



组合电器设备局部放电

特高频检测与故障诊断

唐炬 张晓星 曾福平 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

组合电器设备局部放电特高频 检测与故障诊断

唐 炬 张晓星 曾福平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书就最能反映设备内绝缘故障特征与程度的特高频局部放电信号传播、传感、噪声去除、特征提取、故障识别、定位和放电量标定等关键科学技术难题进行深入分析与探讨。第1章综述GIS设备PD监测方法和意义,第2章分析GIS设备内部UHF电磁波传播特性,第3章分析GIS设备内绝缘缺陷的UHF PD信号波形特征,第4章介绍用于检测GIS设备UHF PD的各种内外置传感器,第5章建立UHF PD信号数学模型,第6章分析GIS设备监测现场的噪声特点及去噪效果评价体系,第7章采用小波去除噪声,第8章利用复小波变换抑制白噪声干扰,第9章利用谐波复小波抑制周期性窄带干扰,第10章介绍PD模式识别方法,第11章介绍PD信息融合技术,第12章介绍GIS设备PD定位技术,第13章探讨PD放电量标定原理及方法,第14章介绍GIS设备UHF PD监测装置,第15章结合现场应用进行实例分析。

本书是作者对GIS设备内部PD信号传感、提取、定位和标定等关键科学与技术难题进行多年系统研究的工作总结,为建立GIS设备绝缘故障专家诊断系统提供理论和技术方面的指导,适合作为从事电器设备研究、GIS设备制造、运行人员以及高等院校研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断/唐炬,张晓星,曾福平著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-047548-0

I. ①组… II. ①唐…②张…③曾… III. ①组合电器-局部放电-特高频-检测 ②组合电器-局部放电-特高频-故障诊断 IV. ①TM5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第044425号

责任编辑:张海娜 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

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6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:28 1/2

字数:573 000

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2011年,国家制定的第十二个五年规划纲要当中明确将“建设与发展特高压等大容量、高效率、远距离先进输电技术,推进智能电网建设”纳入其中,至此,以超/特高压输电为特征的智能电网建设已经上升为国家战略,同时我国已进入电网建设高峰期。

以 SF_6 气体作为主要绝缘介质的金属全封闭开关系统,即气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS),因其占地面积小、运行可靠、电磁辐射小以及检修周期长等突出优点,正广泛应用于高压和超/特高压输变电领域中,同时也是现代城市供电系统新建变电站和城网改造的首选装备,是构成超/特高压电网和现代城市电网的重要装备之一,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 GIS 设备的运行可靠性很高,但国际大电网委员会(CIGRE)统计和我国电力运行公报表明:运行中的 GIS 设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的 GIS 设备中。大量的研究表明, GIS 设备绝缘故障前,往往会产生局部放电(partial discharge, PD), PD 既是加速绝缘劣化最为主要的原因,又是表征绝缘状态最为有效的特征量。通过对 GIS 设备内部 PD 过程中所产生的特高频(ultra-high frequency, UHF)信号进行监测,能够作为保证 GIS 设备安全可靠运行的主要技术手段,其主要难点是从强烈的电磁干扰环境中准确获取 PD 信号、确定 PD 源并定量估算 PD 量的大小。

本书就最能反映设备内绝缘故障特征与程度的 UHF PD 信号传播、传感、噪声去除、特征提取、故障识别、定位和放电量标定等关键科学技术难题进行深入分析与探讨。第 1 章综述 GIS 设备 PD 监测方法和意义;第 2 章分析 GIS 设备内部 UHF 电磁波传播特性;第 3 章分析 GIS 设备内绝缘缺陷的 UHF PD 信号波形特征;第 4 章介绍用于检测 GIS 设备 UHF PD 的各种内外置传感器;第 5 章建立 UHF PD 信号数学模型;第 6 章分析 GIS 设备监测现场的噪声特点及去噪效果评价体系;第 7 章采用小波去除噪声;第 8 章利用复小波变换抑制白噪声干扰;第 9 章利用谐波复小波抑制周期性窄带干扰;第 10 章介绍 PD 模式识别方法;第 11 章介绍 PD 信息融合技术;第 12 章介绍 GIS 设备 PD 定位技术;第 13 章探讨 PD 放电量标定原理及方法;第 14 章介绍 GIS 设备 UHF PD 监测装置;第 15 章结合现场应用进行实例分析。其中,唐炬教授负责全书的统稿和各章的修改及审定,并负责撰写第 1~4、6~9 章;张晓星教授负责撰写第 5 章、10~12、14 和 15 章;曾福平

博士负责第 13 章的撰写工作,并协助统稿以及在出版过程中的相关工作。

本书是作者及其同事多年来对 GIS 设备内部产生 PD 信号传感、提取、定位和标定等关键科学与技术问题系统研究的结晶。在研究过程当中,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 绝缘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),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持续资助;作者的博士研究生周倩、谢颜斌、许中荣、李伟、陶加贵、周加斌、魏刚、卓然以及硕士研究生彭丽、唐铭、陈娇、李玉兰和王存超等在课题研究中付出了大量的精力;在成果的研究、试用、开发和推广应用过程当中得到了重庆、四川、新疆、广东、广西、河南、海南和贵州等省/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李立涅院士、哈尔滨理工大学雷清泉院士、华中科技大学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,一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,加之 GIS 设备绝缘在线监测及诊断技术正在迅速发展,本书可能有许多不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月于武汉大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 气体绝缘组合电器结构及应用	1
1.1.1 气体绝缘组合电器总体结构	1
1.1.2 气体绝缘组合电器应用与发展	4
1.2 局部放电危害、产生及放电过程	6
1.2.1 局部放电对组合电器绝缘的危害	6
1.2.2 局部放电产生与发展过程	7
1.3 局部放电检测方法与评价	9
1.3.1 非电检测法	9
1.3.2 电检测法	11
1.4 特高频局部放电检测特点	12
参考文献	15
第 2 章 组合电器内特高频电磁波传播特性	16
2.1 特高频电磁波传播基本原理	16
2.2 组合电器内特高频电磁波的传播特性	17
2.2.1 横电磁波的传播特性	17
2.2.2 横电波和横磁波的传播特性	18
2.2.3 传播截止现象分析与截止波长确定	19
2.3 特高频局部放电电磁波泄漏	20
2.4 陡脉冲电流激发特高频局部放电信号	22
2.4.1 并矢格林函数法用于局部放电瞬变电场的计算	22
2.4.2 特高频局部放电瞬变电场的简便计算	24
2.5 电磁场仿真组合电器内特高频局部放电信号	26
2.5.1 局部放电脉冲电流源模拟	26
2.5.2 电磁场仿真局部放电信号源	26
参考文献	33

第3章 组合电器特高频局部放电信号特征分析	35
3.1 组合电器缺陷物理模型和采集系统	35
3.1.1 组合电器试验装置	35
3.1.2 组合电器内部绝缘缺陷物理模型	40
3.1.3 特高频传感器	42
3.2 特高频局部放电试验步骤	42
3.3 典型绝缘缺陷局部放电试验及特征分析	44
3.3.1 金属突出物缺陷	44
3.3.2 自由金属微粒缺陷	46
3.3.3 绝缘子表面金属污染物缺陷	47
3.3.4 气隙缺陷	49
3.3.5 四种缺陷放电特征的区别	50
参考文献	50
第4章 特高频传感器	52
4.1 特高频传感器的基本参数	52
4.1.1 方向特性	52
4.1.2 天线效率	54
4.1.3 增益	54
4.1.4 驻波比	54
4.1.5 输入阻抗	55
4.1.6 极化方式	55
4.1.7 频率带宽	56
4.2 特高频传感器的分类	57
4.2.1 内置传感器检测局部放电原理	57
4.2.2 外置传感器检测局部放电原理	58
4.3 内置传感器	59
4.3.1 内置传感器天线模型分析	59
4.3.2 内置传感器设计与安装	60
4.3.3 圆板传感器	62
4.3.4 圆环传感器	63
4.3.5 内置传感器检测组合电器局部放电实测	64
4.4 外置传感器	67
4.4.1 振子传感器	67

4.4.2 屏蔽谐振环传感器	78
4.4.3 微带传感器	86
4.4.4 螺旋传感器	92
4.4.5 TEM喇叭传感器	102
4.4.6 分形传感器	109
4.4.7 微带单极子传感器	115
参考文献	121
第5章 特高频局部放电信号数学模型	125
5.1 传统局部放电信号数学模型	126
5.2 特高频局部放电信号数学模型	126
5.2.1 数学建模方法	126
5.2.2 数学模型构建	129
5.2.3 数学模型检验与分析	132
5.3 时频域等效源信号测试法	139
5.3.1 特高频局部放电等效源信号测试	140
5.3.2 典型绝缘缺陷局部放电试验结果分析	143
5.4 源电流信号数学模型	150
5.4.1 源电流信号数学模型构建	150
5.4.2 源电流信号数学模型检验与分析	155
参考文献	160
第6章 电磁干扰与去噪效果评价	162
6.1 局部放电监测中常见电磁干扰	162
6.1.1 白噪声干扰	162
6.1.2 周期性窄带干扰	163
6.1.3 随机脉冲型干扰	165
6.2 常用噪声抑制方法	165
6.2.1 白噪声干扰抑制	165
6.2.2 窄带干扰抑制	167
6.2.3 脉冲型干扰抑制	169
6.3 去噪效果评价参数	170
6.3.1 SNR、NCC 及 NRR 定义	170
6.3.2 VTP 的定义	171
6.3.3 VTP 参数验证与评价方法	172

参考文献	176
第7章 小波变换抑制强电磁干扰	179
7.1 小波变换技术	179
7.1.1 小波构造	179
7.1.2 小波包构造	183
7.2 阈值算法	186
7.2.1 阈值分类及阈值选择规则	187
7.2.2 噪声信号的小波分解特性及降噪步骤	188
7.2.3 小波包降噪浮动阈值法	190
7.3 小波(包)变换抑制干扰原理	191
7.3.1 抑制白噪声干扰原理	191
7.3.2 抑制窄带干扰原理	192
7.4 小波(包)变换抑制白噪干扰技术	194
7.4.1 小波变换抑制白噪干扰	194
7.4.2 小波包变换抑制白噪干扰	197
7.5 小波(包)变换抑制周期窄带干扰技术	199
7.5.1 基于小波功率谱特性的窄带干扰抑制	199
7.5.2 小波包变换抑制周期窄带干扰	206
7.6 实测局部放电信号干扰抑制	208
7.6.1 实测局部放电白噪干扰抑制	208
7.6.2 实测局部放电窄带干扰抑制	209
参考文献	211
第8章 复小波变换抑制白噪声干扰	212
8.1 复小波变换理论基础	212
8.1.1 复小波变换特点	212
8.1.2 正交复小波构造	213
8.2 复母小波选择	219
8.2.1 局部放电信号源数学模型	219
8.2.2 复母小波选择	220
8.2.3 复小波变换抑制白噪声	222
8.3 复小波变换的复合信息	224
8.3.1 复合信息构造方法	224
8.3.2 复合信息抑制白噪声	225

8.4 用于复小波变换的复阈值算法	231
8.4.1 构造复阈值的方法	232
8.4.2 抑制白噪声的仿真研究	233
8.5 实测局部放电信号的白噪声抑制	238
8.5.1 局部放电信号的实小波去噪	240
8.5.2 局部放电信号的复小波去噪	242
参考文献	244
第9章 谐波复小波抑制周期性窄带干扰	246
9.1 谐波小波变换	247
9.1.1 谐波小波概念	247
9.1.2 谐波小波变换	249
9.2 谐波小波包变换	252
9.2.1 广义谐波小波	252
9.2.2 谐波小波包变换	254
9.3 谐波小波包与实小波包去噪对比	255
9.4 仿真局部放电信号去噪效果及评价	258
9.4.1 最优谐波小波包变换算法	258
9.4.2 子带熵比值阈值	259
9.4.3 去噪效果及评价	259
9.5 实测特高频局部放电信号去噪	262
参考文献	265
第10章 特高频局部放电模式识别	266
10.1 局部放电模式	266
10.1.1 脉冲序列相位分布分析模式	267
10.1.2 局部放电相位分布模式	267
10.1.3 Δu 模式	268
10.1.4 局部放电时间分布模式	268
10.2 局部放电特征参数提取	270
10.2.1 统计特征参数	270
10.2.2 威布尔参数	272
10.2.3 图像矩特征参数	273
10.2.4 分形特征参数	274
10.2.5 波形特征参数	277

10.2.6 小波特征参数	277
10.3 局部放电模式识别分类器	279
10.3.1 基于距离的模式分类器	279
10.3.2 线性及非线性分类器	281
10.3.3 人工神经网络分类器	291
10.3.4 支持向量分类器	303
参考文献	315
第 11 章 基于 DS 证据理论的故障诊断	319
11.1 DS 证据理论的基本原理	320
11.1.1 基本概念	320
11.1.2 结合多源信息的 Dempster 准则	322
11.1.3 基本概率赋值的获取	323
11.1.4 DS 证据理论的优缺点	325
11.1.5 DS 证据理论的应用	325
11.2 用 DS 证据理论辨识局部放电模式	326
11.2.1 TRPD 和 PRPD 信号的模式识别	326
11.2.2 基于特高频与 IEC60270 检测信息相关性的模式识别	329
11.3 基于 DS 证据理论的多信息融合故障诊断	332
11.4 局部放电诊断实例分析	334
11.4.1 缺陷测试	334
11.4.2 样本测试	337
参考文献	337
第 12 章 特高频局部放电源定位	340
12.1 特高频局部放电源定位测量系统	340
12.1.1 检测装置结构图	340
12.1.2 局部放电源定位原理	341
12.2 组合电器特高频局部放电源定位常用方法	342
12.2.1 信号幅值比较法	342
12.2.2 信号先后比较法	343
12.2.3 时间差算法	343
12.2.4 特高频时间差法定位存在的问题	344
12.3 提取时间差的各种常用算法	345
12.3.1 互相关函数法	345

12.3.2	累积能量曲线法	346
12.3.3	功率曲线法	347
12.3.4	广义相位谱法	348
12.3.5	参量模型法	349
12.4	基于多样本能量相关搜索提取时间差改进算法	350
12.4.1	多样本“相关-移位-叠加”	350
12.4.2	能量相关搜索时间差	351
12.4.3	试验数据分析	353
12.5	用逐次逼近理论定位局部放电源	355
12.5.1	局部放电源定位的数学模型	356
12.5.2	逐次逼近定位原理	357
12.5.3	基于多样本的逐次逼近定位算法步骤	359
12.5.4	实测局部放电信号定位试验分析	361
	参考文献	365
第 13 章	特高频局部放电定量检测	368
13.1	低频脉冲电流定量法	368
13.1.1	脉冲电流定量法原理	368
13.1.2	低频脉冲电流法的基本测量回路	369
13.1.3	检测阻抗	370
13.1.4	放电量校准	370
13.2	特高频局部放电定量检测	371
13.2.1	特高频局部放电量标定方法	371
13.2.2	特高频局部放电信号参量与放电量的关系	375
13.2.3	不同气压下特高频局部放电信号与放电量的关系	389
13.3	特高频局部放电量现场标定技术	394
	参考文献	396
第 14 章	组合电器设备特高频局部放电监测系统	397
14.1	信号滤波器	397
14.1.1	滤波器分类	397
14.1.2	理想滤波器与实际滤波器	401
14.1.3	几种典型滤波器	403
14.1.4	常用有源滤波器设计举例	405
14.1.5	集成有源滤波器	410

14.1.6 特高频放大滤波器·····	411
14.2 多路开关技术·····	416
14.2.1 PIN 二极管结构原理·····	416
14.2.2 谐振式开关的组成原理和工作特性·····	417
14.2.3 微波多路开关电路结构·····	418
14.3 特高频局部放电信号采集·····	419
14.3.1 高速数据采集系统·····	419
14.3.2 包络检波技术·····	425
14.3.3 电平扫描式监测·····	426
参考文献·····	430
第 15 章 现场应用实例分析 ·····	431
15.1 某 220kV 变电站隔离开关气室螺栓脱落导致局部放电·····	431
15.1.1 概况·····	431
15.1.2 事件发生经过·····	431
15.1.3 现场检查结果与分析·····	432
15.1.4 诊断结论与建议·····	433
15.2 某 500kV 变电站隔离/接地开关气室 A 相局部放电异常·····	433
15.2.1 概况·····	433
15.2.2 事件发生经过·····	434
15.2.3 现场检查结果与分析·····	434
15.2.4 诊断结论与建议·····	436
15.3 某 500kV 开关站 HGIS 局部放电异常分析·····	436
15.3.1 概况·····	436
15.3.2 事件发生经过·····	437
15.3.3 现场检查结果及分析·····	437
15.3.4 诊断结论与建议·····	439
15.4 某 220kV 变电站 GIS 设备局部放电异常分析·····	439
15.4.1 概况·····	439
15.4.2 事件发生经过·····	439
15.4.3 现场检查结果与分析·····	440
15.4.4 诊断结论与建议·····	442
参考文献·····	442
索引·····	443

第 1 章 绪 论

1.1 气体绝缘组合电器结构及应用

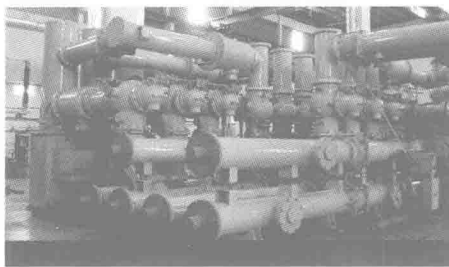
1.1.1 气体绝缘组合电器总体结构

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是以 SF_6 气体作为绝缘介质的金属全封闭系统^[1]。变电站除变压器, GIS 设备将断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、母线(三相或单相)、过渡元件(SF_6 电缆头、 SF_6 空气套管、 SF_6 油套管)等全部封闭在一个接地的金属管道系统内, 充以 $0.3 \sim 0.6 \text{MPa}$ 的 SF_6 绝缘气体介质, 以实现导体对断口、相间及断口间的绝缘^[2]。

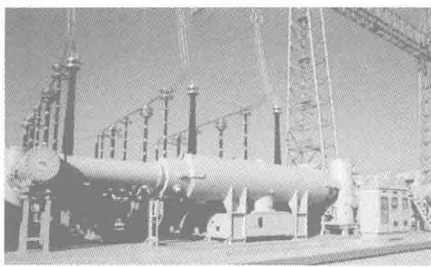
GIS 设备的内部元件, 为了能满足变电站灵活的接线方式, 一般将实现独立电气功能的元件或几个元件配合生产独立功能的器件, 设计放入一个气室或一个间隔里, 再根据实际变电站要求进行选配和组合, 既可以实现 GIS 变电站的灵活建造, 还能在 SF_6 气体发生泄漏时减少退出运行的电气元件数目或单元数, 以提高 GIS 设备运行的可靠性。

对于 GIS 设备的内部结构, 可以分为三相共箱和单相单箱。三相共箱是将三相电气元器件采用三角对称布置形式, 安装在同一箱体内, 用绝缘支柱或隔板进行电气隔离, 能节省金属外壳材料和安装空间。同时, 由于三相磁力线在 GIS 设备腔体外壳中的相互抵消, 可以减小金属外壳中的涡流损失以及对外界的工频电磁场干扰。单相单箱是将各相电气元器件独立安装在单箱的金属圆筒内, 各相主回路有独立的金属圆筒外壳。单相单箱结构的特点是电场分布可视为同轴对称分布, 结构比较简单, 绝缘相对较处理好, 不会发生相间绝缘故障。与三相共箱相比, 缺点在于金属外壳材料用量大, 外壳中产生的电磁涡流损耗较大, 占地面积较大。

考虑当前的制造工艺和成本, 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。某 110kV 室内和 500kV 室外 GIS 变电站现场布置示意图如图 1.1 所示。



(a) 110kV室内GIS设备



(b) 500kV室外GIS设备

图 1.1 某 110kV 室内和 500kV 室外 GIS 变电站现场布置示意图

GIS 设备主要电气元器件如下。

1. 断路器

SF_6 断路器是 GIS 设备的主要元件,采用 SF_6 气体作为绝缘介质和灭弧介质的 高压断路器被集成在 GIS 设备中,一般为独立气室单元,与主气室在用气上完全 隔离。 SF_6 气体是一种无色、无臭、无毒、不燃烧的惰性气体,具有温室效应,不能 随意排放;在相同压力和温度条件下, SF_6 气体的密度为空气的 5.11 倍,能在电弧 间隙的游离气体中吸附自由电子,具有负电性。因此, SF_6 气体具有优异的绝缘性 能及灭弧能力,其绝缘能力约为空气的 3 倍,灭弧能力约为空气的 100 倍,其性能 也是油断路器所无法比拟的。 SF_6 断路器结构形式大致有水平断口和垂直断口两 种,通常在 220kV 及以上电压等级大都采用水平断口结构形式,以减少 GIS 设备 的安装空间,而在 110kV 及以下电压等级则采用垂直断口结构形式,不同断口结 构形式的选用,决定了 GIS 设备内其他元件的布置方式和空间结构以及断口检查 的难易程度。

2. 隔离开关

GIS 设备内电场均可视为轴对称稍不均匀电场,其隔离开关与常规的隔离开 关不同,结构为圆柱体的动静触头且能相互插入。GIS 设备内隔离开关按其用途 不同有三种型式:①主回路隔离开关,其作用相当于在 GIS 设备内的主回路上增 加一个断口(断点);②接地隔离开关,其作用是将主回路通过本隔离开关接到 GIS 设备外壳而直接接地;③快速接地隔离开关,其安装在进线侧,通过继电保护装置 跳闸断路器而快速切断故障电流,以保护 GIS 设备不至于过重损伤。前述两种隔 离开关只能切断电容电流和电感电流以实现电压隔离,而快速接地隔离开关则能 合上接地短路电流以实现故障的快速切除。

3. 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 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,以防止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。随着 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。

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,通常制作成为一个独立气室间隔。电磁式电压互感器主要用在 110kV 及以下的 GIS 设备中,电容式电压互感器主要用在 220kV 及以上的 GIS 设备中。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. 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;后者将三相母线三角对称布置在一个共同接地的金属圆筒内,各相母线对圆筒分别采用支撑绝缘子支撑,而相间绝缘主要由 SF₆ 气体绝缘介质实现。

6. 连接套管

连接套管主要有充气套管和油纸电容套管两种:充气套管为空心塔形套管内装导电杆,并充有 SF₆ 气体绝缘介质;油纸电容套管的尾部(出线端)安装在 GIS 设备壳体中,并使得 SF₆ 气体与套管内部之间进行固体隔离。当 GIS 设备选用电缆进出线时,采用封闭式电缆终端;当与变压器或架空线相连接时,则采用连接套管。

7. GIS 设备用避雷器

GIS 设备用无间隙的氧化锌避雷器进行过电压防护,避雷器被封闭在 SF₆ 气体中,具有较高的通流容量和吸收能力。避雷器内部核心元件是非线性伏安特性极其优良的金属氧化物电阻片柱,在限制过电压时几乎没有残压,有的还可以用于内部过电压防护。另外,由于被保护设备离避雷器距离很近,避雷器保护的范围较大。

8. 母线膨胀补偿器

母线膨胀补偿器用于 GIS 设备的刚性连接位移变化补偿。产生位移变化的原因主要来自两个方面:①各刚性连接的电气元器件材料性质不同,其热膨胀系数各异,在 GIS 设备运行中,因温度变化导致的各电气元器件温度应力存在差异,从

而使得刚性连接的元器件有可能产生挤压损伤或者产生位移变形;②GIS 设备安装过程中不可避免地会有一定的安装误差。因此,需要采用波纹管和拆卸部件构成的母线膨胀补偿器^[2]。

1.1.2 气体绝缘组合电器应用与发展

相对于敞开式的空气绝缘变电站(air insulated substation, AIS),GIS 设备具有以下显著优点。

(1)小型化。采用绝缘性能优良的 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质,能大幅度减小变电站的占地面积和空间高度,实现变电站的小型化,可建设在地下或室内。

(2)可靠性高。GIS 设备中的带电电气元器件完全密封于 SF₆ 绝缘气体中,其绝缘性能不受外界环境因素(覆冰、覆雪、污秽、气压和湿度等)影响,大幅度提高了 GIS 设备运行的可靠性。此外,GIS 设备还具有良好的抗地震性能。

(3)安全性好。带电部件密封于接地的金属壳体内,因而不会发生触电的危险;同时,SF₆ 气体为不可燃性气体,降低了火灾危险;对工频电磁和静电耦合干扰实现良好屏蔽,即电磁污染很小、环境噪声低、几乎没有无线电干扰等问题。

(4)安装周期短。GIS 设备实现小型化后,其单元间隔成标准化,可在工厂进行整机装配且试验合格后,以单元间隔形式运达现场,可缩短现场安装工期,且设备可靠性高。

(5)维护方便。合理的 GIS 设备内结构布置、良好的绝缘介质和先进的灭弧系统,大幅度提高了 GIS 设备的使用寿命,使得 GIS 设备检修周期长及维护工作量小,且由于 GIS 设备是单元间隔的标准化连接,方便检修。

正是 GIS 设备有上述不可比拟的优势,加上伴随 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 GIS 变电站明显增多,GIS 设备在中国电网的应用日益广泛。据 2010~2012 年高压开关行业年鉴统计,近几年 550kV、353kV、252kV、126kV 电压等级的 GIS 设备全国市场销售产量见表 1.1。

表 1.1 2010~2012 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

从 GIS 设备技术自身发展方面来看,从 20 世纪 60 年代 GIS 设备问世以来,GIS 设备不断保持技术的更新与发展,在保持高可靠性的同时,以减少材料消耗和降低成本为主导方向,向着新一代复合式 GIS (hybrid gas isolated substation, HGIS)系统发展。与此同时,传统的 GIS 设备发展态势也同样迅猛,其技术进步