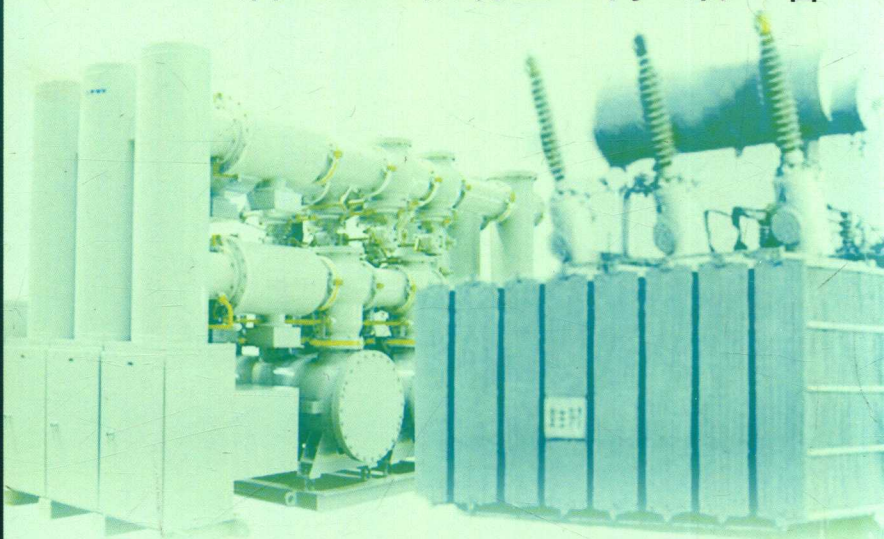


# 高压电气设备局部放电 检测传感器

唐 炬 张 晓 星 肖 淞 著



科学出版社

# 高压电气设备局部放电检测传感器

唐 炬 张 晓 星 肖 淞 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

电气设备的局部放电既是加速绝缘劣化的主要因素,又是有效表征绝缘缺陷的重要参量,对局部放电进行准确监测(检测),可以及时发现危及设备安全的潜在绝缘故障,实现对电气设备绝缘的在线监测与故障诊断及状态评估,具有重要的理论和工程实用价值。本书紧密围绕电气设备局部放电的特点、用于局部放电检测的各类传感器的工作原理、性能提升与评估以及传感器在各类电气设备局部放电监测中的应用,从局部放电信号的电测法、非电测法、气体分解组分法和传感技术应用等方面展开系统全面的论述,为电气设备局部放电监测提供理论和技术方面的指导。

本书适合从事电气设备设计、制造和运行维护等工作的人员阅读和参考,也可作为高等院校相关专业的研究生和高年级本科生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高压电气设备局部放电检测传感器 / 唐炬, 张晓星, 肖淞著. —北京: 科学出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-03-052575-8

I. ①高… II. ①唐… ②张… ③肖… III. ①高压电气设备-局部放电-检测 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 084294 号

责任编辑: 张海娜 王 苏 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 450 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

安全、可靠、优质和经济供电是现代大电网的基本要求,其中安全和可靠尤为重要,不仅关系国民经济发展,而且直接影响人民生活乃至社会公共安全。一旦电网发生大面积停电事故,造成的经济和社会损失不可估量。构成电力系统的主体是输变电一次设备,它们承担着电网运行各个环节的重要任务,其安全可靠运行是直接保障电网供电可靠性的基石。目前,对于国内外电网大停电事故的原因和电网中存在的主要问题,国内外更多地强调问题出在电网运行本身上,而对电气设备自身故障引发的电网事故不够重视。事实上,电气设备安全是电网安全的第一道防线。

大型输变电一次设备在设计、制造、运输、安装、调试和运行过程中,其内部会不可避免地存在金属遗留物(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绝缘缺陷,这些缺陷在运行电压下会产生局部放电(partial discharge, PD)。PD有“绝缘肿瘤”之称,它会进一步损伤绝缘材料,而绝缘材料的损伤又会加重PD的发展,从而形成恶性循环,最终可能导致设备绝缘能力完全丧失。因此,PD既是加速绝缘劣化最主要的原因,又是表征绝缘状态最有效的特征量。对PD进行准确监测(检测),可以及时发现危及设备安全的潜在绝缘故障,实现对电气设备绝缘的在线监测与故障诊断及状态评估,为电气设备的检修提供参考依据,及时预防和阻止严重电网事故的发生。

PD检测技术的发展受到电力系统、电气设备制造商等相关领域的广泛关注。国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)和我国相关研究机构都在PD的测量原理和方法等方面作了具体规定,并制定了一系列标准。目前,随着数字化技术和传感器技术的迅猛发展,电气设备的PD检测技术也有了较快的发展。

本书以用于电气设备PD检测的传感器为主要研究对象,对各类PD检测方法所采用的传感器的性能要求、原理及性能提升、与不同电气设备的适应性和评价标准进行了深入分析和探讨。全书共12章:第1章综述大型电力变压器、气体绝缘装备和电力电缆等主要电气设备内部常见绝缘故障及PD检测方法;第2章详细介绍PD检测传感器的基本参数、环境参数和可靠性等各项指标;第3章着重介绍PD脉冲电流法原理,并对不同类型的脉冲电流传感器及其评价标准进行深入探讨;第4章首先介绍特高频传感器的表征参数,然后介绍适应于不同电气设备PD检测的多类特高频传感器,并提出其评价标准;第5章着重分析PD产生超声波的机理及其传播规律,介绍常用的超声传感器及评价标准;第6章介绍不同介质中

PD 的光谱特性,对紫外、光纤和红外等光测技术及评价标准进行探讨;第 7 章对检测 PD 特征分解组分的电化学气敏传感器及评价标准进行详细介绍;第 8 章对检测 PD 特征分解组分的纳米传感器的掺杂、制备和表征等进行研究和阐述,并提出其评价标准;第 9 章介绍 PD 特征分解组分的光谱检测方法及传感器的性能参数;第 10 章介绍不同检测手段在电力变压器 PD 检测中的应用;第 11 章介绍不同检测手段在气体绝缘设备 PD 检测中的应用;第 12 章着重围绕电力电缆介绍不同的 PD 检测手段的应用。唐炬负责撰写第 1~3 章、第 5~7 章,并负责全书统稿和各章的修改及审定;张晓星负责撰写第 4、8、9 章,并协助统稿和出版过程中的相关工作;肖淞负责撰写第 10~12 章;曾福平协助完成第 5、6 章;潘成协助完成第 1、12 章;杨东博士负责全书图形和曲线的绘制。

本书是作者及其研究团队近 20 年对电气设备局部放电检测(监测)中的放电机理及传播特性、传感器技术、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,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),国家自然科学基金面上项目“组合电器中混合绝缘缺陷局部放电机理及模式识别研究”(50377045)、“用复小波(包)提取 GIS 复杂电场中局部放电信号研究”(50577069)、“GIS 缺陷诱发突发性故障与绝缘状况评判的基础研究”(50777070)、“超高频局部放电源信号畸变校正及重积分定量标定的基础研究”(50977095)和“流动状态下工程纯油绝缘介质的放电特性与击穿机理及影响因素研究”(51377181),以及重庆大学输配电装备与系统安全及新技术国家重点实验室自主研究经费等的持续资助。研究团队的魏刚、曹政钦、张永泽、桂银钢、肖哈艳和凌超等博士以及孟凡生、陈秦川、代自强、喻蕾、吴晓晴、李新、程政和张戩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中得到了重庆、广东、新疆、江苏、山东、海南和贵州等省、市、自治区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,南方电网科学研究院的李立浯院士、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,并给予了热情的支持和帮助,在此表示诚挚的感谢!同时,本书还引用了国内外同行在本领域研究所取得的初步成果,也一并表示谢意!

在电网建设高速发展的今天,希望本书的出版能为广大读者以及电力行业的工作人员提供一些技术上的帮助。

由于作者水平有限,加之电气设备的 PD 检测技术正在迅速发展,本书疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者  
2017 年 2 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 气体绝缘组合电器结构	1
1.1.1 气体绝缘组合电器的总体结构	1
1.1.2 气体绝缘组合电器的应用与发展	5
1.2 电力变压器结构	6
1.2.1 电力变压器的总体结构	6
1.2.2 电力变压器的分部构成	7
1.3 局部放电的危害、产生及发展过程	9
1.3.1 局部放电对电气设备绝缘的危害	9
1.3.2 局部放电的产生与发展过程	9
1.4 局部放电检测方法与评价	11
1.4.1 非电检测法	12
1.4.2 局放分解组分检测法	12
1.4.3 电检测法	13
1.4.4 各种主要检测方法的比较	15
1.5 传感器在局部放电检测中的应用	15
参考文献	17
第 2 章 传感器评价指标	18
2.1 基本参数指标	18
2.1.1 量程指标	19
2.1.2 灵敏度指标	19
2.1.3 精度指标	21
2.1.4 动态性能指标	23
2.2 环境参数指标	27
2.2.1 温度指标	28
2.2.2 抗冲振指标	28
2.2.3 大气环境参数	28
2.3 可靠性指标	29
2.4 其他指标	29

2.4.1	电源	29
2.4.2	结构	29
2.4.3	安装连接	30
	参考文献	30
<b>第3章</b>	<b>脉冲电流传感器</b>	<b>31</b>
3.1	脉冲电流法原理	31
3.2	脉冲电流法传感器的分类	32
3.2.1	检测阻抗传感器	32
3.2.2	罗氏线圈传感器	37
3.2.3	光学电流传感器	43
3.3	脉冲电流法传感器评价标准	50
3.3.1	传感器检测灵敏度	50
3.3.2	脉冲分辨率	51
3.3.3	放电量校正	52
3.3.4	检测阻抗传感器评价标准	53
3.3.5	罗氏线圈评价标准	54
3.3.6	光学电流传感器评价标准	55
	参考文献	56
<b>第4章</b>	<b>特高频传感器</b>	<b>58</b>
4.1	特高频传感器的基本概念及表征参数	59
4.1.1	特高频传感器接收原理	59
4.1.2	方向图	60
4.1.3	方向性系数	61
4.1.4	天线效率	62
4.1.5	增益	62
4.1.6	驻波比	62
4.1.7	输入阻抗	63
4.1.8	极化方式	64
4.1.9	带宽	65
4.2	应用于气体绝缘组合电器中的特高频传感器	66
4.2.1	内置型圆盘传感器	66
4.2.2	微带天线传感器	69
4.2.3	横向电磁波喇叭天线传感器	75
4.2.4	分形天线传感器	82
4.2.5	平面等角螺旋天线传感器	88

4.3	应用于变压器的特高频传感器	94
4.3.1	套筒单极子天线传感器	95
4.3.2	终端加载的领结形天线传感器	101
4.3.3	对跖 Vivaldi 天线传感器	104
4.4	应用于电缆的特高频传感器	115
4.5	特高频传感器评价标准	119
4.5.1	基本参数指标	119
4.5.2	环境参数指标	120
4.5.3	可靠性指标	120
4.5.4	其他指标	120
	参考文献	120
<b>第5章</b>	<b>超声波传感器</b>	<b>124</b>
5.1	局部放电产生超声波的机理	124
5.1.1	电-力-声类比	125
5.1.2	局部放电产生超声波机理	126
5.1.3	局部放电产生声波的特性	128
5.2	传感器接收的超声波特征量	132
5.2.1	放电量与超声波特征量的定量关系	132
5.2.2	局部放电模式与超声波的定性关系	136
5.2.3	超声波法测量局部放电的现象解释	136
5.3	超声传感器的基本概念	137
5.3.1	超声传感器的原理	137
5.3.2	局部放电超声信号的传播规律	137
5.3.3	超声传感器的分类	140
5.4	常用超声传感器	141
5.4.1	压电晶体传感器	141
5.4.2	局部放电超声光纤传感器	143
5.4.3	局部放电超声阵列传感器	146
5.4.4	超声传感器选型对比	148
5.4.5	常见超声传感器及设备	149
5.5	超声传感器评价标准	152
5.5.1	基本参数指标	152
5.5.2	环境参数指标	152
5.5.3	可靠性指标	152
5.5.4	其他指标	153



参考文献 .....	153
<b>第 6 章 光测量传感器</b> .....	157
6.1 光测法检测的原理与优势 .....	157
6.2 局部放电光谱特性 .....	158
6.2.1 空气中的局部放电光谱 .....	158
6.2.2 变压器油中的局部放电光谱 .....	161
6.2.3 GIS 中 SF <sub>6</sub> 的局部放电光谱 .....	164
6.3 光测法技术 .....	166
6.3.1 紫外传感技术 .....	166
6.3.2 光纤传感技术 .....	173
6.3.3 红外检测技术 .....	184
6.4 光测法传感器评价标准 .....	190
6.4.1 紫外光参数指标 .....	190
6.4.2 荧光光纤传感器参数指标 .....	191
6.4.3 红外热像仪性能指标 .....	193
参考文献 .....	194
<b>第 7 章 电化学气体传感器</b> .....	197
7.1 电气设备局部放电常见特征分解组分 .....	197
7.2 电化学气敏传感器检测机理与特性 .....	198
7.3 常见气体检测仪 .....	201
7.3.1 气相色谱仪 .....	201
7.3.2 气相色谱-质谱联用仪 .....	206
7.3.3 傅里叶变换红外光谱仪 .....	209
7.3.4 烟气分析仪 .....	211
7.3.5 SF <sub>6</sub> 分解产物测试仪 .....	213
7.4 电化学气体传感器分类 .....	214
7.4.1 金属氧化物半导体式传感器 .....	215
7.4.2 催化燃烧式传感器 .....	217
7.4.3 定电位电解式气体传感器 .....	218
7.4.4 伽伐尼电池式氧气传感器 .....	220
7.4.5 光离子化传感器 .....	220
7.5 电化学气体传感器评价标准 .....	223
7.5.1 基本参数指标 .....	223
7.5.2 环境参数指标 .....	224
7.5.3 交叉干扰 .....	224

参考文献	225
<b>第 8 章 纳米气敏传感器</b>	<b>227</b>
8.1 纳米气敏传感器现状与传感原理	227
8.2 常见纳米气敏传感器	229
8.2.1 二氧化钛气敏传感器	229
8.2.2 碳纳米管气敏传感器	232
8.2.3 石墨烯气敏传感器	236
8.2.4 有机聚合物气敏传感器	240
8.3 纳米气敏传感器的掺杂与改性	244
8.3.1 掺杂与改性研究方法及气敏试验设备	244
8.3.2 金属掺杂	246
8.3.3 官能团修饰	258
8.3.4 有机高分子掺杂	262
8.4 纳米气敏传感器的形貌表征手段	265
8.4.1 X 射线衍射	266
8.4.2 扫描电子显微镜	267
8.4.3 透射电子显微镜	269
8.4.4 比表面积表征	270
8.5 纳米气敏传感器的评价标准	271
8.5.1 灵敏度和稳定性	271
8.5.2 响应时间和恢复时间	272
8.5.3 选择性	272
8.5.4 线性度	272
参考文献	272
<b>第 9 章 光谱类气体传感器</b>	<b>276</b>
9.1 特征分解气体常用光谱检测手段	276
9.1.1 红外光谱分析技术	276
9.1.2 紫外-可见光谱分析技术	278
9.1.3 拉曼光谱分析技术	280
9.2 光谱检测法常用传感器分类	280
9.2.1 光电探测器	280
9.2.2 声探测器	282
9.3 常用传感器及其主要的性能参数	283
9.3.1 热释电型探测器	283
9.3.2 光电二极管	286

9.3.3	CCD型传感器	289
9.3.4	驻极体电容式传声器	293
9.3.5	石英音叉	295
9.4	光学检测法传感器的应用及发展	297
	参考文献	299
<b>第10章</b>	<b>电力变压器局部放电监测</b>	<b>301</b>
10.1	电力变压器局部放电超声波检测	301
10.1.1	案例一:间歇性局部放电检测	301
10.1.2	案例二:局部放电三维定位	306
10.1.3	案例三:悬浮电位放电故障	308
10.2	电力变压器局部放电及局部过热光测法检测	309
10.2.1	案例一:散热器堵塞故障	309
10.2.2	案例二:绝缘管母护套破裂	312
10.3	变压器油中溶解气体检测法	315
10.4	多种方法联合检测变压器局部放电	316
	参考文献	320
<b>第11章</b>	<b>气体绝缘设备局部放电监测</b>	<b>321</b>
11.1	局部放电超声波检测	321
11.1.1	案例一:GIS设备中的CT故障	321
11.1.2	案例二:CT引线电蚀磨损	322
11.1.3	案例三:GIS内部金属悬浮缺陷	323
11.1.4	案例四:绝缘表面脏污导致沿面放电	325
11.2	局部放电的化学分析法检测	330
11.3	局部放电特高频法检测	332
11.3.1	案例一:杂质引起沿面放电	332
11.3.2	案例二:GIS内部悬浮电位放电	334
11.3.3	案例三:内锥绝缘子裂缝缺陷	336
	参考文献	337
<b>第12章</b>	<b>电力电缆局部放电监测</b>	<b>338</b>
12.1	局部放电脉冲电流法检测	338
12.1.1	案例一:电缆内部故障	338
12.1.2	案例二:电缆连接处故障	341
12.1.3	案例三:电缆尾部故障	342
12.2	局部放电特高频法检测	343
12.2.1	案例一:电缆本体故障	343

---

12.2.2 案例二:电缆终端缺陷 .....	344
12.3 局部放电红外测温检测 .....	346
12.3.1 案例一:电流型缺陷 .....	346
12.3.2 案例二:电压型缺陷 .....	348
参考文献 .....	350
索引 .....	351

# 第 1 章 绪 论

在整个电力系统中,输变电一次设备担负着从发电、输电、变电、配电和用电的全部工作任务,其性能、功用及运行状态将直接影响电力系统的安全与稳定运行。气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)和大型电力变压器等是输变电一次设备最重要的电气设备,其内部存在的各种潜伏性缺陷,在运行电压下会产生不同程度和形式的局部放电(partial discharge, PD),PD产生的强电磁陡脉冲和局部过热会不同程度地加速绝缘材料的损伤,使其绝缘性能逐步下降,绝缘材料的损伤又加重产生 PD,从而进一步加快绝缘材料的劣化,以致形成恶性循环,导致绝缘击穿性损坏,最终可能因设备故障而引发电网大面积停电的严重事故。

本书以 GIS 和大型电力变压器的绝缘检测(监测)为主要研究对象,详细介绍检测电气设备 PD 的各类传感器及其检测方法。本章在介绍两种电气设备结构特点的基础上,分析其内部 PD 的危害、产生及发展过程,并依据其内部结构的特点及绝缘介质的特性归纳相应的 PD 检测方法,最后总结与各种检测方法对应的传感器在 PD 检测中的应用。

## 1.1 气体绝缘组合电器结构

### 1.1.1 气体绝缘组合电器的总体结构

GIS 是 20 世纪 60 年代中期才出现的一种新型电器装置,它是把变电所里各种电气设备除变压器外全部组合装配在一个封闭的金属外壳里,常充以 0.4~0.5MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体,以实现导体对外壳、相间以及断口间的可靠绝缘<sup>[1]</sup>。GIS 是由若干相互直接联结在一起的单独元件,如母线、断路器、隔离开关、接地开关、避雷器、互感器等构成。GIS 与传统敞开式高压配电装置相比,具有占地面积小、结构非常紧凑、安装快、不受外界环境的影响(如污染等)、运行可靠性高、检修周期长和安装方便等优点<sup>[1,2]</sup>,因此,GIS 设备自问世以来,受到使用者的青睐。

随着城市建设规模的不断扩大和现代化发展,建设敞开式的变电站已变得更加困难。由于 GIS 结构非常紧凑,整个装置的占地空间大为缩小,其占地面积可小到户外变电站的 30%<sup>[3]</sup>,且随着电压的升高,占地显著减小。近年来,在国内大城市主城区,特别是在城市高密度建筑群中,新建的变电站基本上都采用 GIS 设备,可以大大缓解城市建设用地的紧张,为此,GIS 设备被越来越广泛地应用于高压、

超高压以及特高压输变电系统中,已成为新建变电站的主要设备之一。

GIS可以按照多种方式分类,如安装场所、结构形式、绝缘介质及主接线等方式。

按照安装场所,可分为户外型和户内型。这两种类型结构基本相同,只是户外型需要附加防气候措施,以适应户外环境;而户内型的运行环境较为稳定。

按照结构形式,可分为圆筒形和矩形。圆筒形 GIS 依据主回路配置方式的不同,又可分为单相壳形、部分三相一壳型、全三相一壳型、复合三相一壳型等。

按照绝缘介质,可分为全 SF<sub>6</sub> 气体绝缘型和部分 SF<sub>6</sub> 气体绝缘型两种。

按照主接线图,可分为单母线、双母线、单(双)母线分段、桥形接线、3/2 断路器接线<sup>[4]</sup>。

依据当前 GIS 的制造成本和技术水平,一般情况下,110kV 及以下电压等级的 GIS 设备大都采用三相共箱结构,500kV 及以上电压等级的 GIS 设备大都采用单相单箱结构。因此,实际应用中,需要根据电压等级高低以及 GIS 变电站规模大小,合理选择 GIS 设备结构及其间隔数量。特高压 1000kV 兰江站室外 GIS 现场布置示意如图 1.1 所示。

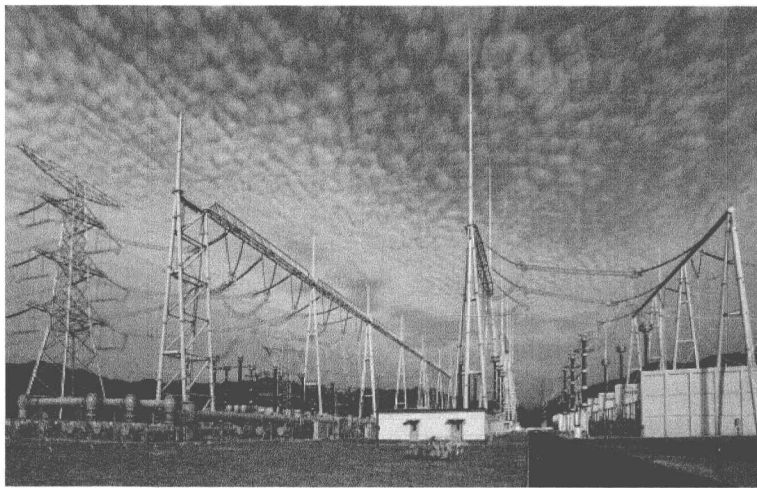


图 1.1 特高压 1000kV 兰江站室外 GIS 设备

GIS 设备的基本元件包括断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、套管、母线及密度监视装置等。

### 1. 断路器

断路器是 GIS 设备的核心元件,主要是由灭弧室和操动机械结构组成。灭弧室封闭在充有一定压力的 SF<sub>6</sub> 气体壳体内。断路器分为单压式和双压式两种,目

前广泛使用的是单压式断路器。由于其结构简单,使用内部压力一般为 $0.5\sim 0.7\text{MPa}$ ,且预压缩行程较大,因此分闸时间和金属短接时间均较长。单压式断路器的断口可以垂直布置,也可以水平布置。水平布置的特点是两侧出线孔需支持在其他元件上,检修时灭弧室由端盖方向抽出,因而没有起吊灭弧室的高度要求,但侧面则要求有一定的宽度。断口布置的断路器,出线孔布置在两侧,操动机构一般作为断路器的支座,检修时灭弧室垂直向上吊出,配电室高度要求较高,但侧面距离一般比断面水平布置的断路器要小<sup>[4]</sup>。

## 2. 隔离开关

隔离开关是由绝缘子壳体和不同几何形状导体构成的最佳布置。铜触头用弹簧加载,使隔离开关具有高的电性能和机械可靠性。隔离开关必须精心设计和试验,使其能开断小的充电电流,而不产生过高的过电压,否则会发生对地闪络。隔离开关和接地开关的操动机构对于大多数 GIS 为同一设计,其主要特点是电动或手动操作。利用电气连锁可以防止误操作,同时,在终端位置可机械连锁。

## 3. 接地开关

常用的接地开关按其功能分为两种类型:一种是设备检修用接地开关,用于变电站内作业时的保护,只有在高压系统不带电情况下可操作;第二种是快速关合接地开关,可在全电压和短路条件下关合,其快速关合操作主要靠弹簧合闸装置来实现。

## 4. 电压互感器

电压互感器按其原理可分为电磁式和电容式两种类型,既可以满足横式安装,也可以满足卧式安装,且直接接在 GIS 设备内的母线管上,为了方便连接,通常制作成一个独立的气室间隔。电磁式电压互感器主要用在 $110\text{kV}$ 及以下的 GIS 设备,电容式电压互感器主要用在 $220\text{kV}$ 及以上的 GIS 设备。使用中严禁电压互感器二次绕组侧发生短路故障,以防止因短路引起二次侧电流剧增而烧坏设备与危及人身安全。

## 5. 电流互感器

GIS 设备中的电流互感器通常有两种结构:一种是以 $\text{SF}_6$ 为主绝缘而安装在金属壳内的穿心式结构,既可用于断路器侧,又可用于母线侧;另一种是开口式电缆结构,只能用于母线侧。当电流互感器空接头时,一定要用较粗的铜线将其接线柱短接,以防因开路引起二次侧产生高压以损伤相应设备和危及人身安全。GIS 设备逐渐趋向小型化、模块化、智能化,出现了电子式电流互感器的应用。由于不

同 GIS 设备厂家采用的结构系列不同,生产 GIS 设备用的电流互感器也各有差异。电子式电流互感器采用罗柯夫斯基(Rogowski)电流传感器技术来测量电流,具有较宽的线性特性,保证了在所测量或保护的电流范围内不会出现饱和情况。

## 6. 避雷器

用 SF<sub>6</sub> 绝缘的避雷器的主要元件与普通避雷器相同,但它结构很紧凑,火花间隙元件与大气密封隔绝,整个避雷器用干燥压缩气体绝缘,其性能高度稳定。因此,有可能使用配置较低的火花放电电压的避雷器,它对系统的保护提供了足够的裕度。与普通避雷器相比,可放电电压过冲减小 10%。在 SF<sub>6</sub> 绝缘避雷器中,由于金属接地部分与带电部分靠得很近,避雷器元件上的电位分布是非线性的,因此在结构设计上要特别注意沿元件的电位补偿。

## 7. 套管

SF<sub>6</sub> 充气套管是 GIS 设备与油浸电力变压器或架空线或电缆连接的主要部件,其套管内充入一定压力的 SF<sub>6</sub> 气体。为了防止 GIS 设备上的环流扩大到主变压器上,以及防止主变压器运行时产生的电磁振动传至 GIS 设备上,在 SF<sub>6</sub> 充气套管上设有绝缘垫和伸缩节。

## 8. 母线

母线结构分为分相式和三相共筒式两种。前者将单相母线安装在接地的金属圆筒中间,用盆式绝缘子支撑,可避免相间故障;后者将三相母线采用对称三角布置在一个共同接地的金属圆筒内,各相母线间及金属圆筒分别采用绝缘子三角对称支撑,而金属圆筒内的空间绝缘主要由 SF<sub>6</sub> 气体绝缘介质承担。

## 9. 气体密度监视装置

SF<sub>6</sub> 气体绝缘开关设备的绝缘强度及 SF<sub>6</sub> 断路器的开断能力与 SF<sub>6</sub> 气体密度有关,而气体的密度随温度而变,故需监视 SF<sub>6</sub> 气体密度,为此设置了密度监视装置(实际中密度的控制是通过监视 SF<sub>6</sub> 气压来实现的<sup>[5]</sup>)。间隔绝缘子分隔的每个独立气室,必须各自安装密度监视装置。

密度监视装置可按工作原理、结构形式和安装方式分类:

(1) 按工作原理分为有指针和有刻度或数字的密度表,带电触点或能实现控制功能的密度继电器。

(2) 按结构形式分为弹簧管式、波纹管式和数字式。

(3) 按安装方式分为径向安装、轴向安装和其他安装方式。

SF<sub>6</sub> 气体密度监视装置用于 GIS 中,其本身也可能成为一个漏点,因此要求



SF<sub>6</sub>气体密度监视装置的漏气率不大于  $10^{-9}$  Pa · m<sup>3</sup>/s。

### 1.1.2 气体绝缘组合电器的应用与发展

由于 GIS 设备与敞开式变电站设备相比具有不可比拟的优势,加上 GIS 设备技术快速进步和中国电力输送容量剧增,自 21 世纪以来,全国电网用 GIS 设备为主的变电站明显增多,GIS 设备在中国电网的应用日益广泛。据 2014 年高压开关行业年鉴统计,2005~2014 年 550kV GIS 设备的全国产量情况见图 1.2。

根据世界各国的经验可知,对于高电压等级的 GIS 设备来说,减小断路器的断口数,就能有效地使 GIS 设备小型化、轻量化。对于较低电压等级的 GIS 设备来说,实现三相共筒化和复合化,就能有效地使 GIS 设备小型化和轻量化。同时,GIS 设备也朝着元件多功能化和监控诊断智能化方向发展。

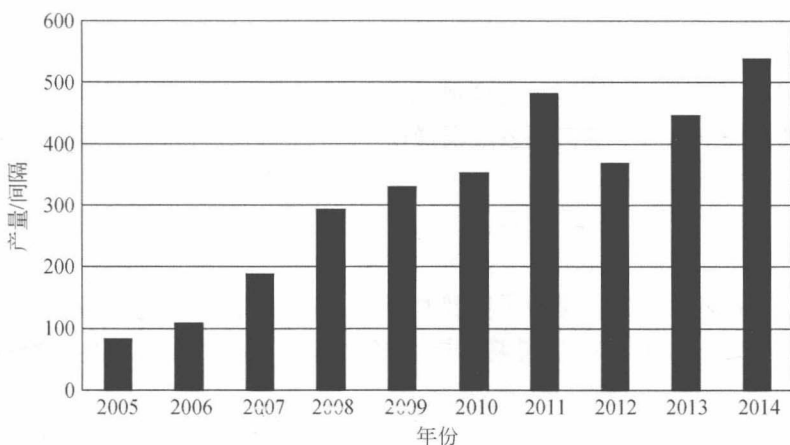


图 1.2 2005~2014 年 550kV GIS 设备全国产量统计

#### 1. 三相共筒化

一些发达国家都在大力发展三相共筒化结构,尤以日本参数做得最高,其实现了 300kV 电压等级的 GIS 设备全三相共筒化结构、550kV 电压等级的 GIL 母线三相共筒化结构。三相共筒化结构在各大制造公司的 GIS 产品中占有相当大的比例。

三相共筒化结构代表着 GIS 设备在较低电压等级的发展方向。所谓三相共筒化结构,是指将主回路元件的三相装在一个圆筒的接地外壳内,通过环氧树脂浇注绝缘子对高压电极加以支撑和电位隔离。这种 GIS 设备结构紧凑,一般可缩小占地面积 40% 以上。由于壳体数量减少,可大大节省材料;又由于密封点数和长度减少,漏气率低;还可减少涡流损失和现场安装工作量。