

基于分解组分分析的SF₆气体

绝缘装备故障诊断方法与技术

唐炬 曾福平 张晓星 著



科学出版社

基于分解组分分析的 SF₆ 气体 绝缘装备故障诊断方法与技术

唐 炬 曾福平 张晓星 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

气体绝缘装备分解组分分析故障诊断方法与变压器油中溶解气体分析故障诊断方法一样,前者主要是对 SF₆ 气体绝缘设备内部出现的绝缘故障进行分析与诊断,它是一种非常具有工程实用潜力的非电监测法。本书围绕 SF₆ 气体绝缘介质在不同属性故障状态作用下的分解特性、分解机理、影响因素及其校正方法、分解组分特征提取与故障诊断方法等关键科学与技术难题展开系统全面的论述,为建立 SF₆ 气体绝缘装备分解组分分析绝缘故障监测与诊断体系提供理论和技术方面的指导。

本书可作为从事电气设备研究、SF₆ 气体绝缘装备制造和运行维护人员的参考书,也可供相关专业的高等院校研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于分解组分分析的 SF₆ 气体绝缘装备故障诊断方法与技术/唐炬,曾福平,张晓星著. —北京:科学出版社,2016. 8

ISBN 978-7-03-049534-1

I. ①基… II. ①唐… ②曾… ③张… III. ①六氟化硫气体—绝缘—机电设备—故障诊断 IV. ①TM213

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187028 号

责任编辑:张海娜 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:21 1/2

字数:430 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在高速发展的现代社会中,一旦电网发生重大事故将会引起大面积的停电,不仅给国民经济发展带来严重影响,而且对人民生活乃至社会公共安全造成严重的危害。因此,电网安全是大中城市运行和国民经济发展的命脉,世界发达与高速发展中国家都高度重视电网的安全运行。从近二十年国内外发生的电网大面积停电事故来看,只有高度重视输变电装备故障导致电网突发性停电事故的基础研究,并从引发电网大面积事故的设备故障源头上建立起第一道防御系统,才能大幅减少因大面积停电给国民经济带来的严重损失。

SF₆ 气体绝缘装备(主要包括气体绝缘组合电器、气体绝缘断路器、气体绝缘变压器和气体绝缘管线等)因其占地面积小、运行安全可靠、检修周期长以及电磁污染小等突出优势,被广泛应用于高压、超/特高压输变电系统和大中城市的配电系统中,已成为构建智能电网的首选设备和建设现代变电站的重要标志,其安全可靠运行既是直接保障大中城市供电可靠性的基础,也是直接保障社会稳定的基石。

尽管 SF₆ 气体绝缘装备的运行可靠性很高,但国际大电网会议(CIGRE)的统计和我国电力运行公报表明:运行中的 SF₆ 气体绝缘装备发生绝缘的故障率远高于 IEC 标准规定的水平,且故障多发生在较高电压等级。SF₆ 气体绝缘装备发生的故障,往往是由设备内部的金属遗留物(毛刺)、绝缘子气隙、金属微粒、绝缘子表面污染、接触不良或磁短路等典型缺陷所致。由这些潜伏性缺陷形成的绝缘故障,常以低能量局部放电(partial discharge, PD)或局部过热(partial over-thermal, POT)形式开始,对设备安全运行带来潜在性的危害,称为早期潜伏性绝缘故障。这些早期 PD 或 POT 会不同程度地损伤绝缘材料,绝缘材料的损伤又会加重 PD 或 POT,从而进一步加快绝缘材料的劣化,以致形成恶性循环,最终可能导致设备绝缘击穿或高温烧蚀。因此,本领域将设备内出现对安全性能有严重危害的 PD 或 POT 称为“绝缘肿瘤”,若不及早发现并及时治愈,它会由小变大,由弱变强,甚至由局部扩大到整体,逐步发展成为严重的火花放电、局部电弧放电或者局部热烧蚀等引发的突发性绝缘故障,致使设备绝缘能力完全丧失,最终可能导致因设备故障诱发电网大面积停电的严重事故。

虽然 SF₆ 气体绝缘装备的主要绝缘介质 SF₆ 是一种温室气体,不能随意排放,但作为绝缘和灭弧性能优良的气体介质,目前还不能被绝缘性能更好、灭弧性能更强、环保性能更优的新气体绝缘介质替代。在相当长的时间内, SF₆ 气体还会被广泛用作电气设备的气体绝缘。SF₆ 气体绝缘介质在设备内部早期潜伏性绝缘

故障产生的局部强电磁能及局部高温炽热会使 SF₆ 绝缘气体介质发生不同程度的分解,生成各种低氟化物(SF_x, $x=1, 2, \dots, 5$),遇到 H₂O 和 O₂ 等杂质,还会继续反应生成 SO₂F₂、SOF₂、SO₂、HF 和 H₂S 等组分的气体。一方面,有些分解组分(HF 或 H₂S)会腐蚀设备内固体绝缘及金属部件材料,加速设备内部整体绝缘劣化,导致设备发生突发性绝缘故障。另一方面,在这些众多的分解组分中,某些称为特征组分的含量大小及其变化规律与绝缘故障类型和严重程度有密切关系。因此,可通过对 SF₆ 分解生成的特征组分分析,及时发现 SF₆ 气体绝缘装备内部的早期潜伏性绝缘故障,并对其绝缘状态进行科学评价,以降低 SF₆ 气体绝缘装备发生突发性绝缘故障的概率。同时,由于 SF₆ 的分解特性与绝缘故障类型和严重程度关系极为密切,分解组分的变化规律不仅可以反映出故障的性质,还可以反映出故障的产生机理、发展与演变过程。通过揭示 SF₆ 在不同故障模式下分解特性的物理化学本质,可以提取出表征 SF₆ 气体绝缘装备内部不同绝缘故障产生、发展及演变过程的特征信息或特征量,构建内部绝缘状态综合评价模型,建立 SF₆ 气体绝缘装备内部绝缘故障诊断方法与技术。

另外,由于该故障诊断方法与技术是基于混合气体色谱分析理论的化学检测法,不受环境噪声和强电磁干扰的影响,而且与脉冲电流法、超声波法和特高频法等相比,其应用优势在于无须对设备本体进行改造或植入复杂的检测元件,气体取样和分析工作可在设备运行时进行,与变压器油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)故障诊断方法一样,建立 SF₆ 气体绝缘装备的分解组分分析(decomposed components analysis, DCA)故障诊断法是一种非常具有工程实用潜力的非电检测法。目前,该方法与技术的研究进展倍受国内外同行的广泛关注,国际大电网会议近期特别成立了 WG B3-25(SF₆ Gas Analysis for AIS, GIS and MTS Condition Assessment)工作组,以期建立 SF₆ 气体绝缘设备的故障组分分析导则,实现对 SF₆ 或者混合气体绝缘设备进行绝缘故障诊断和状态评价。

本书就最能反映 SF₆ 气体绝缘装备内绝缘故障特征与程度的 SF₆ 气体绝缘介质故障的分解特性、分解机理、影响因素及其校正理论、分解组分特征提取与故障诊断方法等关键科学与技术难题进行深入分析与探讨。全书分为 15 章:第 1 章综述 SF₆ 气体绝缘装备内部常见的绝缘故障及其监测方法;第 2 章分析 SF₆ 气体绝缘介质在设备故障状态下的分解机理及其影响因素;第 3 章着重介绍 SF₆ 故障分解组分的相关检测技术及方法;第 4 章主要探讨 SF₆ 气体绝缘介质在典型绝缘缺陷 PD 作用下的分解特性及其分解机理;第 5 章着重分析 SF₆ 在设备局部过热性故障作用下的分解特性及其分解机理;第 6 章研究微量氧气对 SF₆ PD 分解过程的影响特性及其作用机制;第 7 章探讨微量水分对 SF₆ PD 分解过程的影响特性及其作用机制;第 8 章分析设备内部吸附剂对 SF₆ 分解特性的影响规律及作用机制;第 9 章介绍金属材料 and 气压对 SF₆ 分解的影响特性;第 10 章从化学反应动力学的

角度着重探讨主要影响因素对 DCA 诊断的影响校正方法;第 11 章介绍以 SF_6 故障分解组分作为主要特征量的故障诊断方法;第 12 章着重围绕 SF_6 分解组分特征比值构造原理、物理意义揭示及其故障诊断方法进行论述,详细讨论利用 SF_6 分解组分特征比值进行故障诊断的方法与技术;第 13 章结合决策树原理探讨 SF_6 分解组分决策树比值诊断方法与技术;第 14 章主要介绍利用模糊聚类原理对 SF_6 气体绝缘装备进行故障诊断;第 15 章详细介绍利用支持向量机原理对 SF_6 气体绝缘装备进行故障诊断,并结合实例探讨如何利用 SF_6 分解组分特征比值对 SF_6 气体绝缘装备进行故障诊断。唐炬负责撰写第 1、2、4、6、7、8、10 和 13 章,并负责全书统稿和各章的修改及审定。曾福平负责撰写第 3、5、9、11 和 12 章,并协助统稿和出版过程中的相关工作。第 14、15 章由张晓星负责撰写。杨东博士负责全书图形、曲线、表格及格式等的编辑。

本书是作者及其研究团队近 10 年来对 SF_6 气体绝缘介质在设备内部 PD 或 POT 等潜伏性绝缘故障作用下的分解特性、分解机理、特征提取、故障辨识及评估等关键科学与技术问题系统研究后取得初步成果的总结。在研究过程中,本书得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“防御输变电装备故障导致电网停电事故的基础研究”(2009CB724500)和“电气设备内绝缘故障机理与特征信息提取及安全评估的基础研究”(2006CB708411)、国家自然科学基金重点项目“ SF_6 气体绝缘装备分解组分分析的故障诊断理论与方法研究”(51537009)和“ SF_6 局放分解特征组分提取及绝缘故障诊断方法研究”(51177181)以及湖北省重大科技创新计划项目“气体绝缘装备故障在线监测与智能诊断系统”(2014AAA015)和重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究经费和武汉大学中央高校自主研究项目等的持续资助。研究团队的刘帆、陶加贵、王邸博和李莉苹等博士以及万凌云、孟庆红、陈长杰、梁鑫、范庆涛、潘建宇和孙慧娟等硕士在课题研究中付出了大量的精力;在成果试用、开发和推广应用过程当中得到了重庆、广东、广西、河南、海南和贵州等省、自治区和直辖市电力公司及有关专家、技术人员的大力支持和资助;同时在本书的撰写过程中,中国南方电网科学研究院的李立浈院士、哈尔滨理工大学的雷清泉院士、华中科技大学的程时杰院士等提出了很多宝贵的建议,并给予了大力的支持和帮助。在此,作者表示诚挚的感谢。同时,本书还引用了国内外同行在本领域研究取得的初步成果,也一并表示谢意。

由于作者水平有限,加之 SF_6 气体绝缘装备绝缘在线监测及故障诊断方法与技术正在迅速发展,本书疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 气体绝缘装备分类及特点	1
1.1.1 气体绝缘组合电器	2
1.1.2 气体绝缘电缆	6
1.1.3 气体绝缘变压器	9
1.2 气体绝缘装备常见的绝缘故障	12
1.2.1 气体绝缘装备中的常见故障统计	12
1.2.2 气体绝缘装备放电性绝缘故障及其诱因	13
1.2.3 气体绝缘装备机械性故障及其诱因	15
1.2.4 气体绝缘装备过热性故障及其诱因	19
1.3 气体绝缘装备故障诊断方法	22
1.3.1 现场交接试验故障诊断方法	23
1.3.2 放电性故障诊断方法	23
1.3.3 过热故障的诊断方法	28
1.4 基于组分分析的气体绝缘装备故障诊断技术	29
1.4.1 基于 SF ₆ 分解组分分析的故障诊断原理	29
1.4.2 基于 SF ₆ 分解组分分析的故障诊断方法的地位及应用前景	31
参考文献	32
第 2 章 SF ₆ 气体特性及其分解机理与影响因素	34
2.1 SF ₆ 气体特性及其应用	34
2.1.1 SF ₆ 气体的特性	34
2.1.2 SF ₆ 气体的应用	36
2.2 SF ₆ 气体的分解产物	37
2.2.1 SF ₆ 在放电下的分解产物	37
2.2.2 SF ₆ 在过热下的分解产物	41
2.3 SF ₆ 气体的分解机理	43
2.3.1 SF ₆ 在放电下的分解机理	43
2.3.2 SF ₆ 在过热下的分解机理	45
2.4 影响 SF ₆ 气体分解的主要因素	47

2.4.1 放电能量	47
2.4.2 放电类型	48
2.4.3 过热温度	48
2.4.4 水分和氧气含量	49
2.4.5 电极材料	50
2.4.6 吸附剂的影响	51
2.5 气体绝缘设备正常运行下的组分含量	51
参考文献	53
第3章 SF₆ 分解组分检测方法	58
3.1 SF ₆ 分解组分的色谱检测法	58
3.1.1 色谱检测法的原理	58
3.1.2 SF ₆ 分解组分的色谱检测系统	59
3.1.3 SF ₆ 分解组分的色谱定性检测方法	64
3.1.4 SF ₆ 分解组分的色谱定量检测方法	67
3.2 SF ₆ 分解组分的色谱-质谱联合检测法	68
3.2.1 色谱-质谱的基本工作原理	68
3.2.2 SF ₆ 分解组分的 GC/MS 联合定性检测方法	71
3.2.3 SF ₆ 分解组分的 GC/MS 联合定量检测方法	73
3.3 红外检测法	74
3.3.1 红外检测原理	75
3.3.2 检测 SF ₆ 分解组分的长光程气体池的设计	76
3.3.3 SF ₆ 分解组分的红外定性定量检测	79
3.4 光声光谱检测法	85
3.4.1 光声光谱检测的基本原理	85
3.4.2 光声检测装置的研制与参数测试	88
3.4.3 SF ₆ 分解组分的光声检测定量检测	93
3.4.4 温度对 SF ₆ 分解组分光声光谱检测特性的影响及其数学校正	94
3.5 气敏传感器检测法	99
3.5.1 传统电化学气敏传感器检测 SF ₆ 分解组分	99
3.5.2 碳纳米管气敏传感器检测 SF ₆ 分解组分	101
3.5.3 TiO ₂ 纳米管气敏传感器检测 SF ₆ 分解组分	104
参考文献	107
第4章 局部放电下 SF₆ 分解特性及特征组分	111
4.1 气体绝缘设备中典型绝缘缺陷物理模型	111
4.1.1 金属突出物缺陷	111

4.1.2 自由导电微粒缺陷	112
4.1.3 绝缘子表面污秽缺陷	113
4.1.4 绝缘子气隙缺陷	114
4.2 SF ₆ 分解特征组分选择及特征组分含量比值	115
4.2.1 SF ₆ 特征分解组分选择及物理意义	115
4.2.2 特征组分含量比值选取及其物理意义	115
4.3 不同绝缘缺陷类型的 SF ₆ 分解特性	116
4.3.1 分解组分含量变化规律	116
4.3.2 特征组分含量比值	120
4.3.3 PD 量和特征组分产气率	122
4.4 不同 PD 强度下 SF ₆ 分解特性及其特征提取	124
4.4.1 实验步骤	124
4.4.2 分解组分产量随放电时间的变化规律	126
4.4.3 分解组分含量与放电量的关联特性	128
4.4.4 分解组分有效产气速率与放电量的关联特性	131
4.4.5 表征 PD 能量的特征组分	133
4.4.6 表征 PD 能量的分解特征组分产率比值	136
参考文献	139
第 5 章 局部过热下 SF₆ 分解特性及特征组分	142
5.1 SF ₆ 局部过热分解试验系统	142
5.2 不同过热故障下 SF ₆ 气体分解特性	145
5.2.1 SF ₆ 热分解起始温度	146
5.2.2 在 POT 作用下 SF ₆ 分解组分含量变化特性	147
5.2.3 涉及有机固体绝缘材料时 SF ₆ 过热分解组分含量变化特性	155
5.3 主要特征分解组分的确定及其物理意义	164
参考文献	169
第 6 章 微量氧气对 SF₆ 分解组分特性的影响	171
6.1 微量氧气来源	171
6.2 微量氧气对 SF ₆ 局放分解影响特性及作用机制	172
6.2.1 微量氧气影响 SF ₆ 局放分解的机理	172
6.2.2 低浓度段氧气含量对分解特性的影响	173
6.2.3 高浓度段氧气含量对分解特性的影响	176
6.3 微量氧气含量对局放分解特征量的影响	181
6.3.1 微量氧气对特征组分相对产气速率的影响	181
6.3.2 微量氧气对特征组分含量比值的影响	184

参考文献	185
第 7 章 微量水分对 SF_6 分解组分特性的影响	188
7.1 微量水分来源及其危害	188
7.2 微量水分对 SF_6 局放分解的影响特性及作用机理	190
7.2.1 微量水分对 SF_6 局放分解的作用机理	190
7.2.2 不同微量水分含量下分解特征组分含量	192
7.2.3 不同微量水分含量对特征组分产气速率的影响	197
7.2.4 微量水分对组分特征比值的影响	198
参考文献	201
第 8 章 吸附剂对 SF_6 分解组分特性的影响	204
8.1 常用吸附剂种类	204
8.1.1 活性氧化铝	204
8.1.2 分子筛	205
8.1.3 活性炭	205
8.2 吸附剂的吸附原理	206
8.3 吸附剂对 SF_6 分解组分的吸附特性	207
8.3.1 不同类型吸附剂对特征组分的吸附特性	208
8.3.2 吸附剂对特征分解组分吸附量的分析	212
8.4 吸附剂对 SF_6 局放分解的影响特性	213
8.4.1 实验方法	213
8.4.2 不同吸附剂用量下各特征分解组分含量的变化规律	214
8.4.3 吸附剂对主要组分特征量的影响	218
8.5 吸附剂对 SF_6 局部过热分解的影响特性	222
8.5.1 实验方法	222
8.5.2 不同吸附剂用量下主要过热特征分解组分含量的变化规律	223
参考文献	226
第 9 章 影响 SF_6 分解组分特性的其他因素	228
9.1 金属材料对 SF_6 分解特性的影响规律	228
9.1.1 金属材料对 SF_6 分解的影响机制	228
9.1.2 金属材料对 SF_6 分解特征产物的影响	230
9.2 气压对 SF_6 分解特性的影响规律	233
9.3 有机固体绝缘材料对 SF_6 分解特性的影响规律	239
参考文献	241
第 10 章 基于 DCA 故障诊断的影响因素校正	243
10.1 化学反应动力学理论	244

10.1.1 零级反应	245
10.1.2 一级反应	245
10.1.3 二级反应	246
10.2 微水微氧对特征组分含量比值影响的化学动力学分析	248
10.2.1 PD作用下 SF_6 分解的化学反应级数	248
10.2.2 组分浓度与反应物初始浓度之间的关系	249
10.2.3 特征组分含量比值与初始微水微氧浓度之间的关系	250
10.3 微水微氧对特征组分比值影响规律的数学模型	250
10.3.1 数学模型的形式	250
10.3.2 数学模型参数确定	252
10.4 微水微氧对特征组分比值影响的耦合校正	253
10.4.1 微水影响校正	254
10.4.2 微氧影响校正	254
10.4.3 微水微氧影响耦合校正	254
10.4.4 微水微氧校正实例	255
10.5 微水微氧校正局部放电模式识别中的应用	260
参考文献	261
第 11 章 分解组分含量为特征量的故障诊断	262
11.1 SF_6 气体绝缘性能的常规检测	262
11.1.1 SF_6 气体泄漏检测	262
11.1.2 SF_6 杂质成分检测	264
11.2 PD 故障的特征组分	267
11.2.1 PD 导致 SF_6 分解生成特征产物的过程	267
11.2.2 SF_6 分解特征产物与 PD 能量的关系	268
11.3 高能放电性故障(火花放电、电弧放电)的特征组分	270
11.4 局部过热性故障的特征组分	271
11.5 以分解特征组分为特征量的诊断实例分析	274
参考文献	276
第 12 章 以分解组分比值为特征量的故障诊断	280
12.1 比值法的基本原理	280
12.2 SF_6 分解特征组分比值的构建及其物理意义	281
12.2.1 $c(\text{SO}_2\text{F}_2)/c(\text{SOF}_2)$ 的物理意义	282
12.2.2 $c(\text{CF}_4)/c(\text{CO}_2)$ 的物理意义	283
12.2.3 $c(\text{SOF}_2 + \text{SO}_2\text{F}_2)/c(\text{CO}_2 + \text{CF}_4)$ 的物理意义	285
12.3 基于 SF_6 分解特征组分比值的编码树故障诊断方法	288

参考文献	290
第 13 章 以分解组分含量及比值为特征量的决策树故障诊断	291
13.1 决策树理论	291
13.2 决策树的生成和剪枝	293
13.3 基于特征组分比值的决策树建立	295
13.4 基于决策树的绝缘缺陷辨识	295
参考文献	298
第 14 章 以分解组分含量及比值为特征量的模糊聚类故障诊断	299
14.1 模糊聚类的基本原理及方法	299
14.1.1 模糊关系的聚类	299
14.1.2 目标函数的模糊聚类	303
14.2 模糊聚类故障诊断模型与方法	305
14.2.1 基于模糊关系的模糊聚类故障诊断模型及方法步骤	305
14.2.2 基于目标函数的模糊聚类故障诊断模型及方法步骤	307
14.3 案例及分析	310
14.3.1 以分解组分含量为特征量的模糊聚类法案例分析	310
14.3.2 以分解组分含量比值为特征量的模糊聚类法案例分析	312
参考文献	313
第 15 章 以分解组分含量及比值为特征量的支持向量机故障诊断	315
15.1 支持向量机的基本原理及方法	315
15.2 支持向量机优化	319
15.2.1 支持向量机核函数	319
15.2.2 多分类支持向量机	320
15.2.3 支持向量机参数优化	321
15.3 支持向量机故障诊断模型与方法	322
15.3.1 支持向量机故障诊断模型	323
15.3.2 支持向量机故障诊断步骤	324
15.4 绝缘故障诊断实例分析	325
参考文献	328
索引	329

第 1 章 绪 论

1.1 气体绝缘装备分类及特点

中国经济的持续快速发展需要更进一步加快电网建设的步伐。电网建设正朝着远距离、大容量、特高压、智能化方向快速发展。安全、优质和经济供电是现代大电网运行的三大要素,而其中以安全性最为重要。在经济发达国家和新的经济增长体大国,由于电网覆盖面越来越广、结构越来越复杂,一旦发生大面积停电事故,将对各自国家的国民经济、人民生活乃至国家安全造成难以估量的损失。输变电设备既是构建电网的主体,又是引发电网事故的主要源头^[1-3]。因此,世界各国都把建设智能电网作为国家发展战略。我国在实施统一坚强智能电网的中长期战略规划中,亟待从工程技术需求的层面上,解决因输变电装备故障引发电网大面积停电事故的挑战性难题。

气体绝缘装备(图 1.1)是指全部或者部分采用六氟化硫(SF_6)气体作为主要绝缘介质的电力设备,这些设备主要包括气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)、气体绝缘断路器(gas insulated breaker, GIB)、气体绝缘电缆(gas insulated cable, GIC)和气体绝缘变压器(gas insulated transformer, GIT)等。与以空气或矿物油作为绝缘介质的传统电气设备相比,气体绝缘装备因其占地面积小、运行安全可靠、电磁辐射小、检修周期长和现场安装方便等突出优势,自 1967 年首次在德国投运以来,便迅速发展,并广泛应用于电力系统的高压和超/特高压领

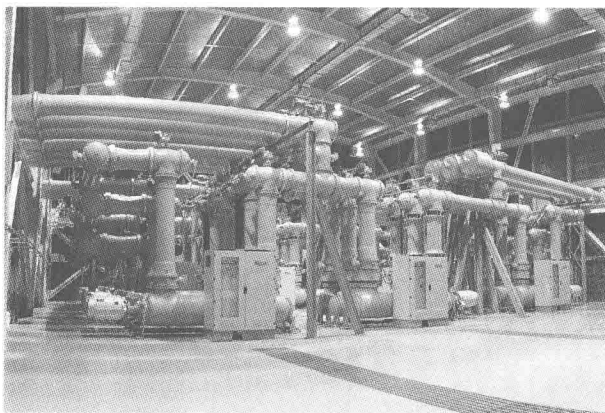


图 1.1 SF_6 气体绝缘装备

域^[3-5],已逐渐成为现代变电站及城市供电系统的首选设备和重要标志之一。另外,目前正在对城市电网中已有的开放型常规变电站逐步进行改造,取而代之的是以 SF₆ 气体绝缘装备为主的封闭式变电站。

常规变电站中,大部分电气设备是暴露在空气中的,占地面积较大。随着我国经济的发展,城市规模不断扩大,用地越来越紧张,建设传统的变电站越来越困难。气体绝缘装备的广泛使用,有效地减少了用地需求,如 110kV 变电站若采用气体绝缘装备,其占地面积仅为传统变电站的 7.6%,500kV 的气体绝缘装备变电站占地面积仅为常规变电站的 2%,电压等级越高,气体绝缘装备与常规变电站相比,占地面积越小。气体绝缘装备是全封闭的,高电压部分被放置于密封的金属外壳之内,采用高气压的 SF₆ 气体作为高强度绝缘介质。因此,设备内绝缘几乎不受外环境的影响:在沿海地区,绝缘不会因盐污而降低;在潮湿地区,绝缘不会因潮气而降低;在化工厂附近,绝缘不会因腐蚀气体而侵蚀。另外, SF₆ 气体绝缘性能和灭弧性能都优于空气,开断大电流的能力强、触头烧蚀较轻,常被用作断路器的灭弧介质。因此,气体绝缘装备故障率低、检修周期长,其主要部件的检修间隔不小于 20 年。此外,气体绝缘装备作为一个整体,可由标准单元(间隔)组合形成,通用性强,现场安装方便,可以大大减少施工费用和施工周期。同时,气体绝缘装备还具有防震性能好、SF₆ 气体不易燃、防火性能好等优点。

1.1.1 气体绝缘组合电器

GIS 是由若干相互连接在一起的独立元件单元(如母线、断路器、隔离开关、接地开关、避雷器、互感器和套管等)组合构成,组合后充入 SF₆ 绝缘气体,故称为气体绝缘组合电器。GIS 有单相封闭式和三相封闭式两类不同结构。三相封闭式比单相封闭式的总尺寸小、部件少、安装周期短,但额定电压高时制造困难。所以通常只在 110kV 及以下电压等级采用全三相封闭式,220kV 时常对断路器以外的其他元件采用三相封闭式,330kV 及以上等级则一般采用单相封闭式结构,有时母线也采用三相封闭式结构。GIS 是 20 世纪 60 年代中期才出现的一种电力装备,我国的第一套 110kV 电压等级的 GIS 是 1971 年研制成功,于 1973 年投入运行的。GIS 的问世,对传统的敞开式高压电力装备来说是一次革命,近年来,GIS 的发展非常迅速,其优点得到国内外电力行业的公认。

1. GIS 的特点

1) 占地面积和空间小

GIS 既可用于敞开式变电站建设,也可用于封闭式变电站建设。在城市供电系统中往往用作封闭式变电站建设。由于母线、断路器、隔离开关、接地开关、避雷器、互感器和套管等元件被全封闭在金属外壳里,并充以高气压的 SF₆,所以,无论

用作敞开式还是封闭式供电系统,都比传统油纸绝缘的高压电气设备占地面积小得多。与常规的敞开式电力设备的占地面积之比可表示为 $k=10/U_n$, 其中 U_n 表示设备的额定电压。从中可以看出,电压等级越高,GIS 节约的占地面积越多。GIS 与敞开式电力设备占有的空间之比要比上述面积之比更小。因此,GIS 特别适用于城区供电变电站以及位于深山峡谷的水电站的升压变电站。在上述情况下,虽然 GIS 的设备费用比敞开式高,但若计及土地、土建的费用以及运行维护费用,GIS 则具有更好的综合经济指标。

2) 安全性高

由于 GIS 的带电部分全部封闭在接地的金属外壳内,可完全防止人员及外物体接触带电体。此外,封闭的金属外壳也使设备的运行免受各种大气污染、雨水、雾气和冰雪等不利环境因素的影响,因而 GIS 设备的工作可靠性更高。

3) 电磁环境友好

GIS 的外壳为金属封闭式,能屏蔽来自设备内部产生的强电磁场,可有效避免对人员和环境的电磁辐射。

4) 安装工作量小、检修周期长

GIS 设备由厂家制作成标准单元,运输到现场后再进行组装,各单元替代性强,安装调试较为容易。由于所有元件均被安装在封闭的金属外壳内,不易受外界环境的干扰,故障率较低,检修周期较长。

正是由于 GIS 设备具有上述不可比拟的优势,再加上 GIS 设备技术的快速进步以及电力输送容量剧增的社会需求,自 21 世纪以来,全球电网 GIS 变电站数量明显增多,GIS 设备在中国电网的应用也日益广泛。据 2010 年、2011 年和 2012 年的高压开关行业年鉴统计,550kV、353kV、252kV、126kV 电压等级 GIS 设备的全国市场销售产量见表 1.1。

表 1.1 近三年各电压等级 GIS 设备全国产量统计 (单位:间隔)

GIS 设备	550kV	353kV	252kV	126kV	合计
2010 年	353	82	3013	9212	12720
2011 年	482	121	3732	9882	14217
2012 年	370	72	4212	12031	16685

2. 母线

单相封闭式母线与前面介绍的单芯刚性 GIC 的结构相同,但三相封闭式母线与三芯式 GIC 的导体布置通常并不完全相同,这是三相封闭式母线有分支出线的缘故。在三相封闭式 GIS 中,导管中心分布在同一圆周上,位于底部的一相导管与其他两相导管相差 90° ,使底部母线的出线与两边相邻母线有足够的绝缘间距。

3. 气体绝缘断路器

GIB 是在断路器里充入高压力的 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质,故称为气体绝缘断路器。它属于气吹断路器,与空气断路器不同的地方主要表现在:一是工作气压较低;二是在吹弧过程中,气体不排向大气,而在封闭系统中循环使用。由于 SF₆ 气体绝缘介质的灭弧性能是空气的 100 倍,并且灭弧后不变质,可重复使用,因此,GIB 具有开断能力强、断口电压较高、允许连续开断次数较多、适用于频繁操作、噪声小、无火灾危险、触点磨损少等优点,是一种性能优异的“少维修”断路器,在高压、超/特高压电网中被极为广泛地应用。

GIB 主要分为双压式和单压式两种。最早的 GIB 是根据压缩空气断路器的气吹灭弧原理设计的。现在的 GIB 通常采用全封闭结构,选择 0.3MPa(压力表)低气压 SF₆ 气体作为断路器内部的绝缘介质,在灭弧室内则选择充以 1.5MPa(压力表)高气压 SF₆ 气体作为灭弧介质。虽然双压式 GIB 工作性能良好,但其内部必须配置一台气体压缩机,导致该形式的 GIB 结构复杂、价格昂贵。同时,灭弧室内 1.5MPa(压力表)高气压 SF₆ 气体的液化温度高,使得 GIB 的工作温度必须保持在 8℃ 以上,因此,在低温环境中必须采取加热措施,这制约了 GIB 的广泛使用。因此,双压式 GIB 很快就被第二代 GIB 即单压式 GIB 取代。

单压式 GIB 外形上与双压式 GIB 并无多大差别,其内部只有一种压力,一般为 0.6MPa(压力表),并依靠压气作用实现气吹灭弧。与双压式 GIB 相比,具有结构简单、开断电流大、气体压力低、在低温环境中不需要外设加热装置等优点。但在单压式断路器灭弧之前,压气有一定的预压缩过程,故断路器的分闸时间较长。此外,为了满足压气的要求,在分闸过程中,单压式断路器所需要的策动力要比其他断路器大。单压式 GIB 一经问世就受到用户的欢迎。20 世纪 80 年代中期,对断路器气流程和电场的深入研究,使得其额定开断电流和断口的电压得到提升,性能更加优越。目前,额定开断电流最高已到达 80kA,单断口的电压也由早期的 126kV 提高到 360kV、420kV 甚至 550kV。随着我国特高压电网的建设,目前,我国已研制出 1100kV、开断电流达 132kA 的特高压 GIB。

4. 隔离开关

GIS 中的隔离开关为拉动式结构,可以做成三相封闭式或单相封闭式,操作系统可分电动机、电动机-弹簧机构和手动操作等方式。隔离开关应具有表示其分、合闸位置的可靠标识装置,也可根据用户要求设置观察出头位置的观察窗。隔离开关应按需要具备分、合感性小电流和容性小电流以及环流的能力。

5. 接地开关

接地开关是用来保障维修人员人身安全的,它常与隔离开关和电缆终端组合

在一起。快速接地开关还具有关、合一定额定电流的能力。当 GIS 内部发生电弧接地故障时,快速闭合接地开关,以减小故障电弧的破坏。装在线路侧的接地开关应有开断临近带电线路产生的感应电流能力。因此,快速接地开关的操作机构应符合交流高压断路器标准中有关操动机构的要求。接地开关应有表示其分、合闸位置的可靠指示装置。若用户要求,应设置可观察触头位置的观察窗。

6. 电压互感器

早期的 GIS 曾采用过电容式电压互感器,但实际使用效果并不理想。后来的 GIS 多采用气膜绝缘的电磁式电压互感器,使得 GIS 的尺寸大大缩小。电磁式电压互感器的高压绕组为宝塔形的多层圆筒式结构。为了改善电场的均匀性,使用了高压屏蔽电极和接地屏蔽电极。为进一步缩小 GIS 的体积并简化制造工艺,在超高压 GIS 中,使用了带电子放大器的电容分压器,以取代传统的电磁式电压互感器。带放大器的分压器额定负载比电磁式电压互感器小,但由于现代电力系统采用数字式继电保护、控制装置以及能耗小的测量装置,这为分压器的应用提供了有利条件。分压器高压臂电容应具有较小值,主要取决于分压器负载和放电器的输入阻抗,一般为几十皮法。带放大器的电容分压器的主要优点是:绝缘简单可靠、体积小和对隔离开关操作引起的暂态电压的响应好等。

7. 电流互感器

GIS 中电流互感器的绝缘技术是比较简单的,通常采用环状铁心式结构。互感器的初级和次级之间的绝缘与 GIS 母线对外壳的绝缘相似,也是完全靠 SF_6 气体绝缘的。有的厂家将电流互感器和电容分压器做在一起,即将接地的屏蔽电极套在一个对地绝缘的非磁性金属套管上,二者之间有薄的绝缘层,这样,高压导体与这一金属管就构成分压器的高压臂电容。环状铁心电流互感器成本低,工作可靠。

8. 避雷器

在 GIS 发展初期,通常将具有火花间隙的碳化硅避雷器安装在 GIS 之外。如果需要在 GIS 里装设避雷器,结构就变得比较复杂。这是因为避雷器间隙在 SF_6 气体中冲击放电电压的分散性很大,所以用于 GIS 的碳化硅避雷器是充氮气的。这种情况下,避雷器的密封性必须非常好,因为 GIS 中的 SF_6 气体只要有少量渗漏到避雷器中,就会使避雷器的放电电压明显提高而失去保护作用。随着氧化锌避雷器的出现,GIS 中的避雷器问题就变得非常简单了。金属氧化物电阻片的非线性特性比碳化硅好得多,在小电流区电阻片具有负的电阻温度系数,在最高运行电压下,流过电阻片的电流仅为数十微安。因此,避雷器中没有串联火花间隙,这