

SF₆检测与 电气设备故障诊断

王宇 周永言 李丽 黎晓淀 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

SF₆检测与 电气设备故障诊断

王 宇 周永言 李 丽 黎晓淀 编著
陈 敏 樊小鹏 李华亮 张 凯



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以介绍六氟化硫(SF₆)气体检测技术以及利用SF₆气体检测技术对电气设备进行故障诊断为主要内容,还包括检测技术人员必需具备的有关基础知识,即SF₆在电气设备中的运用、SF₆气体的性质,此外,阐述了SF₆气体的质量监督和管理,基于化学分析的SF₆电气设备的运行与维护等内容。全书内容丰富、论述精炼、深入浅出。

本书可供从事SF₆电气设备运行、试验及检修工作的技术人员、管理人员自学和培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

SF₆ 检测与电气设备故障诊断/王宇等编著. —北京:中国电力出版社,2017.6

ISBN 978-7-5198-0312-4

I. ①S… II. ①王… III. ①六氟化硫气体-检测②六氟化硫气体-应用-电气设备-故障检测
IV. ①TM561.3②TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 012925 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:郑艳蓉 (010-63412379) 杨帆 (010-63412747)

责任校对:太兴华

装帧设计:赵姗杉

责任印制:蔺义舟

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017 年 6 月第一版

印 次:2017 年 6 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:17

字 数:415 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:55.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前 言

SF₆ 作为新一代的电气绝缘介质,具有优异的绝缘和灭弧性能,已被应用在电气设备的各个领域,这种绝缘介质在高压电器中的应用,推动了电网技术的进步,也加快了电力建设的发展速度。

随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高,SF₆ 电气设备大量投入运行,出现了一些问题,发生过一些事故事件,获得了一定的经验教训。早期,人们认为组合电器 GIS 是一种免维护的设备,但实际运行经验表明,SF₆ 电气设备同样需要进行科学有效的维护,完善和加强对 SF₆ 气体绝缘设备的技术监督,能够有效保障 SF₆ 电气设备安全稳定运行。为此,作者收集了大量相关资料,力图将多年来电力系统对 SF₆ 电气设备在运行、监督、管理、气体质量分析、故障判断方面所做的大量工作、积累的实践经验和研究成果加以总结,奉献给读者。

本书第 1 章由张凯编著,第 2 章由李丽编著,第 3 章由樊晓鹏、陈敏编著,第 4 章由王宇编著,第 5 章由周永言、黎晓淀编著,第 6 章由李华亮编著,全书由王宇统稿校核。在本书编写过程中,曾得到有关同志的支持与帮助,在此一并表示感谢。

由于编著人员水平有限,加之时间仓促,书中难免出现错误,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 3 月 2 日



目 录

前言

第 1 章	SF ₆ 在电气设备中的运用	1
第 1 节	概述	1
第 2 节	SF ₆ 断路器	1
第 3 节	SF ₆ 互感器	4
第 4 节	SF ₆ 避雷器	6
第 5 节	SF ₆ 封闭式组合电器	6
第 6 节	SF ₆ 变压器	9
第 7 节	其他设备	11
第 2 章	SF ₆ 气体的性质	13
第 1 节	SF ₆ 气体的基本特性	13
第 2 节	SF ₆ 气体的状态参数	14
第 3 节	SF ₆ 气体的绝缘特性	19
第 4 节	各种因素对 SF ₆ 气体击穿电压的影响	23
第 5 节	SF ₆ 气体中沿固体介质表面的放电	26
第 6 节	SF ₆ 气体的灭弧性能	29
第 3 章	SF ₆ 气体的质量监督和管理	33
第 1 节	SF ₆ 气体的制备	33
第 2 节	SF ₆ 新气的质量标准	35
第 3 节	运行中 SF ₆ 气体中水分的管理	52
第 4 节	运行中 SF ₆ 气体纯度的管理	68
第 5 节	电气设备中的吸附剂	73
第 6 节	SF ₆ 气体密度的检测	81
第 7 节	SF ₆ 电气设备的检漏	87
第 8 节	SF ₆ 气体分解产物、毒性及其运用	97
第 4 章	SF ₆ 特征分解产物分析技术	107
第 1 节	SF ₆ 的常见分解产物	107
第 2 节	SF ₆ 分解产物的常见分析方法	108

第3节	气体传感器法	110
第4节	检测管检测法	122
第5节	气相色谱法	125
第6节	气相色谱质谱联用法	145
第7节	红外光谱法	152

第5章 基于SF₆特征分解产物分析的电气设备故障判断方法及其应用 ... 159

第1节	基于SF ₆ 特征分解产物分析的电气设备故障判断方法	159
第2节	GIS(含HGIS)的故障、缺陷案例	167
第3节	互感器故障缺陷案例	209
第4节	断路器的故障、缺陷案例	213

第6章 基于化学分析的SF₆电气设备的运行与维护 ... 227

第1节	SF ₆ 电气设备运行情况	227
第2节	SF ₆ 电气设备的运行巡视	231
第3节	SF ₆ 电气设备的运行操作	238
第4节	SF ₆ 电气设备的维护	239
第5节	SF ₆ 电气设备的检修	248
第6节	SF ₆ 电气设备运行人员的安全防护	256

参考文献	265
------	-----

SF₆在电气设备中的运用

第 1 节 概 述

SF₆ 作为新一代的电气绝缘介质,已被应用在电气设备的各个领域。世界上先进国家的高压电器设备基本采用 SF₆ 气体作为绝缘介质, SF₆ 气体无论在绝缘水平和灭弧能力上都远远超过传统的绝缘油。特别是电网向超高压技术的发展,更为 SF₆ 气体的应用提供了广阔的前景。

电气设备传统的绝缘介质是绝缘油。20 世纪 80 年代初,高压电器几乎都是用绝缘油作为绝缘介质,绝缘油具有较高的电气强度和绝缘能力,其比热比空气大一倍,且液态受热后具有对流特性,使它在电气设备中既可作为绝缘介质又可作为冷却介质。油断路器开断电流时,绝缘油能被电弧能量所分解,形成高温气体,当达到一定压力时,在灭弧室内形成气流使电弧吹灭,同时使断口间形成良好的绝缘特性,保证大电流的顺利开断。但绝缘油灭弧后形成游离碳使绝缘性能下降,绝缘油最大的缺点是可燃性,电气设备一旦发生故障短路,都有可能使绝缘油引燃形成火灾。因此,人们寻找一种不燃的绝缘介质和灭弧介质,使电气设备具有不燃、体积小、运行可靠及安全的优点。

1900 年法国 Moisson 和 Lebeau 首次用元素硫和氟气直接反应合成出 SF₆ 气体并对其物理化学性质进行了初步研究。1937 年法国首先将 SF₆ 气体应用于高压绝缘电气设备,1951 年美国 Westing-House 公司获得 SF₆ 气体断路器的生产专利。西德在此期间也开始了该领域的研究工作,并于 1964 年推出第一台 220kV SF₆ 断路器。进入 20 世纪 60 年代, SF₆ 气体电器绝缘设备的优越性已为世人所公认,各司相继研制开发出多种类型和等级的 SF₆ 气体绝缘设备,开始在断路器和组合电器中应用,近年来扩大应用变压器和电缆等。我国 60 年代开始研制 SF₆ 气体电气设备,各种等级型号的国产和进口设备陆续投入运行。进入 80 年代机械电力部门已经将 SF₆ 气体电气设备作为电网装备更新换代的主要目标。可见 SF₆ 气体电气设备在我国必将得到日益广泛的应用,具有广阔的发展前景。SF₆ 气体绝缘介质的应用,使电气设备进行了一次电气介质的革命,它使得输变电设备在面貌上、技术上和安全可靠性上都大大改观, SF₆ 气体绝缘设备已经成为高压设备的主要发展方向。SF₆ 气体为介质的电气设备有断路器、电压互感器、电流互感器、避雷器、全封闭组合电器、变压器、充气电缆等,电压等级已突破 1000kV,至今其发展势头不衰。

第 2 节 SF₆ 断 路 器

1.2.1 SF₆ 断路器的工作原理

断路器,俗称开关,是变电站的主要电气设备之一。它不仅在系统正常运行时能切断和

接通高压线路及各种空载和负荷电流，而且当系统发生故障时，通过继电保护装置的作用能自动、迅速、可靠地切除各种过负荷电流和短路电流，防止事故范围的发生和扩大。随着国民经济的迅速发展，各行各业的用电需求量也急剧增加，电力系统负荷日益增长，供电可靠性要求逐步提高；变电站的断路器也逐渐由油断路器换代成新型的 SF₆ 断路器。因此，SF₆ 断路器在电力系统中得到广泛应用。

SF₆ 断路器是利用 SF₆ 气体作绝缘介质和灭弧介质的新型断路器。SF₆ 气体是无色、无味、无毒，不可燃的惰性气体，具有很高的抗电强度和良好的灭弧性能，介电强度远远超过传统的绝缘气体。因此，其用于电气设备中，可以缩小设备尺寸，消除火灾，改善电力系统的可靠性和安全性。

SF₆ 断路器由本体结构（采用三相共箱式结构）、操作机构、灭弧装置三部分组成，具有结构简单、体积小、重量轻、断流容量大、灭弧迅速、允许开断次数多、检修周期长等优点，是今后电力系统推广应用的方向。SF₆ 断路器内经常充满了 3~5 个大气压的 SF₆ 气体作为断路器的内绝缘，在断路器断开的过程中，由动触头带动活塞压气，以形成用来吹熄电弧的气流。SF₆ 断路器灭弧室的基本结构由动触头、绝缘喷嘴和压气活塞连在一起，通过绝缘连杆由操作机构带动。定触头制成管形，动触头是插座式，动、定触头的端部都镶有铜钨合金。绝缘喷嘴用耐高温、耐腐蚀的聚四氟乙烯制成。开关进行分闸时，动触头、活塞一起向右运动。动、定触头分开后产生电弧，活塞向右迅速移动时使右侧的气体受压缩，产生气流通过喷嘴，对电弧进行纵吹，使电弧熄灭。此后，灭弧室内的气体通过定触头内孔和冷却器排入开关本体内。SF₆ 断路器进行合闸时，操作机构带动动触头、喷嘴和活塞向左运动，使定触头插入动触头座内，使动、定触头有良好的电接触，达到合闸的目的。SF₆ 断路器二次接线在接线调试中应注意以下几点：

(1) 分闸电气连锁靠转换 FK 来实现，机构内部已有可靠的分合闸机械连锁。手动分闸时，如拉不动分闸环（分闸闭锁）时，不要用力拉；欲合闸而拉不动合闸环时，也不要用力拉。此时应观察指针位置后，再进行分、合闸操作。

(2) 电接点真空压力表引线在罩的下部，从该压力表的动合触点引出。出厂时已将下限指针调至 0.2MPa（按 0.25MPa、-10℃ 考虑），当 SF₆ 气压降低至少于 0.2MPa 时，触点即行关合，接通继电保护回路。用户可根据运行要求适当调高下限，但不得低于 0.2MPa。

(3) 靠箱体外侧的是合闸拉环，靠箱体里边的是分闸拉环，手动操作时切勿拉错。

(4) 贮能电动机必须用交流电源。

SF₆ 断路器是利用 SF₆ 密度继电器来监视气体压力的变化。当 SF₆ 气体压力下降到第一报警值时，密度继电器动作，报出补气压力的信号。当 SF₆ 气体压力下降到第二报警值时，密度继电器动作，报出闭锁压力的信号，同时把断路器的跳合闸回路断开，实现分、合闸闭锁。

1.2.2 SF₆ 断路器的发展

SF₆ 气体引起高压断路器设备的最有深远影响的革新，它贯穿中压、高压、超高压及特高压。国外从 20 世纪 50 年代开始研究高压断路器，断路器的发展经历了双压式—单压式—自能灭弧式三个阶段。工业上首次将 SF₆ 用于开断电流始于 1953 年，当时只做出了 15~161kV 高压负荷断路器，开断电流为 600A。美国开创了将 SF₆ 气体用于高压断路器的先河。1956 年，美国西屋公司首相开发出 115kV (5kA) 断路器。该断路器每相由 6 个断口串联

而成。1959年,西屋公司又开发出138kV(41.8kA)和230kV(37.6kA)三相落地罐式断路器,每相由三个断口串联而成。SF₆气体绝缘压力为0.3MPa,吹弧压力为1.35MPa。同时,美国GE公司于1959年开发了230kV三断口双压式SF₆断路器,并于1965年开发出345~700kV四至八断口双压式SF₆断路器。当美国两家公司在大力发展SF₆断路器时,欧洲的诸多公司还在竞相开发少油和空气断路器。1969年美国西屋公司的SF₆断路器基本专利失效,欧洲和日本诸多公司很快推出了他们的SF₆断路器产品,而且直接或间接的转入单压式。美国西屋公司和GE公司虽然最早开发了SF₆断路器,但以后并没有再造辉煌,欧洲和日本后来居上,一直处于开发的领先地位。

第一代双压式SF₆断路器在原理上是由空气断路器派生而来的。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。此种断路器由于使用了高压区因而带来一系列弊病。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。单压式设计原理首次出现在60年代,其工作原理是灭弧期间机械压缩SF₆气体,已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,气体回收程序也被省去。1984年以来,SF₆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SF₆气体,建立高压区,形成压差,通过高压区SF₆气体膨胀,而达到熄灭电弧的目的。

1.2.3 SF₆断路器的结构特点

(1) 瓷柱式结构:取积木式,系列性强,可用多个相同的单元灭弧室和支柱瓷套组成不同电压等级的断路器。中国FA4-550型SF₆断路器为瓷柱式结构,其额定电压为500kV,最高工作电压为550kV。断路器由三个独立的单相和一个液压、电气控制柜组成。每相由两个支柱瓷套的四个灭弧室(断口)串联而成。在每个支柱瓷套顶部装着两个单元灭弧室,为120°夹角V形布置,两个均压并联电容器为水平布置。这种结构布置既考虑到结构的机械应力状态,又照顾到绝缘的要求。灭弧室和支柱瓷套内均充有额定压力的SF₆气体。瓷柱式断路器使用液压操作机构。液压机构的控制和操作元件以及线路均设于控制柜内。每相断路器的下部装有一套液压机构的动力元件,如液压工作缸等。灭弧室由液压工作缸直接操动。支柱瓷套内装有绝缘操作杆,操作杆与液压工作缸相连接。

(2) 罐式结构:采用了箱式多油断路器的优点,将断路器与互感器装在一起,结构紧凑,抗地震和防污能力强,但系列性较差。此种断路器为三相分装式。单相由基座、绝缘瓷套管、电流互感器和装有单断口灭弧室的壳体组成。每相配有液压机构和一台控制柜,可以单独操作,并能通过电气控制进行三相操作。断路器采用双向纵吹式灭弧室,分闸时,通过拐臂箱传动机构,带动气缸及动触头运动。灭弧室充有额定气压为6个标准大气压(20℃)的SF₆气体。

1.2.4 性能特点

(1) 阻塞效应。充分发挥气流的吹弧效果,灭弧室体积小、结构简单、开断电流大、燃弧时间短,开断电容或电感电流无重燃或无复燃,过电压低。

(2) 电气寿命长。50kA 满容量连续开断可达 19 次, 累计开断电流可达 4200kA, 检修周期长, 适于频繁操作。

(3) 绝缘水平高。SF₆ 气体在 0.3MPa 气压时, 通过了各种绝缘试验并有较大裕度。累计开断电流 3000kA 以后, 在 0.3MPa 气压下每个断口还可耐受工频电压 250kV 达 1min, 将 SF₆ 气体减至零表压仍可耐受工频电压 166.4kV 达 5min。

(4) 密封性能好。SF₆ 气体含水量低; 灭弧室、电阻和支柱分成独立气隔, 现场安装时不用打开, 安装好后用自动接头连通; 安装检修方便, 并可防止脏物和水分进入断路器内部。

(5) 自我保护和监视系统完备。液压机构内的信号缸可实现对断路器的自我保护, 有密度继电器监视 SF₆ 气体泄漏; 有压力开关和安全阀监视液压机构压力, 保护液压系统安全。液压机构采用了可防止“失压慢分”的阀系统, 本体上就可进行机构闭锁, 保证运行安全。控制回路中采用了两套分闸电磁铁和防跳保护, 保证操作准确无误。

(6) 操作功率小, 缓冲平稳。机构工作缸与灭弧动触头的传动比为 1:1, 机构特性稳定。机构特性稳定性可达 3000 次, 机构寿命研究试验做到 10000 次, 操作噪声小于 90dB。

第 3 节 SF₆ 互感器

1.3.1 SF₆ 电压互感器

传统的油纸绝缘电压互感器由于运行中油质劣化及水分的浸入, 常导致产品内绝缘老化及至破坏, 而这些质量问题无法从制造中根除, 这已不适应现代电网对输变电设备提出的高可靠性、无油化的要求。

SF₆ 气体绝缘电压互感器, 由于其优越的电气性能而使其市场前景非常看好, 在某些领域可以取代传统结构的油纸绝缘电压互感器。目前, SF₆ 气体绝缘电压互感器需求量越来越大, 生产技术也日趋成熟。

高压 SF₆ 电压互感器 (简称 SF₆ TV) 有独立式和与 GIS 配套式两种结构。早期开发的是与 GIS 配套的 SF₆ TV, 由盆式绝缘子、箱体、器身、接线盒、防爆装置及 SF₆ TV 截止阀等组成。独立式 SF₆ TV 则是在与 GIS 配套的 SF₆ TV 的基础上, 取消盆式绝缘子, 以高压绝缘套管将一次高压线引出而成。这里主要讨论独立式 SF₆ TV。

互感器器身由一次绕组、二次绕组、剩余电压绕组和铁芯组成。二次绕组采用层式结构, 一次绕组为多层圆筒式, 由聚酯漆包线绕成, 层间绝缘采用菱格点胶聚酯薄膜, 绕组结构采用矩形结构或宝塔形结构。为了改善绕组的冲击电压分布, 一次绕组低压端设有静电屏, 高压端设有均压屏蔽罩。在超高压产品中, 一次绕组中部可设有中间静电屏, 其端部装有均压环。铁芯采用单级式口字形铁芯结构, 铁芯内侧设有屏蔽电极, 以改善绕组端部电场。器身可吊装在箱盖上或固定在箱体内壁上。

一次高压引线有两种结构, 一种是用光导杆 (一般用空心铝管) 做引线, 在引线的上下端设屏蔽筒以改善端部电场, 110kV 以下电压等级的产品一般采用该结构。另一种采用短尾电容式套管作引线, 220kV 以上电压等级的产品一般采用该结构, 在实际产品设计中, 若产品结构合理, 220kV 电压等级的产品也常用光导杆作引线。

高压绝缘套管: 可采用传统的高强瓷烧结而成的瓷套套管, 也可采用先进的硅橡胶复合

绝缘子,前者具有长期的使用经验,长期稳定性好,且货源足、位低,但需经常维护清扫,且材质易碎;后者是目前比较先进的以硅橡胶和玻璃纤维增强塑料管为绝缘基材而制成,体积小、重量轻、抗震性好、防爆性和抗破坏性强,具有良好的耐污性和抗老化性,无须清扫、免维护,目前越来越受电力用户欢迎。

为了防止产品内部压力的突变危及设备安全,在箱体侧面设有防爆装置。为了便于随时监测互感器的运行状态,设有 SF₆ 密度继电器,不仅便于运行人员监测,而且配有报警触点以便于远程或集中控制。由于运行中 SF₆ 互感器要严格控制含水量及 SF₆ 气体在高温、电弧作用下的生成物,所以采取吸附措施在产品内部放置吸附剂,以保证产品的安全运行。

1.3.2 SF₆ 电流互感器

电流互感器作为电网中不可缺少的设备,在电网运行中扮演着重要的角色。随着电网的快速发展,电流互感器在电网中的数量也呈几何级数增长。220kV 及以上电压等级的电流互感器主要是油浸式电流互感器和 SF₆ 气体电流互感器;110kV 及以下电压等级的电流互感器主要是油浸式电流互感器和干式电流互感器。随着近几年人们对 SF₆ 气体电流互感器的深入认识, SF₆ 气体电流互感器的应用快速增长,已远远超过油浸式电流互感器的发展速度。

1.3.2.1 SF₆ 气体电流互感器特点

油浸式电流互感器的绝缘介质为绝缘油, SF₆ 气体电流互感器的绝缘介质为 SF₆ 气体。相对于绝缘油而言, SF₆ 气体绝缘强度高,在正常情况下干净无害。 SF₆ 气体具有优良的电绝缘性和灭弧特性,常压下其绝缘能力为空气的 2.5 倍以上,其灭弧能力相当于相同条件下空气的 100 倍,因此,在电力工程中得到了广泛的应用。 SF₆ 气体电流互感器的结构如图 1-1 所示。

SF₆ 气体电流互感器采用倒立式结构。金属外壳连同其内部所装的二次绕组一并固定在瓷套上端,金属外壳上有一次出线端子及联结板,瓷套下端由产品底座支撑,二次绕组引线经瓷套中的二次引线管一直到产品底座中的二次出线板上。一次绕组是由一导电管和一导电杆组成,导电杆从导电管中心穿过。当单独使用导电管时,一次绕组即为一匝(并联);当使用联结板将导电管、导电杆串联时,一次绕组即为 2 匝(串联)。二次绕组全部用金属筒加以屏蔽,其屏接地引下线接于二次出线板的接地端子上,供接地使用。产品内部带有改善电场的屏蔽件,外带电容均压环改善电场分布。

1.3.2.2 电气性能

SF₆ 电流互感器内部充有绝缘性能优良、稳定性好的 SF₆ 气体,电场经优化设计、场强均匀、绝缘裕度大、介质损耗及局部放电小。套管采用增强纤维筒外表浇注硅橡胶伞裙的复合绝缘套管。其主要优点介绍如下:

(1) 由于采用防爆膜片,可以使绝缘套管在发生内部故障的情况下不会断裂,避免了由于瓷碎片飞出或喷油(指油浸式电流互感器)所造成的继发性损坏,因此安全性能好。

(2) 主绝缘采用同轴圆柱形均匀电场结构。一次导杆、二次屏蔽、壳体相互构成同轴圆

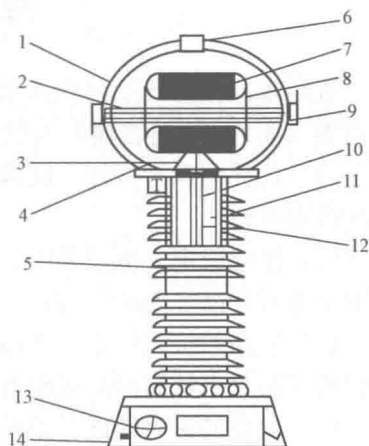


图 1-1 SF₆ 气体电流互感器的结构

1—壳体；2—一次导杆；3—绝缘支撑；
4—电容均压环；5—瓷套；6—安全帽；
7—二次绕组；8—屏蔽电极；9—安全阀；
10—二次引线管；11—电容锥；12—二次
引线；13—密度继电器；14—底座

柱形均匀电场,主绝缘间隙裕度较大。

- (3) 分压结构采用中间分压屏,中间分压屏与高压和低压之间均为纯 SF₆ 气体绝缘。
- (4) 复合式绝缘套管重量轻,便于运输和安装,减少了安装时损坏的可能性。
- (5) 硅橡胶伞裙易于造型,可适当增加绝缘套管的表面爬电距离。
- (6) 复合式套管机械强度高、弹性好,具有较高的抗地震性能。
- (7) 耐污秽性能好,可用于环境条件较差的场所,而不需要常清理或涂抹硅油。
- (8) 硅橡胶伞裙表面具有良好的憎水性,在淋雨强度达 50mm/min 时,仍不会形成连续水膜,提高了闪络特性和爬电特性。

1.3.2.3 电磁性能

SF₆ 电流互感器为倒立式结构,漏抗小,提高了准确级及额定输出。二次绕组数目多,可有多种组合方式,可按用户需要抽头。电流互感器一次导电杆直径大、长度短(2 个支点距离近),散热条件好,因此温升高,短时电流(热稳定电流)大,能承受大的电动力(动稳定电流大)。

第 4 节 SF₆ 避雷器

近年来,作为 SF₆ 封闭式组合电器(GIS)重要保护电器的 SF₆ 罐式无间隙金属氧化物避雷器(简称 SF₆ 避雷器)得到迅速发展,其主要特点表现在:

- (1) 优异的保护特性。陡波响应好,陡波残压的降低对于保护伏一秒特性比较平坦的 GIS 特别有利。
- (2) 性能稳定。由于采用了金属外壳,内部充 SF₆ 气体,消除了外界雾、露、污秽、温度变化等对产品性能的影响,并且 SF₆ 气体高的绝缘强度,保证了产品的性能稳定。
- (3) 较高的抗震性能。产品内部的设计考虑了冷热及震动对产品的影响,采用了过渡连接使得产品具有较高的耐震能力。
- (4) 优良的密封性能。采用了特殊的密封结构设计,使得避雷器在正常运行密度下的 SF₆ 年泄漏率均小于 1%。

第 5 节 SF₆ 封闭式组合电器

SF₆ 封闭式组合电器,国际上称为“气体绝缘开关设备”(Gas Insulated Switchgear, GIS)。它将一座变电站中除变压器以外的一次设备,包括断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、母线、电缆终端、进出线套管等,经优化设计有机地组合成一个整体。并且高压带电部分全部密封于钢壳之中,无触电危险,提高了运行的安全性。同时,由于密闭组合,避免了外界环境的影响,适合于大城市、工业密集区、严重污秽地区的变电所安装使用。

1.5.1 SF₆ GIS 设备的特点

- (1) 小型化。因采用绝缘性能卓越的 SF₆ 气体做绝缘和灭弧介质,所以能大幅度缩小变电站的体积,实现小型化。
- (2) 可靠性高。由于带电部分全部密封于惰性 SF₆ 气体中,不与外部接触,不受外部环

境的影响,大大提高了可靠性。此外由于所有元件组合成为一个整体,具有优良的抗地震性能。

(3) 安全性好。带电部分密封于接地的金属壳体内,因而没有触电危险。SF₆气体为不燃烧气体,所以无火灾危险。

(4) 杜绝对外部的不利影响。因带电部分以金属壳体封闭,对电磁和静电实现屏蔽,噪声小,抗无线电干扰能力强。

(5) 安装周期短。由于实现小型化,可在工厂内进行整机装配和试验合格后,以单元或间隔的形式运达现场,因此既可缩短现场安装工期,又可提高可靠性。

(6) 维护方便,检修周期长。因其结构布局合理,灭弧系统先进,大大提高了产品的使用寿命,因此检修周期长,维修工作量小,而且由于小型化,离地面低,因此日常维护方便。

1.5.2 SF₆ GIS 设备的结构与主要元器件

1.5.2.1 断路器

断路器组件由三相共箱式断路器和操动机构组成。每相灭弧室有独立的绝缘筒封闭。灭弧室为单压式,采用轴向同步双向吹弧式工作原理,结构简单,开断能力强。

1.5.2.2 隔离开关和接地开关

接地开关可以配手动、电动或电动弹簧机构。手动和电动机构主要用于检修用接地开关;电动弹簧机构用于具有开合电磁感应电流、静电感应电流能力和需要关合短路电流的接地开关。接地开关可用做一次接线端子,因此,在不需放掉 SF₆ 气体的条件下,用于检查电流互感器的变化和测量电阻等。隔离开关可以配手动、电动或电动弹簧机构。手动和电动机构主要用于无负载电流时分合隔离开关;电动弹簧机构用于需要切合电容电流、电感电流和母线转换电流的隔离开关。

1.5.2.3 避雷器

避雷器为氧化锌型封闭式结构,采用 SF₆ 绝缘,有垂直或水平接口,主要由罐体盆式绝缘子安装底座及芯体等部分组成,芯体是由氧化锌电阻片作为主要元件,它具有良好的伏安特性和较大的通容量。

1.5.2.4 气隔

GIS 的每一个间隔,用不通气的盆式绝缘子(气隔绝缘子)划分为若干个独立的 SF₆ 气室,即气隔单元。各独立气室在电路上彼此相通,而在气路上则相互隔离。设置气隔具有以下优点:可以将不同 SF₆ 气体压力的各电器元件分隔开;特殊要求的元件(如避雷器等)可以单独设立一个气隔;在检修时可以减少停电范围;可以减少检查时 SF₆ 气体的回收和充放气工作量;有利于安装和扩建工作。每一个气隔单元有一套元件,即 SF₆ 密度计、自封接头、SF₆ 配管等。其中, SF₆ 密度计带有 SF₆ 压力表及报警触点。除可在密度计上直接读出所连接的气室的 SF₆ 压力外,还可通过引线,将报警触电接入就地控制柜。当气室内 SF₆ 气压降低时,则通过控制柜上光字牌指示灯及综合自动化系统报文发出“SF₆ 压力降低”的报警信号,如压力降至闭锁值以下,则发闭锁信号,同时切断断路器控制回路,将断路器闭锁。

1.5.3 SF₆ GIS 操作模式

220kV、110kV GIS 设备共有就地操作和测控装置操作两种操作模式。

1.5.3.1 就地操作

就地操作需要通过就地控制柜来实现。就地控制柜(LCP)是对GIS进行现场监视与控制的集中控制屏。也是GIS间隔内、外各元件,以及GIS与主控室之间电气联络的中继枢纽。就地控制柜具有就地操作、信号传输、保护和中继、对SF₆系统进行监控等功能。主要功能如下:

(1) 实施断路器、隔离开关、接地开关就地—远方选择操作,在控制柜上进行就地集中操作。

(2) 监视断路器、隔离开关、接地开关的分合闸位置状态。

(3) 监视GIS各气室SF₆气体密度。

(4) 实现GIS本间隔内断路器、隔离开关、接地开关之间的电气连锁及间隔之间各种开关之间的电气连锁。

(5) 显示一次主接线形式及运行状态。

(6) 作为GIS各元件间及GIS与主控室之间的中继端子箱接收或发信号用。

(7) 监视控制回路电源是否正常,并通过电源开关、熔断器、保护开关,对就地控制柜及GIS的二次控制、测量和保护元件起保护作用。

就地操作时,将“远方/就地”操作手柄切换至“就地”位置,然后切相应的开关、隔离开关、接地开关、操作开关即可。

1.5.3.2 测控装置操作

以220kV系统为例,220kV系统采用FCK-851微机测控装置,具有测量、控制、监视、记录、同期、间隔层逻辑自锁互锁等功能。该装置通过自身实时、开放的网络通信功能互相交换数据,每台测控装置都能实时获得来自其他间隔的测控装置的遥控信息,并应用于控制的闭锁逻辑判别,从而实现间隔层的闭锁逻辑。控制命令的执行流程:当“远方/就地”手柄在远方状态时,只有远方遥控命令有效;当“远方/就地”手柄在就地状态时,只有就地的控制操作有效。然后判断连锁/解锁手柄的位置状态,确定是否需要进行逻辑闭锁,只有不需要逻辑闭锁或者满足闭锁逻辑的出口条件时,才允许完成控制命令,从而更有效地实现逻辑闭锁功能。

在测控装置操作时,应先在五防机进行模拟操作,并将操作任务传至电脑钥匙。将测控装置的“远方/就地”切换手柄切换至“就地”位置,电脑钥匙插入对应的端口,然后切换相应的开关操作手柄即可。

1.5.4 SF₆ 复合电器(HGIS)的特点与应用

HGIS是一种新型的组合电器,它将断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器(需要时)以及相应的控制系统组合在一起,采用架空套管与出线和母线连接。与敞开式开关设备相比,它把断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器等集成为一个模块,大大节省了占地面积,提高了设备可靠性;与GIS相比,省略了封闭式母线,大大节省了费用。因此,自ABB推出首台HGIS产品(pass开关)以来,世界上各大公司对其一直热情不减。最近几年,国内几大开关厂也加入了研发、生产HGIS的行列。HGIS如此受青睐,应归功于几个主要特点:

(1) 继承了GIS的诸多优点。HGIS除了母线采用架空线外,其余结构均与GIS一致或类似,这便有了GIS的优点。

(2) 占地面积小。由于母线不采用封闭母线,虽然占地面积比GIS大,但与传统产品敞开式设备相比,节约土地50%~60%(800kV可达70%),由于元件是全封闭式的,因此不受污染、盐雾、潮湿等环境的影响。而且设备被牢固地安装在基础预埋件上,产品重心低,强度高,具有优良的抗震性能。

(3) SF₆气体作为绝缘介质,具有优异的绝缘性能和灭弧性能,运行安全可靠。模块式结构、布线灵活、简单。

在受到环境限制(比如母线不能外露或者水电站)和地皮十分昂贵的大城市地区,GIS有其不可比拟的优势。但由于HGIS拥有一系列的优点,弥补了GIS的不足。

第6节 SF₆ 变 压 器

1.6.1 SF₆变压器的优点

随着城市建设的发展,城市人口愈加密集,高层建筑、地下通道和建筑越来越多,加上人们对电力的依赖和消费程度也越来越高,用量急剧增加。为了保证城市建设和居民的安全,对供电的安全性、可靠性、设备的环境兼容性、安装与运输等都提出了更高的要求。特别是高层建筑中的变电站,其防火问题更显得十分重要。传统的大容量油浸变压器油量大,一旦着火,后果不堪设想。

不燃变压器按绝缘介质的不同,一般可分为硅油变压器、环氧树脂浇注变压器、SF₆气体绝缘变压器(简称GIT)和复敏绝缘液介质(FORMELNF)变压器等。硅油变压器虽有难以起火等优点,但不适用于过于潮湿的环境。由于国内硅油售价过高,目前还不能解决大量使用硅油的货源,从而限制了这种产品的大批量生产和发展。复敏绝缘液是四种卤素碳化台物的混合体,即四氯乙烯、三氟乙烷、二氟乙烷、二氟己烷的混合体。它具有不燃、低毒的优点。充该液体的变压器尺寸紧凑,密封性好,维护方便,过载后可避免绝缘老化,热传导性能好。但复敏绝缘液货源有限,价格较高,推广难度大。环氧树脂浇注变压器具有难燃、无毒、体积小、噪声低等优点,在10kV城网配电系统中已占优势地位,但存在着防尘较差等缺点,即使加装保护外壳,也无法达到全密封型的完好水平。另外,一般环氧树脂浇注变压器的额定电压为10kV和35kV,最大容量为16000kVA,若向更高电压等级、更大容量发展还有很大的困难。

GIT采用全密封结构,箱内充有表压力为0.1~0.6MPa的SF₆气体。器身置于箱中,与外界环境隔离,并有两层噪声防护。出厂时,一般保证年漏气率在1%以下。即使运行中出现意外的漏气情况,保护设备如压力表及密度继电器等能发出信号,在带电状态仍可补充SF₆气体,不会影响变压器的正常工作。GIT具有不燃、不爆、不受潮、噪声低、占地小、安装高度低、不需油坑及净油设备、日常维护量少等优点,而且特别适宜向高压大容量发展。在高电压大容量油浸变压器中发生的油流带电现象是件相当麻烦的事,而在GIT中SF₆气流却不会产生带电现象。

1.6.2 SF₆变压器的不同类型

根据冷却介质的不同,GIT主要可分为气体绝缘、气体冷却和气体绝缘、液体冷却两大类型。

1.6.2.1 气体绝缘、气体冷却类型

对于容量小于 60MVA 的 GIT, 由于其热损耗较小, 通常采用 SF₆ 气体循环冷却的散热方式。这种类型的 GIT 与传统的油浸变压器在结构上有不少类似之处, 在总体结构设计中可作借鉴。但具体的绝缘结构和冷却系统设计, 还需要结合 SF₆ 气体的特点, 在实验研究和理论分析的基础上进行。

1.6.2.2 气体绝缘、液体冷却分离类型

当 GIT 容量超过 60MVA 时, 太多采用液体 (C₈F₁₆O 或 C₈F₁₈) 冷却和 SF₆ 气体绝缘分离式结构, 最大容量已达到 300MVA、275kV, 并已制成 300/3MVA、500kV 单相 GIT。这类产品的结构与油浸变压器有极大差异, 通常为分层冷却、箔式绕组的 GIT, 简称为 S/S 型 GIT。

1.6.3 SF₆ 变压器的结构特征

1.6.3.1 冷却系统

GIT 与油浸变压器的主要不同之处在于冷却介质和冷却处理的差异, 可分为隔离式和喷射式。

隔离式 GIT 绝缘介质仍采用 SF₆ 气体, 而冷却主要靠 C₈F₁₆O 液—气两相介质。为加强冷却效果, 在其器身内部设置冷却通道, 高低压绕组采用分层冷却。径向每隔 40~50mm 有一块冷却板直接绕在饼式绕组间, 使冷却液的流动呈曲折形, 直接流经每匝绕组, 迫使绕组负载损耗热量随冷却液的气化带出, 经上部的汇流管流向变压器外面的散热器, 冷却后又变成液体, 经液压泵再传送到冷却板处, 形成往复循环。在箔式绕组中, 则在匝间留有纵向绝缘间隔物形成的冷却槽。

喷射式 GIT 的冷却系统比较复杂, 一般由循环泵、储液器、喷射装置、风机、冷却液管路和冷却器等部件组成。循环泵将变压器底部储液器中的两相冷却液抽到器身上方的喷射装置中。该装置将冷却液体经多条通道喷射到器身上。散布在器身上的冷却液吸收器身热量后迅速气化。此蒸汽与充在箱体内部的 SF₆ 气体一起形成混合气体, 由风机强制地送入冷却器和外界进行热交换。冷却液的冷却蒸汽在冷却器中凝聚液化, 并流回储液器。

1.6.3.2 绝缘结构

根据工作电压和容量不同, GIT 选用各种饼式绕组和箔式绕组, 高压绕组与低压绕组之间、绕组对地之间的绝缘的绝缘强度主要决定于 SF₆ 气体的绝缘强度。因为 SF₆ 气体中的放电或击穿就是主绝缘的击穿, 因此在设计中一定要严格控制气体中的电场强度。变压器箱内 SF₆ 气体压力越高, 热容量越大。如以 0.125MPa 的 SF₆ 气体热容量为 1, 那么 0.4MPa 的 SF₆ 气体热容量为 2.4。在绝缘强度方面, 也是气体压力愈高, 绝缘强度愈大。因此, 在 275kV 电压等级时, 采用 0.4MPa 的气体, 而在 500kV 电压等级时, 采用 0.6MPa 的 SF₆ 气体。GIT 箱体与油浸变压器不同之处在于要求箱体除在全真空时不因屈曲不稳而失效外, 还要求承受内压时有足够的强度和刚度。

GIT 对密封性能的要求很高, 因为密封不好会造成箱体内部的 SF₆ 气体泄漏和外界水分向箱体内渗透, 从而危及变压器的安全运行。一般要求气体年泄漏率小于千分之一。为保证箱体的密封应尽可能减少密封面和焊缝, 提高焊缝的质量, 必要时可采用双密封结构和密封剂。GIT 采用各种耐热性能和绝缘性能好的固体绝缘材料。如匝绝缘一般采用对苯二甲酸乙二醇聚酯 (PET) 或聚苯撑硫 (PPS), 最近又发展使用价格较低的 PEN 类聚酯薄膜; 撑

条采用聚酯玻璃纤维；垫块采用聚酯树脂。聚酯薄膜和 SF₆ 气体一起组成组合绝缘结构，其长期耐电强度主要取决于气膜结构的局部放电特征。

采用箔式绕组的 GIT，高低压绕组之间的主绝缘采用两层厚度为 25 μ m 薄膜卷制而成的固体绝缘，匝绝缘采用聚酯薄膜。这种结构充分利用了箔式绕组空间系数高和聚酯薄膜厚度薄、绝缘强度高的特点，从而可显著减轻重量和减小尺寸。

变压器绝缘由匝间绝缘、绕组端部绝缘、主绝缘和外绝缘四部分组成。与 SF₆ 全封闭组台电器相比，变压器中的电场分布很不均匀，而且是三维场。因此要通过电场分析计算来解决变压器的内部绝缘问题。由于 SF₆ 气体的绝缘性能对电场的均匀性依赖程度较大，为防止局部放电，改善电场分布，除在绕组端部设置良好的静电屏蔽外，也应尽量除掉铁心各构件表面的尖角毛刺，必要时应在螺钉、棱角处加上屏蔽罩。

1.6.3.3 相关组件

有载分接开关一定要采用 SF₆ 气体绝缘的真空有载分接开关，它采用真空开关来切断有载开关切换机构的电流，并采用滚柱式触头系统和无润滑轴承，目的是为防止由于电弧引起的 SF₆ 分解气体对变压器本体的影响。真空有载分接开关本身的寿命可切换 100 万次以上，但规定切换 5 万次作一次检修，切换 20 万次便更换，因此安全系数高，可延长 GIT 的整体寿命。

GIT 对冷却器的要求也比油浸变压器高，除了要求散热面积足够大以外，还要求气体通道的横截面积尽可能大，气体阻力系数尽可能小。能承受 0.6MPa 的压力和 0.1MPa 的真空强度。GIT 的保护系统加强了对 SF₆ 气体过压和失压的保护，安装有温度补偿密度继电器、压力释放阀，或者带报警触点压力表等保护装置。为保护变压器免遭雷电冲击渡的入侵，还可在箱体内安装避雷器来提高绕组抗雷电过电压的能力。

第7节 其他设备

SF₆ 气体绝缘金属封闭输电线路（简称 GIL）是以 SF₆ 气体作为绝缘介质的输电线。由于以绝缘油和绝缘纸为介质的传统输电线路的介电常数大，充电电流也大，并且随着线路长度的增加而成正比上升，所以其输电容量和临界长度受到限制。SF₆ GIL 与电力电缆相比较能够传输更大容量的电能，可达 GW 级。SF₆ GIL 与架空输电线路相比较更适用于高压和超高压远距离、大容量的电力传输。另外，适用于水力和火力发电厂、超高压变电所出线或联络线路；特别适用于气候恶劣如严重冰雪灾害地区、环境特殊的地区如群山地带及崇山峻岭。SF₆ GIL 可有效利用有限的空间资源，实现高压、超高压大容量电能直接进入城市的地下变电所等负荷中心。SF₆ GIL 对于优化电厂布置、输电线路交叉穿越、地下输电系统的长斜井或竖井敷设、地面高架安装、GIS 开关站更新改造和 GIS 开关站扩容或联络都有广泛的用途。另外，还可以应用在架空线因空间受限制使用之处，如市容要求、官方规定或环境等原因不允许使用架空线的地方，像人口密集的大城市，因此，采用 SF₆ GIL 供电也许是一种不错的抉择。SF₆ GIL 特别适用于电站厂房布置在地下的大型水电站高压出线，大型抽水蓄能电站高压出线，核电站主变高压侧与高压配电装置之间的连接，以及高压直流换流站和特高压变电所内高压联络。

SF₆ GIL 的优点很多，主要是载流量很高，能够允许大容量传输。SF₆ GIL 的另一个重