、吸收,于 1991 年制造出第一台全部国产化的 550kV GIS,1992 年在辽阳变电站挂网试运行,现在

110kV 和 220kV GIS 大量投入电网运行，全部实现国产化。

1.3.1 盆式绝缘子

平顶山高压开关厂已能按 MG 公司要求，采用真空混料和浇注、压力凝胶和冷却浇注口工艺，生产出 110kV 和 220kV GIS 用的盆式绝缘子。沈阳高压开关厂经过几年的试验研究，筛选了国产化材料，在引进设备上浇注成功 110kV、220kV 和 550kV GIS 用的盆式绝缘子，其结构尺寸、机电性能符合引进技术要求。西安高压开关厂 126kV、252kV、363kV GIS 用环氧浇注绝缘件均已批量生产，达到三菱公司的技术要求。550kV 盆式绝缘子研制品也通过了各项试验，110kV 三相共筒式 GIS 用盆式绝缘子已达到三菱公司技术要求。

1.3.2 壳体焊接和壳体翻边

壳体焊接是制造 GIS 的关键工艺之一，它对整个产品的密封性能及电气性能影响较大。GIS 生产中，铝合金壳所占比例很大，其结构复杂，体积小，数量多，环缝长，母材较厚，进行焊接时，采用熔化极半自动氩弧焊（MIG）可以满足生产需要。国内在进行熔化极半自动氩弧焊时，解决了焊缝中气孔产生率高、等离子弧焊接铝合金工艺、铝合金用焊丝以及环境对焊接质量的影响和壳体焊前清理等问题，达到了三菱公司技术要求。

壳体翻边是 GIS 壳体制造的又一项关键工艺。冷翻边比热翻边更简便更经济，实施冷翻边工艺是壳体加工的一项先进技术。国内通过引进、消化、改造，自 1988 年 6 月采用冷翻边工艺以来，壳体加工质量符合设计要求，基本达到三菱公司的技术标准。

1.3.3 配套元件

GIS 集一次和二次元件为一体，包括成千上万种机械零部件和电气元器件。通常 GIS 生产厂都需要外购大量的配套件。因此，配套件的质量和水平对 GIS 的性能至关重要。

——氧化锌避雷器

氧化锌避雷器的使用，降低了对 GIS 绝缘水平的要求，减小了占地面积，对 GIS 起着重要作用。国内的避雷器制造厂通过技术引进，使国产避雷器性能大大提高，500kV 及以下 GIS 用的氧化锌避雷器已分别按日立和三菱公司的要求完成了研制并投入运行。

——电压互感器

国产 GIS 用的电压互感器主要是电磁式的。由上海互感器厂引进德国技术生产，其产品在许多 GIS 工程中被应用，质量较好，500kV 及以下电压互感已经通过鉴定，可以为 GIS 配套。

——控制元件

GIS 生产厂家与有关专业厂共同对电气控制元件进行研制，现已初步解决了国产电气控制元件的一些问题，基本满足了 GIS 要求。除此之外，其它控制元件如防爆装置、空气阀门、SF₆ 气体阀门等，GIS 生产厂家会同专业厂家联合研制了专用元件，其性能好，体积小、可靠性高。

1.4 发展趋势

随着 GIS 的不断完善和电力系统发展需要，超高压开关设备选用 GIS 已成为整个世界的发展趋势。GIS 在小型化、提高可靠性及对环境的适应性等方面也在不断地发展着。

1.4.1 超高压大容量

俄罗斯早在 80 年代就开发了 1150kV GIS，并在古比雪夫水电站试运行多年。日本正在

研制 1100kV、4800kA、50kA 的 GIS，准备挂网运行。其它一些国家也根据电力发展需要，选用特高压作远距离大容量输电。我国在 80 年代就提出要发展到百万伏级，现正在研制 550kV 单断口断路器，为下一步开发百万伏级 GIS 创造条件。

1.4.2 小型化

——复合化。在 GIS 中采用组合式结构，减少了零部件数和密封点数及密封长度，使 GIS 尺寸明显缩小。145kV 的 GIS 已完成复合化，今后会向更高电压等级发展。

——减少超高压断路器断口数。提高断口电压，减少断口数对于 550kV 断路器来说，从双断口到单断口，零件数可减少约 25%，成本可降低 25% 左右，尺寸缩小，可靠性也可提高。目前国外已做出 550kV 单断口断路器。800kV 断路器灭弧室数将可能由过去的 4 个减至 2 个。

——开发光电电流互感器。其特点是可使 GIS 小型化，互感器线性度好，耐冲击波和抗干扰性强，控制保护信息传递光纤化。东芝公司已开发出光电电流互感器用于 300kV 三相共筒式 GIS 上。美国在此方面也有深入研究。

——改进隔离开关结构。隔离开关要求有一定的开断小电流的性能。东芝公司利用磁吹结构来改善隔离开关小电流性能。ABB 公司推出三工位隔离开关，起到接地开关和隔离开关的双重作用。在超高压时，隔离开关开断会产生过高频高电压，作为限制隔离开关操作过电压的措施，日本研究了在分合闸时极间接入电阻的隔离开关，但同时要提高电阻器的绝缘性能。另外，还要从改善小电流熄弧过程和触头的电场分布上寻求解决办法。

——采用高性能氧化锌避雷器。由于成功地应用了计算机辅助设计，特别是 ZnO 材料和制造工艺的改进，大大降低了 ZnO 避雷器的保护水平。采用这样的避雷器和提高绝缘配合技术可以降低雷电冲击耐受水平，实现 GIS 小型化。

——采用三相共筒式结构。三相共筒式结构代表着 GIS 在较低电压等级的发展方向。这种 GIS 已成为 110~300kV 电压等级的主要产品。现已制成 300kV 全三相共筒式 GIS，550kV 和 GIS 仅制成主母线三相共筒式。这样产品体积减小，重量减轻，使 GIS 的安装面积比过去减少 60% 以上。现在正在研制 420kV 全三相共筒式 GIS。

1.4.3 提高可靠性及对环境适应性

向不间断供电、变电站自动化、无人管理方向发展，更加提高产品可靠性。

GIS 在线检测技术是保证和提高运行可靠性，减少运行中维护的关键。这一方面的研究日益受到重视，并逐步进入实用化。主要的监测目的有：

——绝缘性能。用超高频电磁波法检测盆式绝缘子的局部放电，GEC—Alsthom 公司的部分 GIS 产品都带有这种检测装置；SF₆ 绝缘性能用密度检测和气体分解物检测法测定。

——导电性能。利用红外测量法对触头情况进行检测。

——开断性能。通过一些间接测量判断开断元件的开断性能。

——GIS 其它性能。如避雷器等，这方面技术已经成熟。

在特殊环境下，如寒冷地区，SF₆ 断路器的使用会受到限制，可以通过加热保持 SF₆ 气体温度，也可以采用 SF₆ 混合气体作断路器的绝缘介质。

1.4.4 复合电器

复合电器是将变电站的全部可动一次元件封闭于金属外壳内，曝露在大气中的只是电压互感器、避雷器、架空母线等静态元件。从运行性能来看，它既有 GIS 的主要优点，又有罐

式断路器维护方便的特点。复合电器的可靠性高、适应性强,比敞开式电器节约安装面积,价格仅为 GIS 的 30%~60%,成为 GIS 演变发展的一个方向。

第二节 高压 SF₆ 断路器

2.1 瓷柱式 SF₆ 断路器

2.1.1 概述

瓷柱式 SF₆ 断路器采用性能优越的 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质,具有开断性能好,机械强度高,维护工作量少,机械寿命长等优点,是高压输配电系统的控制和保护设备,主要用于发电厂、变电站、大型厂矿等使用场所。

国外从 50 年代开始研究高压 SF₆ 断路器,至今已有 40 多年了, SF₆ 断路器的发展经历了双压式—单压式—自能灭弧式三个阶段。

单压式 SF₆ 断路器结构有定开距和变开距两种,分别具有开断电流大及断口电压高的特点。国外单压式产品以 52~800kV 成系列,额定电流至 4000A,开断电流可达 63kA,其中 245kV 级为单断口,550kV 级为双断口,800kV 级为 3~4 断口,开断时间做到两个周波。近年来,在灭弧方式上取得新突破,自能灭弧式 SF₆ 断路器大多采用混合灭弧原理,这一方面简化了灭弧室的结构,缩小了尺寸;另一方面,配用了低操作功的弹簧机构。这种断路器目前只做到 52~245kV 级,245kV 级以上还是压气式断路器。

目前,国内各厂家生产的瓷柱式 SF₆ 断路器的性能、结构都有了很大的发展,产品的技术参数如开断电流、单断口工作电压都已超过了传统产品,开断电流为 40~50kA,单断口电压 220kV,各项技术指标达到了 80 年代末期的国际水平,可以满足国内大部分电网的要求。

10~35kV 级产品,国外基本上实现了无油化,其中 SF₆ 断路器占的比重相当大,技术参数范围宽阔,指标高,多数系列的额定电流为 600~3150A,一些公司由于采用双回路触头系统,额定电流高达 4000A;额定短路开断电流在 20~25kA,有的高达 40kA。在操作机构方面,使用简单可靠的弹簧储能机构,大大降低了操作功,这些都体现当代 SF₆ 断路器的总体水平。国内开发的压气式 SF₆ 断路器,其额定电流、额定短路开断电流也分别达到 3150A,31.5~40kA;其技术性能达到 80 年代末期国际水平。

2.1.2 国外发展概况

1. 双压式

60 年代开发的第一代双压式 SF₆ 断路器在原理上与常压式空气断路器相同。灭弧高压区压力为 1.5MPa,低压区压力为 0.3MPa。开断时,随着气流从高压区流向低压区而熄弧,故称之为双压式。虽然开断能力强,开断时间短,但由于其结构复杂,容量低,使用麻烦,很快被单压式所取代。

2. 单压式

单压式设计原理首次出现在 60 年代,但它完全成熟则是在 70 年代。许多公司竞相开展研究工作,原来搞双压式的公司也改为研究单压式,如 ABB、西门子公司等。也有的公司未搞双压式而直接进入单压式产品开发,如 AEG 和 Alsthom 公司等。它的工作原理是灭弧期间机械压缩 SF₆ 气体,以提高到所需压力供灭弧之用。断路器正常通电运行时保持一种较低压

力(0.5MPa左右)的 SF_6 气体,分断过程中,利用触头及气缸的运动产生压气作用,压气室内的气体受压缩使压力增大,在喷口处形成气流向低压流出,产生了与双压式类似的气吹效果。与双压式比较,没有高压气体的贮藏问题, SF_6 气体回收程序也被省去。

国外公司的单压式产品有:ABB公司EDF-SK型(52~84kV、25~31.5kV)、HPL型(72.5~362kV、63kA)和ELF型(245~800kV、63kA);GEC Alsthon公司145~800kVFX系列,开断电流63kA,全开断时间二周波,可以配备合闸电阻,增加抗震装置,抗震强度达0.5或0.7g;MG公司72.5~800kVFA系列,额定电流至4000A,开断电流达63kA;西门子公司以72.5~800kV成系列,其中550kV开断电流100kA,800kV开断电流50kA。

制造变开距灭弧室的外国公司中技术最高的是日本的东芝、日立和三菱公司。东芝公司的断口电压水平是550kV、63kA,它采用了混合压气式灭弧室,在开断时产生高喷吹压力,可缩短开断时间,减少触头的烧损,同时也有减小压气缸直径的可能,达到断路器小型化和减小操作功的目的。日立公司研制550kV单断口灭弧室,对电极间电场使用了精确的分析技术,并开发了多次开断短路电流后不受弧烧损、绝缘性能不降低的喷嘴材料,使之从小的线路充电电流到短路电流的开断,具有较高的绝缘恢复特性。三菱公司采用在聚四氟乙烯中添加微量无机填充剂的新喷嘴材料,并开发了新型D系列灭弧室,采用新型陶瓷电容器均压,抑制了开断近区故障时高频瞬态恢复电压。

国外公司一方面改进灭弧室,研制更高电气参数的产品;另一方面努力改善断路器的机械性能,减小操作功,开发更先进、更有效的操动机构,大大提高了瓷柱式 SF_6 断路器的可靠性。现在国外许多产品的机械寿命可达一万次,而故障率大大降低。

3. 自能灭弧式

1984年以来, SF_6 断路器的模拟技术和计算技术得到了长足的发展,人们通过对断路器动态特性的模拟,对电弧的模型化,对气流场和电场的综合计算,使之对断路器的开断现象有了进一步的认识。利用电弧本身的能量加热 SF_6 气体,建立高压力,形成压差,通过高压 SF_6 膨胀,而达到熄灭电弧的目的。这样做有两个好处:一是不用操动机构提供压缩功,故大大减轻了机构负担,可不用大容量液压机构而采用低操作功的弹簧机构。二是简化了灭弧室的结构,缩小了尺寸。新的自能灭弧室大多采用混合灭弧原理,即利用膨胀+助吹的原理,有效地解决了开断大电流和小电流的矛盾。

LTB型(72.5~170kV) SF_6 断路器是在ABB集团内第一个合作生产的自能灭弧式断路器。它吸收了HPL和EDF系列断路器的优点,配用简单可靠的弹簧储能机构,无论是机械操作型BLK还是液压操作型AHMA,均为三相或单相操作提供了最优设计。

CEC Alsthon公司开发的新一代FXT型热膨胀断路器,于1988年11月在巴黎“Elec88”展览会上首次与用户见面。其热膨胀式断路器有两种:第一种为热膨胀+助吹,即在开断大电流时,利用电弧的热效应;对于小电流,则通过压气助吹熄弧,这种技术特别适用于245kV以下电压等级的产品。第二种为热膨胀+助吹+助推,这种技术能加速电弧的开断过程。已开发出FXT12~14型(145~245kV) SF_6 断路器;不带均压电容器的FXT16型420kV、40kA SF_6 断路器已在试验中。

AEG公司于1992年和1993年汉诺威展览会上展出了SI型170kV、3150A、31.5kA和245kV、3150A、40kA自能灭弧式 SF_6 断路器的一相,该断路器配弹簧操动机构,大大降低了操作功。开断时所需能量储存在弹簧内,能量无损耗,不需监视和补充能量。

4. 10~35kV SF₆ 断路器

70 年代后半期, 国外许多公司开始大量设计、制造比较廉价和简单的 10~35kV SF₆ 断路器, 并达到实质性技术进步和完善化。80 年代, 瑞士 ABB, 法国 MG 和 Alsthom, 日本三菱、日立、安川等公司都掌握了 10~35kV SF₆ 断路器的生产。MG 和安川公司以生产旋弧式为主。ABB、Alsthom 公司则以生产自能灭弧式为主。ABB 公司是先后开发出 HG 型压气式, HB、HA 型自能灭弧式 SF₆ 断路器。HB 型的原理是旋弧+热膨胀+助吹, 而 HA 型是在 HB 型的基础上取消助吹, 使结构更加简单。MG 公司最近又开发了旋弧+热膨胀式 SF₆ 断路器, 在旋弧基础上加热膨胀以提高灭弧效能, 同时加装保护装置, 使开断、保护构成一个整体。

2.1.3 国内发展概况

70 年代末, 西安高压开关厂与南斯拉夫动力投资公司联合设计了 220kV 单断口和 550kV 双断口, 开断电流为 40、50kA SF₆ 断路器。平顶山高压开关厂 70 年代末率先引进法国 MG 公司的 FA 系列瓷柱式 SF₆ 断路器技术, 80 年代中期全部实现国产化, 其中, LW 系列产品已成为我国电网中应用量最大、使用面最广的重要设备。新产品 LW10-330 型 SF₆ 断路器通过抗地震性能试验, 可应用于 9 度地震烈度区。

西安高压开关厂与日本三菱公司于 1985 年合作生产 SFM 系列 SF₆ 断路器, 至今已出厂 110~550kV SF₆ 断路器数百台, 国产化率达到 85% 以上。220kV 单断口灭弧室在不带电容器的情况下开断电流达到 50kA, 是目前国产 GCB 开断性能最好的灭弧室。另外, 与西高所共同研制出采用 SF₆+N 适用于 -40℃ 以下低温的 220kV SF₆ 断路器, 在东北已运行。

沈阳高压开关厂于 1985 年从日本日立制作所引进 72.5~550kV OFPI 系列 GCB 产品制造技术。其中, 72.5~220kV 级每相一个断口, 330kV 和 550kV 级每相两个断口。该系列产品与 SFM 系列产品一样, 都是目前我国单断口电压水平最高的瓷柱式 SF₆ 断路器。

上海华通开关厂以技贸结合的方式, 从 BBC 公司取得了 110/220~550kV ELF 型瓷柱式 SF₆ 断路器的全部制造技术, 现已完成了国产化产品研制工作, 1992 年产品投入万荣变电站试运行。

我国 10~35kV SF₆ 断路器的研制始于 80 的年代初期, 多以自行设计为主, 工艺材料立足国产化。LM、LW 两大系列产品都是由西安高压电器研究所组织联合设计的。十多年来的运行经验表明两大系列产品取得较大成果, 产品进入广泛应用阶段, 使用量逐年增加。随着改革开放, 一些厂家引进国外中压 SF₆ 断路的技术性能、参数都有很大提高, 具备了参加国际市场竞争条件。

我国 10~35kV SF₆ 断路器多采用旋弧、自能、压气等灭弧式结构, 但由于旋弧式开断容量较小, 满足不了电力系统发展的需要, 近年来相继开发出压气式大容量 SF₆ 断路器。目前 10~35kV 级压气式 SF₆ 断路器, 其额定电流可达 3150A, 开断电流 31.5~40kA。柱上自能式 SF₆ 断路器也在迅速发展之中。

2.1.4 发展趋势

1. 63~500kV SF₆ 断路器

目前, 我国已能成批生产 63~500kV 瓷柱式 SF₆ 断路器, 其技术性能达到 80 年代末期国际水平。今后应在以下几方面进一步改进和提高。

(1) 进一步提高单断口工作电压水平, 力求单断口额定电压达到 330~500kV。随着我国

电力的迅速发展, 500kV 断路器需要量不断增大, 研 500kV 单断口断路器, 可以大大减少零部件数量, 提高运行可靠性。由此将使我国超高压断路器的制造水平上一个新台阶, 赶上世界先进水平。

(2) 开发和改进灭弧结构, 进一步提高开断能力。在 420kV 级以下, 利用电弧能量热膨胀开断, 是这一电压等级的发展方向。我国在 63kV、110kV 和 220kV 级也应研究自能灭弧式断路器, 提高断路器制造水平。

(3) 开发结构更简单、性能更可靠的新型操动机构。采用自能灭弧断路器大大减少了操动机构的操作功(为压气式操作功的 20%~50%), 这样可采用结构较简单的弹簧机构而取代结构复杂的液压结构, 有利于提高断路器的可靠性。

(4) 改进产品关键零部件的材料和制造工艺, 不断提高产品质量。

(5) 开发长期运行监测与诊断装置, 确保设备安全运行, 提高维护检修工作效率。

(6) 研究超低温(-50℃)条件下使用的 SF₆ 断路器。主要研究课题是防止 SF₆ 液化、采用混合灭弧介质以及保证在环境温度下能够对产品进行维护。

2. 10~35kV SF₆ 断路器

随着电力部门对用电安全、运行可靠性要求的提高, 10~35kV SF₆ 断路器必须从以下方面做出努力:

(1) 解决密封问题。SF₆ 断路器最大的问题是漏气, 因此解决好密封问题是至关重要的。首先是采用绝缘筒整体浇铸工艺, 以减少密封面; 另一方面要改进有关工艺, 采用先进工艺装备, 提高铸铝件和焊接件密封性能, 使漏气率控制在 1% 范围内。

(2) 大力发展自能灭弧式 SF₆ 断路器。自能灭弧式 SF₆ 断路器开断电流所需能量部分来自弧本身, 因此可大大减少操作功, 增大开断电流, 缩短燃弧时间, 提高其运行可靠性。为了提高小电流开断性能, 灭弧室结构还应尽量简化, 并要满足利用电弧能量提高膨胀室内气体压力, 使高压气体通过喷嘴沿轴向吹弧, 迅速冷却燃灭电弧。

(3) 向智能型机电一体化和小型化方向发展。采用智能信息处理系统进行故障前兆的论断和监视, 装设传感器以便对工作状态、工作温度进行监测、控制; 同时开发应用优化设计和先进工艺, 使产品向小型化方向发展。

2.2 罐式 SF₆ 断路器

2.2.1 概述

罐式 SF₆ 断路器的特点是重心低, 结构稳固, 抗震性能好, 可以加装电流互感器, 尤其是与隔离开关、接地开关、避雷器等组合成复合式开关设备, 更加节省占地面积。该类产品特别适用于多地震、严重污秽地区和山区变电站、城网供电所。但罐体耗用金属材料多, 制造难度也较大。

罐式 SF₆ 断路器在灭弧室结构上也有定开距和变开距之分, 混合压气式(压气与利用电弧自身能量相结合的灭弧方式)的研制成功, 为减小操作功, 开发低振动型断路器, 提高开断性能创造条件。

国外 550kV 63kA 单断口 SF₆ 断路器已通过各种验证试验, 在 60Hz 系统中开断 63kA, 开断近区故障可不使用并联电容器。

国内自行设计的 220kV 单断口罐式 SF₆ 断路器, 开断电流 50kA(断口间并联电容器); 从

国外引进技术制造的产品,额定电压 63~500kV,在 300kV 电压下,单断口开断 50kA 近区故障不用并联电容器。

2.2.2 国外发展概况

日本由于国土面积小,地震频繁发生,因而对发展罐式断路器和复合电器最感兴趣,1969~1975 年完成了 72~300kV (双断口)系列罐式断路器的研究,目前能成批生产 550kV、50/63kA、4000A 双断口罐式 SF₆ 断路器。东芝、三菱、日立等公司先后完成 550kV、63kA 单断口罐式 SF₆ 断路器的研制,以期代替 550kV 双断口断路器。

东芝公司 550kV 单断口罐式 SF₆ 断路器采用双向运动分闸机构,不仅驱动动触头,而且驱动一般断路器静止侧的触头,使之与动触头反方向运动,因而大大提高分闸速度。灭弧室采用混合灭弧方式,即在压气的基础上利用电弧能量加热 SF₆ 气体,增加压气室的压力,形成强烈的双向吹弧。

三菱公司 70~500kV SFMT 系列罐式断路器,结构设计先进,外型轻巧美观,内部元件性能稳定,运行可靠性高,产品市场覆盖率高。三菱还开发出 1100kV、8000A、50kA 双断口 GIS 用罐式 SF₆ 断路器,为百万伏级 GIS 的开发奠定了基础。

ABB 公司 PM 型 362kV 单断口及 550kV 双断口罐式 SF₆ 断路器开断电流均可达 50/63kA。该产品采用 SP 型灭弧室,灭弧室被封装在加强环氧管壳中;采用 AHMA 弹簧储能液压机构,兼备了液压操动机构和机械储能的功能。

法国 MG 公司 MHME-D 型和 GEC Alstom 型 550kV 罐式 SF₆ 断路器开断电流均可达 50kA。

2.2.3 国内发展概况

1972 年,西安高压开关厂研制成功我国第一台 110kV GIS 用双断口罐式 SF₆ 断路器,在 80 年代初期研制成功 220kV 40kA (单断口)罐式 SF₆ 断路器之后,于 80 年代中期,又与日本三菱电机株式会社合作生产,引进 110~500kV SFMT 系列罐式 SF₆ 断路器制造技术。该系列产品的灭弧室为压气式、变开距、双吹结构;单断口最高工作电压达到 300kV,在此电压下,开断 50kA 近区故障不并电容器;配用气动操动机构,结构简单,动作稳定可靠。

沈阳高压开关厂从日本日立制作所引进了 63~500kV OFPT (B) 系列罐式 SF₆ 断路器制造技术,该系列产品灭弧室采用单压、轴向同期双吹结构,利用喷口堵塞和电弧的热效应,提高吹弧气压。配用的操动机构有气动机构和液压机构两种,分别适用于 63~330kV 和 220~500kV 断路器。

平顶山高压开关厂自行设计的 LM-220 型单断口罐式断路器,耐震性能好,安装简便,它的研制成功填补了我国该类产品自行设计的空白。产品开断电流达 50kA (断口不并电容时开断电流为 40kA)。

上海华通开关厂自行设计的 220kV 罐式 SF₆ 断路器产品,每相有两个灭弧断口,每个断口上并联有均压电容器,灭弧室采用压气式、定开、双喷结构,具有较大的开断能力和较长的电寿命。

2.2.4 发展趋势

罐式 SF₆ 断路器和瓷柱式 SF₆ 断路器一样,要进一步提高单断口工作电压水平,如达到 330~550kV 单断口;提高额定电流到 8000A 和开断电流到 63~80kA。这就需要开发新型灭

弧室，如研制性能优越、熄弧能力强的混合压气式灭弧室。为此，需要采用各种新技术、新材料，如在聚四氟乙烯中添加微量无机填充剂的新喷嘴材料，以减少在短路开断时喷嘴的损伤；为适应 500kV 单断口灭弧室开断近区故障的需要，还需研制耐电性能更高的陶瓷并联电容器。

另一方面，还需要开发双向运动的分闸机构，特点是其驱动能量仅为单动型的 0.53 倍，由于可动部的绝对速度与以往其它型相同，在滑动部和密封部的长期可靠性方面不会发生新的问题。此外，还可减轻操作功，有效地减小机械持振动。

对于 GIS 用罐式断路器，还需要开展三相共筒化的研究，包括对三相电场、磁场、热场等的分布和干扰的分析。

罐式断路器与罐式隔离开关、接地开关等元件组合而形成的 SF₆ 复合电器，由于使用性能具有 GIS 的主要优点，与敞开式电器相比能大量节省开关站面积，与 GIS 相比能显著节省设备投资，因而很适合我国某些投资较紧张、地皮不宽裕的 330~500kV 电站使用。复合电器将是罐式断路器今后发展的一个方向。

第三节 高压真空断路器

3.1 概述

凡是利用“真空”作为绝缘和灭弧介质的开关统称真空开关设备，它包括真空断路器、真空接触器、真空负荷开关等。

真空开关设备的研究始于十九世纪，但直到 1926 年方由美国梭伦逊在实验室做为现代真空断路器的雏型。至于真空断路器产品，则迟至 50 年代中期才在美国问世，其开断电流不过 4kA，工作电压不过 20kV。现代真空断路器商用产品的额定电压可做到 168kV，额定开断电流可达到 100kA，额定电流可达到 4000A。10~36kV 级真空断路器在日本、德国、美国等许多国家早已形成完整的系列产品。

真空断路器以其具有一系列的优点而大量用于配电系统。虽然配电系统可用多油、少油、磁吹等断路器，但许多配电设备需设在严重污染地区而要求断路器不爆炸，低噪声，体积小，高可靠性，检修周期长。真空断路器独具这些优点，因而产量急剧增长，特别是 36kV 级以下电压等级中占主导地位。德国真空断路器的市场占有率 1993 年达 65%，英国约占 50%；日本已达 70%，12kV 级以下几乎全部采用真空开关设备。

3.2 国外主要真空断路器生产公司概况

目前国外生产真空断路器的 60 多家公司中主要有 12 家，它们是美国的 GE 公司和西屋公司；日本的东芝、日立、三菱、富士、明电舍公司；德国的西门子公司、AEG 和 CALOR-EMAG 公司；英国的 GEC 和 HAWKER SIDDELEG 公司。其中以东芝、三菱、明电舍、西门子、AEG、GE 和西屋 7 家公司的生产规模为最大，它们的共同特点是自行研制，生产真空灭弧室（灭弧室年产量总和大于 1000000 只）技术参数高，品种齐全，可靠性高。下面简单介绍几家真空断路器生产公司。

美国通用电气公司 (GE) 是最早研究和生产真空断路器的公司，50 年代初就成立了真空