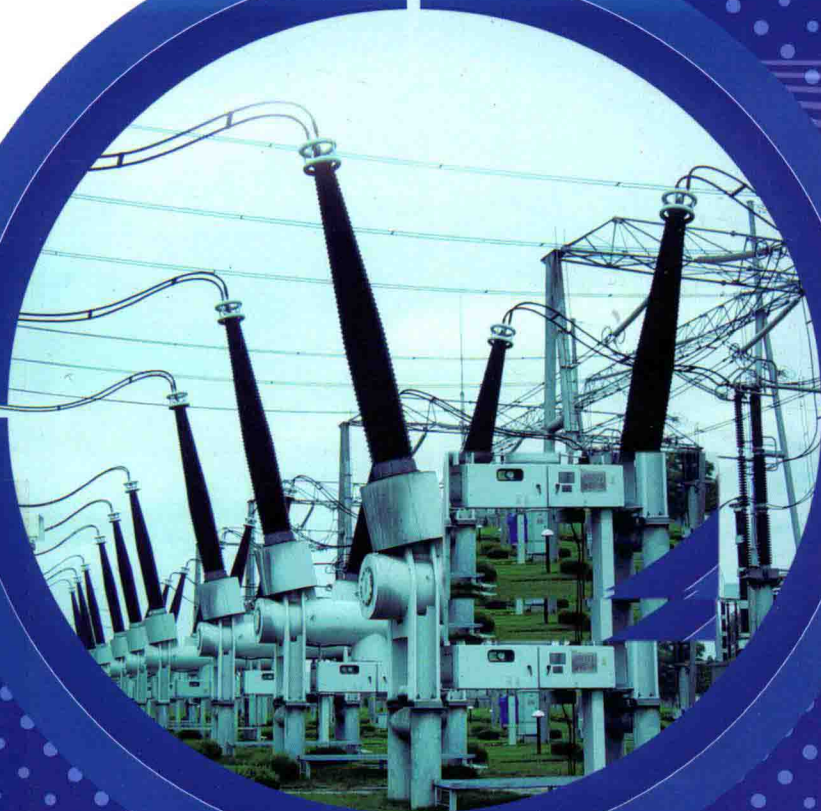


DIANQI SHEBEI YUNXING JI
WEIHU BAOYANG CONGSHU

电气设备运行及**维护保养**丛书

高压交流断路器

崔景春 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANQI SHEBEI YUNXING JI
WEIHU BAOYANG CONGSHU

电气设备运行及维护保养丛书

高压交流断路器

崔景春 等 编著



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

近几年,随着我国电力工业的快速发展,新技术、新设备、新材料、新工艺在电力系统中的应用层出不穷,相应地对电气设备的运行与维护保养工作也提出了新的要求。为了更好地服务读者,满足读者要求,中国电力出版社组织科研、电力用户、设备制造单位相关权威专家共同编写了《电气设备运行及维护保养丛书》,由10余个分册组成,涵盖了电力系统中的主要电气设备。

本书是《电气设备运行及维护保养丛书 高压交流断路器》分册。全书共分概述、高压交流断路器的基本结构和工作原理、高压交流断路器开断三相短路电流的物理过程、高压交流断路器的运行技术、高压交流断路器的试验、高压交流断路器的运行管理、高压交流断路器的维护保养和检修、高压交流断路器常见故障分析与处理8章。

本书可供电力行业从事科研、规划、设计、采购、安装调试、运行维护及相关管理工作的人员以及电气设备制造企业从事研发、生产、销售、售后服务等相关工作的人员使用,也可供大专院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压交流断路器 / 崔景春等编著. —北京:中国电力出版社, 2016.7

(电气设备运行及维护保养丛书)

ISBN 978-7-5123-9117-8

I. ①高… II. ①崔… III. ①高压断路器-运行②高压断路器-维修 IV. ①TM56

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060869 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.25印张 398千字

印数 0001—2500册 定价 63.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电气设备运行及维护保养丛书
高压交流断路器》

编 写 人 员

崔景春 宋 杲 刘兆林 王承玉 张 猛
赵伯楠 马炳烈 于 波 和彦淼



前言

近几年,随着我国电力工业的快速发展,新技术、新设备、新材料、新工艺在电力系统中的应用层出不穷,相应地对电气设备的运行与维护保养工作也提出了新的要求。为推广科学、高效、安全、经济的电气设备维护保养方法,以减少电气设备的维修量,提高电气设备的运行效率、延长电气设备使用寿命,更好地服务读者,满足读者的需求,中国电力出版社组织科研、电力用户、设备制造单位共同编写了《电气设备运行及维护保养丛书》。该丛书由《电力线路》《高压交流断路器》《气体绝缘金属封闭开关设备》《高压交流隔离开关和接地开关》《高压交流金属封闭开关设备(高压开关柜)》等10余个分册构成。

本丛书所有参与编写人员均为科研、生产运行、制造一线且工作经验丰富的技术专家,权威性高;内容紧密结合当前电气设备应用实际,实用性强;涉及输变电系统各电压等级、各类型电气设备,涵盖范围广。

本书是《电气设备运行及维护保养丛书 高压交流断路器》分册。全书共分概述、高压交流断路器的基本结构和工作原理、高压交流断路器开断三相短路电流的物理过程、高压交流断路器的运行技术、高压交流断路器的试验、高压交流断路器的运行管理、高压交流断路器的维护保养和检修、高压交流断路器常见故障分析与处理8章。本书第一章由崔景春、宋杲和张猛编写;第二章由宋杲、崔景春和王承玉编写;第三章由崔景春、王承玉编写;第四章由崔景春、刘兆林和赵伯楠编写;第五章由崔景春、赵伯楠和王承玉编写;第六章由刘兆林、宋杲和于波编写;第七章由刘兆林、张猛和马炳烈编写;第八章由宋杲、张猛、和彦淼编写。全书由崔景春审校统稿。

本书在编写过程中得到中国电力科学研究院、国家电网公司华东分部、西安西电开关电气有限公司、上海西电高压开关有限公司、清华大学徐国政教授和有关断路器生产厂家的大力支持和帮助,提供了十分难得的素材和相关资料,并提出了十分宝贵的建议和意见。在此,向为本书编写工作付出辛勤劳动和心血的所有人员表示衷心的感谢。

由于本书编写工作量大,时间仓促,书中难免存在不足或疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编者
2016年2月

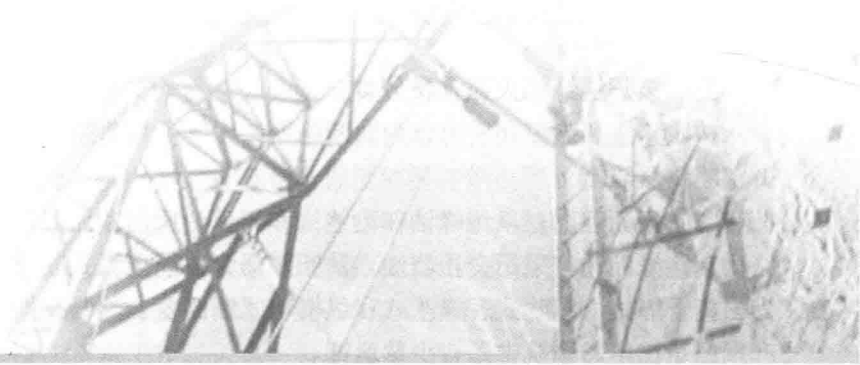


目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 高压交流断路器的分类	1
第二节 高压交流断路器的发展和应用	4
第二章 高压交流断路器的基本结构和工作原理	15
第一节 高压交流断路器的基本结构	15
第二节 高压交流断路器的灭弧原理	35
第三节 高压交流断路器的操动机构	45
第四节 高压交流断路器的智能化	55
第五节 高压交流断路器的技术参数	61
第三章 高压交流断路器开断三相短路电流的物理过程	70
第一节 中性点绝缘系统三相对称短路电流开断的物理过程	71
第二节 中性点接地系统三相对称短路电流开断的物理过程	74
第三节 高压交流断路器开断三相非对称短路电流的物理过程	79
第四节 断路器开断三相短路时首开极上的恢复电压	86
第四章 高压交流断路器的运行技术	96
第一节 高压交流断路器的使用条件	96
第二节 高压交流断路器的操作	105
第三节 高压交流断路器对安装基础的要求	109
第四节 高压交流断路器在运行中应具备的技术性能	109
第五章 高压交流断路器的试验	137
第一节 型式试验	137
第二节 出厂试验和交接试验	192
第六章 高压交流断路器的运行管理	197
第一节 高压交流断路器的全过程管理	197
第二节 运行巡视和操作	216
第三节 技术监督	220
第七章 高压交流断路器的维护保养和检修	228
第一节 检修原则	229

第二节	检修管理与质量控制	239
第三节	SF ₆ 断路器本体的维护保养和检修	242
第四节	真空断路器的维护保养和检修	251
第五节	少油断路器的维护保养和检修	253
第六节	高压断路器操动机构的维护保养和检修	256
第七节	辅助和控制回路的维护保养和检修	264
第八章	高压交流断路器常见故障分析与处理	268
第一节	缺陷与故障管理	268
第二节	拒动和误动故障分析与处理	271
第三节	开断与关合故障分析与处理	275
第四节	载流故障分析与处理	276
第五节	绝缘故障分析与处理	277
第六节	部件变形损坏与外力引发的故障分析	278
参考文献	280



概 述

高压交流断路器是能够关合、承载和开断正常回路条件下的负荷电流，同时也能够关合，并在规定的时间内承载和开断异常回路条件（如短路条件、失步条件）下的故障电流的机械开关装置。高压交流断路器担负着电力系统的负荷控制和故障保护的重任，在系统正常运行条件下，它负责负载线路和其他电气设备的投运或退出，并能长期承载负荷电流，直至额定的工作电流；当系统发生短路故障时，断路器要在继电保护装置的指令下，在极为暂短的时间内，如 30~40ms，将短路故障切除并将故障线段进行有效的隔离，从而保护系统正常运行。断路器最为重要的功能是对电力系统的保护作用，切除和隔离故障区段。高压断路器地处电力系统的咽喉要地，担负着电力系统运行安全的保卫工作，是电力系统的忠诚卫士。

第一节 高压交流断路器的分类

高压交流断路器通常按照额定电压、绝缘和灭弧介质、结构特点、使用环境、运行工况和操动机构形式等进行分类。高压交流断路器所配用的操动机构主要是按使用的操作能源进行分类的。

一、按照额定电压分类

按照断路器额定电压可分为特高压断路器、超高压断路器、高压断路器、中压断路器四类。

- (1) 特高压断路器。交流额定电压为 1100kV 及以上的断路器统称为特高压断路器。
- (2) 超高压断路器。交流额定电压为 363~800kV 的断路器统称为超高压断路器。
- (3) 高压断路器。交流额定电压为 72.5~252kV 的断路器统称为高压断路器。
- (4) 中压断路器。交流额定电压为 3.6~63kV 的断路器统称为中压断路器。

二、按照绝缘和灭弧介质分类

按照绝缘和灭弧介质可分为油断路器、压缩空气断路器、六氟化硫（SF₆）断路器、真空断路器等。

(1) 油断路器：以绝缘油作为绝缘和灭弧介质的断路器，分为多油断路器和少油断路器，绝缘油通常采用变压器油。油断路器为自能灭弧式断路器，按灭弧室结构又可分为去离子栅式、纵吹式、横吹式和纵横吹式断路器。油断路器目前已经基本没有厂家生产，但是在电力系统中还有少量运行。

(2) 压缩空气断路器：利用压缩空气作为绝缘和灭弧介质的断路器，属于它能灭弧式断路器，可分为双压式和单压式断路器。在 20 世纪中叶曾大量用于额定电压 110kV 及以上系统中，近年来已逐渐被 SF₆ 断路器所代替，目前在电力系统中已经没有运行的设备了。

(3) SF₆ 断路器：利用 SF₆ 气体作为绝缘介质和灭弧介质的断路器，它可分为双压式和单压式（压气式），双压式属于它能灭弧式断路器，单压式又可分为混合灭弧式即热膨胀式和它能灭弧式即压气式。目前，额定电压 110kV 及以上系统中已经全部采用 SF₆ 断路器，近年来逐渐向 35kV 甚至 10kV 发展。SF₆ 断路器具有通流能力和开断能力强、断口电压高、电寿命较长、无火灾危险等特点。

(4) 真空断路器：利用真空介质作为绝缘和灭弧介质的断路器。主要用于 10~35kV 电力系统，近年开始应用于更高电压等级。真空断路器具有行程短、电弧电压低、连续开合短路电流能力强、电寿命长等优点，适用于频繁操作的场所。

三、按照结构特点分类

(1) 按照相数可分为单相断路器和三相断路器。

(2) 按照外形结构可分为瓷柱式断路器和落地罐式断路器；

(3) 按照外壳结构方式可分为三极共箱式断路器（三极共用一个外壳）和三极分箱式断路器（各极有独立的外壳）。

四、按照使用环境分类

(1) 按照安装地点可分为户内、户外。

(2) 按照地区可分为普通型、高原型、防振型、防污型。

(3) 按照气象条件可分为一般地区、湿热型、严寒型。

五、按照运行工况分类

(1) 线路断路器：用以在正常工作时关合、开断以及发生短路时开断高压输电线路。用于架空输电线路时，应具有自动重合闸功能；用于电缆线路时，不需使用自动重合闸；用作联络断路器时，应能开断失步故障。

(2) 变压器断路器：用于变电站内变压器各侧的断路器。额定短路开断电流很大，应具有开合空载变压器的能力，不需使用快速自动重合闸。

(3) 母联断路器：用于变电站电气主接线为双母线接线方式时两条母线之间连接的断路器。主接线为双母线带旁母的情况下，母联断路器可作为旁路断路器联合使用。在母联接线方式中，母联断路器是两条母线电气联系的纽带，一般情况下母联断路器是合



闸状态，即母线并列运行；如母联断路器处于分闸状态，即两条母线分列运行。

(4) 分段断路器：连接两段母线的断路器，可将两段母线分段运行，也可实现单母线运行。变电站采用母线分段的供电方式，可更大程度的提高供电可靠性。

(5) 发电机断路器：用以将发电机接入电网，在故障时开断系统侧或发电机侧短路电流，保护发电机的安全运行。其特点是额定电压较低（36kV 及以下），额定电流很大（可达十几千安），额定短路开断电流极大（达 100~200kA），不需使用快速自动重合闸。

(6) 配电断路器：用以在正常工作时关合、开断及发生短路时开断高压配电线路。其特点是额定电压较低（35kV 以下），额定电流较小（1kA 以下），额定短路开断电流中等（20~31.5kA），要求有较小的开断时间和能进行自动重合闸，有时还要求具备开合电容器组（单个电容器组或多个并联电容器组）和电缆线路充电电流的能力。

(7) 按所控制的设备分类：这类断路器用于控制、保护经常需要启停的电力设备，一般需要进行分合闸的频繁操作，如电容器组、电抗器、电动机、电炉等。其特点是额定电压低，不需使用快速自动重合闸，但希望有较高的电寿命。

六、按照操动机构分类

断路器所配用操动机构可分为弹簧、液压、气动、电磁、永磁等五种，一台断路器根据需要可以配用一种或两种不同形式的操动机构。

(1) 电磁操动机构：由一个电磁线圈和铁芯，配上分闸弹簧和必要的机械锁扣系统组成。其优点是结构简单、零件数少、可靠性高、制造成本低，其缺点是合闸线圈消耗的功率太大，需要配备大功率直流电源，加上电磁机构结构笨重，动作时间长，目前仅在 40.5kV 及以下油断路器上使用。

(2) 永磁操动机构：利用永磁材料的剩磁产生保持力，使触头保持在闭合或分断状态；其优势在于结构简单、零件数量少，工作时主要运动部件只有一个，无需机械锁扣和脱扣装置。永磁机构分为两种：单稳态永磁机构和双稳态永磁机构。永磁机构尚需运行考验，需解决好储能电容器的寿命问题、永磁铁的保持力问题及电子元器件的可靠性等问题。目前用量还不是很大。

(3) 弹簧操动机构：由弹簧存储断路器分、合闸所需的能量，并通过凸轮机构和四连杆机构带动触头动作，其分合闸速度不受电源电压波动的影响，稳定性高。储能弹簧应既可以手动储能也可以电动储能。弹簧操动机构为硬机械传动系统，要求机械部件强度高、加工精度高、零部件之间配合精确，因此，零件的加工精度、材质以及装配精度都直接影响机构的可靠性。目前，弹簧操动机构制造技术已经基本成熟，大量应用在 252kV 及以下断路器，部分 550kV 断路器也配用了弹簧操动机构。

(4) 液压操动机构：以高压液压油作为动力传递介质，由高压油送入工作缸两侧时产生的压力差实现断路器分合闸的操动机构。液压油的储能可利用压缩氮气储压，也可利用弹簧储压。利用弹簧储压的操动机构通常又称为液压弹簧操动机构。其通常由储能单元（如储气筒）、控制单元（如阀系统）、操作系统（如工作缸）、辅助元件（如油箱、压力表）和电气元件（如分合闸线圈）等五部分组成。液压操动机构具有操作功大、反应速度快，噪声小等特点；液压操动结构为柔性机械传动系统，对密封性能要求高，对

控制单元的阀系统加工工艺要求很高，使用中常会出现机构渗漏油现象。目前，主要应用在 252kV 及以上的 SF₆ 断路器上。

(5) 气动操动机构：以压缩空气作为动力传递介质和控制信号的机构。具有操作功大、动作快、操作平稳、直流电源功率小等特点。但其结构笨重，常会出现管路结冰，维护检修工作量大，逐渐被液压操动机构和弹簧操动机构代替，目前还有少量应用于 363kV 及以上的断路器上。

第二节 高压交流断路器的发展和应用

电力是所有工业发展的动力。随着人类社会的不断进步，经济的不断发展，生活水平的不断改善，社会的用电量必然会不断增长。为此，电力系统的发电量和变电容量，电网的传输功率、输送电压和输电距离就要不断地提高，电力工业的发展必须满足工业发展和社会进步的需要。高压交流断路器是电力系统的控制和保护设备，是电力工业发展的重要组成部分，高压交流断路器的发展必须适应电力系统向高电压、大容量、远距离输电发展的需要。高压交流断路器的发展主要表现在额定电流、额定电压、额定短路开断能力的不断提高，表现在绝缘介质、灭弧介质、灭弧原理和操动机构等应用技术的不断改进和发展，以及可靠性的提高。

高压交流断路器主要经历了多油断路器、少油断路器、压缩空气断路器、SF₆ 断路器和真空断路器的发展历程，其中包含了断路器的绝缘介质、灭弧介质、灭弧原理和操动机构等应用技术的发展 and 变迁。

一、多油断路器的发展和应用

多油断路器是电力系统使用最早也是最简单和最原始的断路器。由于其用油量多，所以称之为多油断路器，如一台 DW1-35 型断路器三相油重 300kg，一台 DW2-35 型断路器三相油重 800kg，一台 DW8-35 型断路器三相油重 560kg。

上述三种户外多油断路器是我国 35kV 系统曾经大量使用的断路器，其中 DW1-35 是仿苏联生产的 BMД-35 型多油断路器，铭牌额定开断容量为 400MVA，即 6.6kA；DW2-35 是仿苏联生产的 МКП-35 型多油断路器，铭牌额定开断容量为 750MVA 和 1000MVA 两种；DW8-35 是原西安高压开关厂自行研制的户外多油断路器，额定开断容量为 1000MVA 和 2000MVA。另外，原沈阳高压开关厂还生产过 DW3- $\frac{110}{220}$ 型多油断路器，是仿苏联生产的 МКП- $\frac{110}{220}$ 型 110kV 和 220kV 多油断路器。110kV DW3-110 型断路器的额定开断容量号称 3500MVA，实际开断能力大约只有 2000MVA，经增容改造后可达到 3500MVA。根据 1977 年的统计，DW3-110 型多油断路器在电力系统中运行有 1700 余台，占 110kV 断路器装用总量的 1/3。

多油断路器在 20 世纪 80 年代之前是我国电力系统使用量最多的开关设备，尤其是 35kV 系统基本上由多油断路器独占。但是，由于受结构形式的限制，短路开断能力低，

用油量大且有火灾危险等原因,难于满足电力系统的发展需要,因此自 20 世纪 80 年代中开始,多油断路器逐渐被真空断路器和 SF₆ 断路器所代替。尽管如此,多油断路器的发展和应用,为少油断路器和气体断路器的发展奠定了基础。

二、少油断路器的发展和应用

少油断路器是在多油断路器的基础上发展起来的仍然以变压器油作为绝缘介质和灭弧介质的油断路器,它与多油断路器相比用油量大大减少,断路器的体积和重量也大大减小。110kV 及以上少油断路器大都使用液压机构和弹簧机构,只有 SW3-110 使用电磁机构。110kV 及以下少油断路器为三相机械联动,220kV 及以上为分相操作三相电气联动。除 SW7 型断路器外,110kV 少油断路器均为单柱双断口,220kV 为双柱四个断口,SW7-110 为单柱单断口,SW7-220 为单柱双断口。

高压少油断路器是 SF₆ 断路器大量推广使用之前电力系统使用量最大的断路器,其短路开断能力和额定电压随着电力系统的发展而不断提高,尤其是 20 世纪 60 年代后,由于采用了环氧树脂和三聚氰胺材料制成的灭弧室,以及增加了改善开断小电流性能的压油活塞装置,高压少油断路器的制造技术和开断性能得到了极大的提升,相继研发出超高压、大容量的新产品,满足了电力系统向超高压、大容量、远距离输变电发展的需要。20 世纪 70 年代是高压少油断路器的黄金时代,在 420kV 及以下系统中大量使用,并有 550kV 和 750kV 产品的使用。瑞典 1952 年投运的 420kV 线路、美国 1956 年投运的 345kV 线路、加拿大 1965 年投运的 735kV 线路、巴基斯坦的 500kV 线路都使用少油断路器。在我国的电力系统中,除 35kV 系统使用一部分户外高压多油断路器外,在 20 世纪 80 年代之前基本是少油断路器的世界,最高电压达到 363kV。

虽然少油断路器在 363kV 及以上系统中也有应用,但由于油介质的绝缘强度低、单断口电压水平低、超高压串联断口数量多、占地面积大、开断小电流性能不理想,尤其是采用变压器油介质检修周期短、维护工作量大且在开断过程中伴有高压油气排出,既有火灾危险也威胁到其他设备的安全等,使得高压少油断路器很难适应超高压系统的运行要求。因此,在超高压系统中,特别是 500kV 系统中,高压少油断路器最初被压缩空气断路器所取代,而当 SF₆ 断路器向超高压系统发展后,少油和压缩空气断路器则完全退出了超高压领域。自 20 世纪 90 年代初开始,我国电力系统中少油断路器逐渐被 SF₆ 断路器和真空断路器所取代,至 90 年代末,油断路器基本退出了历史舞台。高压少油断路器的发展和应用是高压断路器发展的重要阶段,其自能式灭弧原理和液压操动机构的制造技术为 SF₆ 断路器的发展打下了坚实的基础。

三、压缩空气断路器的发展和应用

压缩空气断路器是以具有一定压力的压缩空气气体作为绝缘介质和灭弧介质的高压断路器。压缩空气断路器分为单压式和双压式两种,双压式早于单压式。双压式是将断路器的介质压力分为高压和低压,低压压缩空气作为断路器维持正常运行时的对地绝缘,一般为 3 个大气压;高压压缩空气则作为断路器灭弧室断口间的绝缘和进行开合时的灭弧介质,它储存在落地的气罐中,并用可以耐受高压力的环氧玻璃钢筒将高压气体送至中间法兰和灭弧室内。高压压缩空气的压力视其开断能力而定,一般在 20 个大气压以

上。单压式断路器是将对地绝缘、断口绝缘和灭弧介质合而为一，也称常充气式压缩空气断路器，20个大气压以上的压缩空气从储气罐通过高强度瓷套直通灭弧室，分合闸时触头分合的同时启动灭弧室排气阀进行吹弧。单压式压缩空气断路器的阀系统比双压式简单，整体结构也简单，但是它要求支持瓷套和灭弧室瓷套要能耐受20个大气压以上的高压力，使得瓷套的制造难度增大。

压缩空气断路器的灭弧室断口数量随着电压等级的升高而逐渐增多，126kV为单柱双断口、252kV为双柱四断口、363kV和380kV为三柱六断口。压缩空气断路器所用压缩空气由空气压缩机及储气罐系统生成，气站的规模取决于变电站空气断路器的装用量。自然界的空气经干燥处理和过滤后由空气压缩机加压至高压储气罐，其初始压力一般为使用压力的3~4倍，经降压后送至断路器以此控制压缩空气的湿度，避免因温差变化出现凝露和水分析出，压力比越大则降压后的压缩空气的相对湿度就越小。气站将高压压缩空气降压至使用压力后由储气罐储存，并经管道系统输送到断路器的储气罐和断路器的内部，同时送至气动操动控制系统供断路器的分合闸操作作用。

压缩空气断路器为它能式灭弧原理，只要气体压力值一经确定，其开断能力就基本确定了，因其吹弧能力恒定，所以与所开断的电流大小基本无关，其最大开断能力只与额定压缩空气压力大小有关。因此，压缩空气断路器开断小电流（如空载变压器的励磁电流或并联电抗器的电感电流）时，就容易发生截流现象，即电流尚未过零时就被熄灭，从而导致多次重击穿和截流过电压，对变压器、电抗器和断路器本身造成危害。我国500kV锦州—辽阳试验线段在1980年进行系统调试时，曾用KW4-550切合并联电抗器，但断路器发生爆炸。为此，压缩空气断路器一般在252kV及以上时均装设分合闸电阻，主要是为了降低截流过电压，另一方面就是改善断路器切合近区故障的开断能力，因为压缩空气断路器对于近区故障的极陡锯齿波恢复电压比较敏感。压缩空气断路器进行分、合闸操作时要有20个大气压以上的压缩空气从灭弧室喷口处排入大气，会发出震耳欲聋的噪声，所以压缩空气断路器在排气口内必须装设消音装置，使其噪声尽量降低，即使装有消音器，其分合闸时的噪声仍然很大。为此，变电站或发电厂的运行维护人员应该尽量远离压缩空气断路器的运行场地，避免由于操作而产生的突发噪声引起意外。

压缩空气断路器自20世纪40年代问世以来，一直伴随着电力系统的发展而处于先锋地位，为电力系统向新的更高电压等级和更大短路电流开断能力的发展，以最短的时间，满足了电力系统的急需。但是，鉴于压缩空气断路器自身结构上存在的缺点，如必须配备一套庞大、复杂而又难于维护的空压系统和压力容器，结构复杂且要求加工精度高，操作时的强大噪声，必须装设分合闸并联电阻，等等，使压缩空气断路器只能起“先锋”的作用，满足系统的急需。一旦采用其他介质的断路器达到与它相同的技术性能，压缩空气断路器就会慢慢地失去优势，最后被取而代之。压缩空气断路器是最早可以满足电力系统向更高电压等级和更大短路开断能力发展的断路器，20世纪50年代，欧洲380kV和420kV输电系统最早使用的就是压缩空气断路器，图1-1为420kV十断口压缩空气断路器，苏联第一条500、750kV和1100kV输电线路开始使用的也是压缩空气断路器，瑞典1952年投运的420kV输电线路，美国345、500kV和765kV线路，阿根廷500kV

线路最早使用的也都是压缩空气断路器。我国第一条 330kV 线路和锦延 500kV 线路也是使用的压缩空气断路器。但是，现在压缩空气断路器已经完全退出了历史舞台，被 SF₆ 气体断路器所取代。

四、SF₆ 断路器的发展和应用

SF₆ 气体早在 1900 年就被发现，1940 年后开始用于绝缘介质的研究，1953 年美国第一次将 SF₆ 气体用于 115kV 的负荷开关中，并取得令人满意的绝缘性能和灭弧性能，这一研究成果促进了将其用作高压断路器的绝缘和灭弧介质的研发工作。1958 年在压缩空气断路器结构原理的启发下，双压式 SF₆ 断路器研制成功。20 世纪 60 年代初，SF₆ 气体工业化生产的研发取得成功，使 SF₆ 气体的批量生产成为可能，这进一步促进了 SF₆ 断路器发展并开始被电力用户所认知。图 1-2 为双压式 SF₆ 断路器的结构示意图。断路器中的 SF₆ 气体分为高压区和低压区，高压 SF₆ 气体压力约 14 个大气压、低压 SF₆ 气体压力约 2 个大气压，SF₆ 气体不但作为绝缘和灭弧介质，而且作为断路器的分合闸操作动力源。当 SF₆ 断路器接到分闸指令后，分闸电磁阀打开，高压储气罐内的 12 个大气压的 SF₆ 气体进入灭弧室的下端并推动触头的活塞向上运动，触头分闸过程中，由高压气体吹弧去游离使电弧熄灭，高压气体吹弧后通过静触头内的管路进入低压储气罐内。低压储气罐由于高压气体的进入使其压力升高，此时通过一个压力开关起动物体压缩机，使低压罐内的气体通过过滤器加压送回高压储气罐，使低压气体仍维持为 2 个大气压，断路器则恢复到双压式系统的正常状态。断路器合闸时，打开合闸电磁阀，使高压气体进入动触头上部活塞推动动触头合闸。双压式 SF₆ 断路器的结构各式各样，有敞开式的，也有落地罐式的，高压气体压力一般为 14~18 个大气压，低压气体为 2~4 个大气压，额定电压曾经达到 765kV。由于双压式 SF₆ 断路器的设计复杂，需要的辅助设备多，如气体压缩机、储气罐，尤其是高压气体的液化问题难于解决。为此，双压式 SF₆ 断路器一般都要装设电热装置，因为 16 个大气压的 SF₆ 气体，在 10℃ 左右就会液化，这使它的使用环境受到太大的限制。为了解决双压式 SF₆ 断路器的不足，20 世纪 60 年代

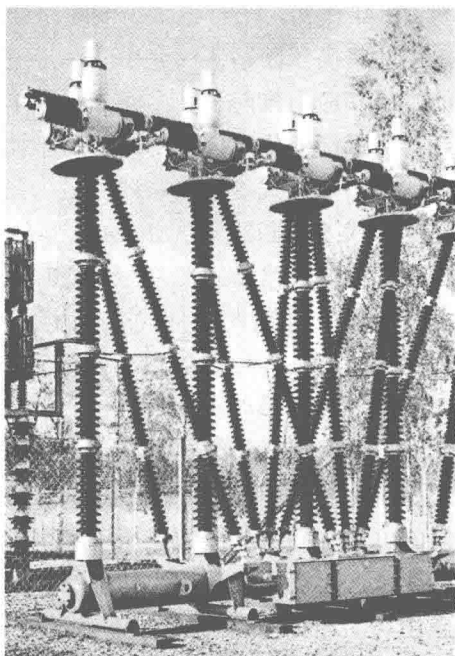


图 1-1 420kV 十断口压缩空气断路器

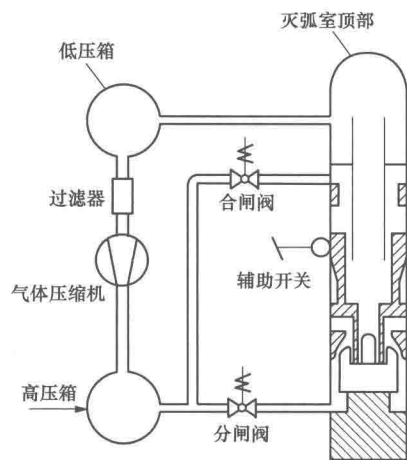


图 1-2 33kV 双压式 SF₆ 断路器结构示意图

图 1-2 为双压式 SF₆ 断路器的结构示意图。断路器中的 SF₆ 气体分为高压区和低压区，高压 SF₆ 气体压力约 14 个大气压、低压 SF₆ 气体压力约 2 个大气压，SF₆ 气体不但作为绝缘和灭弧介质，而且作为断路器的分合闸操作动力源。当 SF₆ 断路器接到分闸指令后，分闸电磁阀打开，高压储气罐内的 12 个大气压的 SF₆ 气体进入灭弧室的下端并推动触头的活塞向上运动，触头分闸过程中，由高压气体吹弧去游离使电弧熄灭，高压气体吹弧后通过静触头内的管路进入低压储气罐内。低压储气罐由于高压气体的进入使其压力升高，此时通过一个压力开关起动物体压缩机，使低压罐内的气体通过过滤器加压送回高压储气罐，使低压气体仍维持为 2 个大气压，断路器则恢复到双压式系统的正常状态。断路器合闸时，打开合闸电磁阀，使高压气体进入动触头上部活塞推动动触头合闸。双压式 SF₆ 断路器的结构各式各样，有敞开式的，也有落地罐式的，高压气体压力一般为 14~18 个大气压，低压气体为 2~4 个大气压，额定电压曾经达到 765kV。由于双压式 SF₆ 断路器的设计复杂，需要的辅助设备多，如气体压缩机、储气罐，尤其是高压气体的液化问题难于解决。为此，双压式 SF₆ 断路器一般都要装设电热装置，因为 16 个大气压的 SF₆ 气体，在 10℃ 左右就会液化，这使它的使用环境受到太大的限制。为了解决双压式 SF₆ 断路器的不足，20 世纪 60 年代

末和 70 年代初，一种模仿少油断路器结构原理的单压式或者压气式 SF_6 断路器研制成功，由此将高压断路器的介质变革推进到设计原理和灭弧原理的变革阶段，将 SF_6 断路器的发展和应用推向了一个新高潮。单压式 SF_6 断路器不但很快取代了双压式 SF_6 断路器，并且逐渐取代了传统的油断路器和压缩空气断路器。

如果将双压式 SF_6 断路器称之为第一代 SF_6 断路器，则单压式或压气式 SF_6 断路器就是第二代 SF_6 断路器。 SF_6 断路器分为瓷柱式断路器，或称敞开式断路器（图 1-3 为 550kV 瓷柱式断路器）和落地罐式断路器（图 1-4 和图 1-5 分别为 252kV 和 800kV 落地罐式断路器）。不管是瓷柱式或是落地罐式，它们的灭弧原理是相同的，而且只使用一种压力的 SF_6 气体。正常运行时， SF_6 气体作为带电导体的对地、断口绝缘；开断时，动触头在分闸过程中带动压气装置的压气缸同时运动，在极短的时间内，将压气缸内的 SF_6 气体通过压气活塞压缩至十几个大气压的压力，当灭弧室的喷口打开时将电弧熄灭。这种依靠压缩装置产生高压 SF_6 气流进行灭弧的断路器，必须在 10ms 左右的时间内使气缸内的气体达到 15 个大气压以上以确保能熄灭电弧，同时还要保证动触头达到一定的分闸速度，因此必须采用大功率的操动机构，如气动机构或液压机构。要想获得足够大的操作功，就必须将气动机构或液压机构的使用压力提高，这不但使整个操动机构和机械传动系统遭受强烈的机械应力，而且其密封系统也会不断出现漏油和漏气问题，从而使断路器的运行可靠性，特别是机械可靠性受到严重的威胁。

压气式 SF_6 断路器虽然结构型式类似于少油断路器，但是它的灭弧原理仍然是类似于压缩空气断路器的它能式灭弧原理。提高压气式 SF_6 断路器机械可靠性的出路是既要保证其具有一定的开断能力，又要使其需要的操作功有大幅度减小。其方法就是要利用少油断路器自能式的灭弧原理，充分利用电弧自身的能量，将灭弧室内的 SF_6 气体增压到灭弧所需的压力，从而减小机械操作功。这种 SF_6 断路器就是我们所说的第三代自能式 SF_6 断路器。自能式 SF_6 断路器的最大优点是减小了分闸时所需的操作功，所以可以

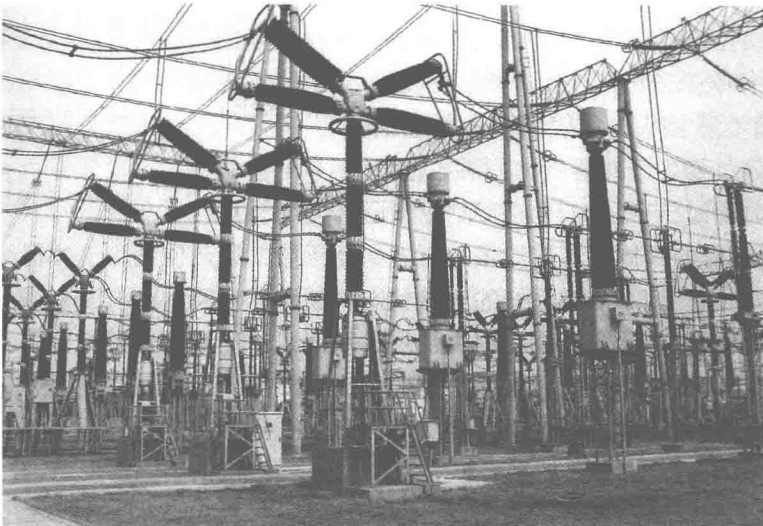


图 1-3 550kV 瓷柱式断路器

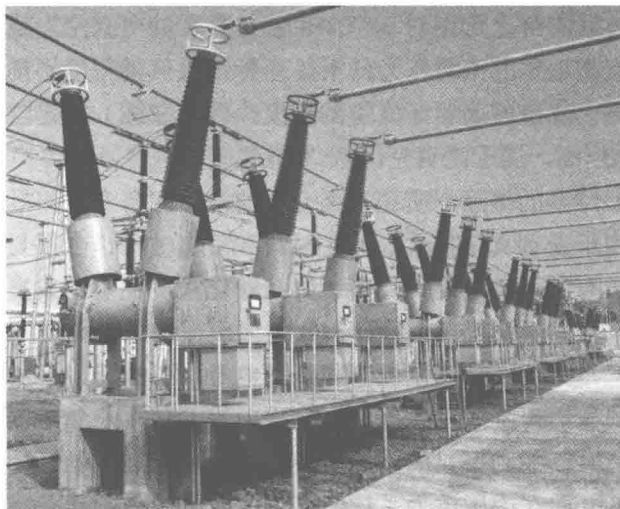


图 1-4 252kV 落地罐式断路器

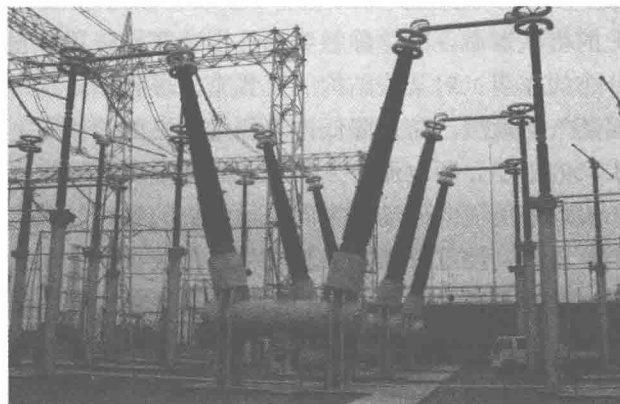


图 1-5 800kV 落地罐式断路器

配用运行部门喜欢使用的不存在漏油或漏气的弹簧操动机构。这种配用弹簧操动机构的自能式断路器在 20 世纪 90 年代一出现就受到运行部门的青睐，迅速得到广泛的使用。但是自能式断路器也有一定的局限性，首先它与少油断路器一样，存在开断小电容电流或小电感电流时由于电弧能量不足而灭弧困难的问题，因此自能式 SF_6 断路器还要保留一个低功率的压气装置以弥补开断小电流的不足，所以自能式实际上是一个混合式灭弧原理；另外一个问题是弹簧操动机构的输出功率要比气动机构或液压机构低许多，因此当超高压和特高压要求的开断能力很高时，它将很难满足系统的需要，比如开断电流要求 50kA 以上时，目前还需使用压气式断路器。压气式和自能式 SF_6 断路器的应用将会长期并存。

五、真空断路器的发展和应用

真空断路器是指利用真空作为灭弧室的绝缘介质和灭弧介质的断路器。所谓真空其实是一种气体的状态，凡是绝对压力低于 1 个标准大气压的气体都称之为真空状态，绝

对压力等于零的气体状态称之为绝对真空，也就是真正的“真空”或“理想”的真空。因此，气体的真空状态根据其绝对压力低于 1 个标准大气的程度不同而不同，绝对压力越低则其真空度越高，真空度表示了真空的程度，以帕 (Pa) 为单位。真空灭弧室的真空度一般为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{Pa}$ ，属于高真空区域。

利用真空作为断路器的绝缘介质和灭弧介质的设想和研究工作早在 20 世纪 30 年代就已经开始，但是由于受到真空技术、触头材料和冶金技术、金属封接技术和外壳制造技术的限制，始终没有明显的进展。随着世界工业化程度的不断发展，尤其是电子工业和冶金技术的发展，真空断路器在 20 世纪 60 年代中开始进入实用阶段，70 年代开始被电力部门所认知，但是只使用在频繁操作和开断电流不大的场合。20 世纪 80 年代初，日本东芝和日立公司先后研制成功纵磁场真空灭弧室，使真空断路器的灭弧机理和开断特性获得重大突破，开断能力不足的问题得到解决，真空断路器开始进入大发展和推广使用的黄金时代，并开始在中压电力系统中广泛使用。

真空断路器的核心部件是真空灭弧室，其结构很像一个大型的真空电子管，外壳由玻璃或陶瓷制成。动触头运动时的密封靠波纹管。波纹管在允许的弹性变形范围内伸缩，要求有高达万次以上的机械寿命。动、静触头的外围装有屏蔽罩，它起着吸收、冷凝金属蒸汽，均匀电场分布的作用。对某些结构的灭弧室，屏蔽罩还起到保护玻璃或陶瓷外壳的内表面不受金属蒸汽的喷溅，防止降低内表面绝缘性能的作用。真空灭弧室的触头均为对接式平板触头，为了使开断电流，尤其是大短路电流能够熄灭并获得尽量快的介质强度恢复速度，一般均采用横向磁场或纵向磁场结构的触头，触头材料目前多为铜铬合金。为了防止金属液滴溅到波纹管表面引起烧损，在波纹管上也装有屏蔽罩，它同时也起均匀电场的作用。动触头通过动导电杆和波纹管实现分合闸运动，波纹管是真空灭弧室外壳的一部分，而且要在分闸操作中发生在触头行程范围内的伸缩变形。波纹管的一面是真空，另一面是大气，其内外有一个大气压的压差，这也就形成了动静触头合闸状态下的自闭力。图 1-6 分别是玻璃外壳和陶瓷外壳真空灭弧室。

20 世纪 80 年代利用横向和轴向磁场对真空电弧的控制理论的研究取得突破，为大容量的真空断路器的发展奠定了坚实基础。随着真空断路器，尤其是真空灭弧室的制造技术日趋成熟，真空断路器进入了大规模生产阶段，制造质量、工艺水平和运行可靠性不断提高，使用范围日益扩大。目前在世界范围内，真空断路器在中压系统已占绝对主导地位。

我国真空断路器的研制工作始于 20 世纪 60 年代中期，由于基础工业薄弱，虽经不断改进，但无论是真空灭弧室还是真空断路器的制造水平和世界先进水平均有很大的差距，也很难满足电力系统的运行要求。为了改变我国真空断路器和真空灭弧室的生产水平，原机械工业部和电子工业部决定引进西门子公司

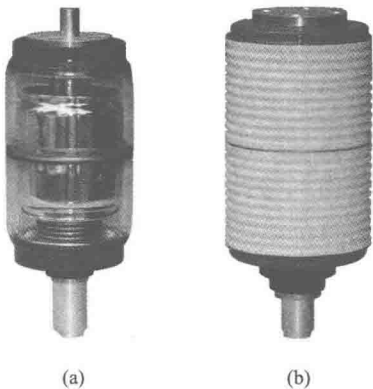


图 1-6 真空灭弧室
(a) 玻璃外壳；(b) 陶瓷外壳