

基于 SF₆ 气体分解产物检测的气体绝缘 开关设备状态监测

颜湘莲¹, 宋 杲¹, 王承玉¹, 季严松¹, 杨 韧², 管永峰², 刘汉梅¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 分析了 SF₆ 气体分解产物检测方法, 开展了气体绝缘开关设备(GIS)设备分解产物带电检测, 对检测结果进行了统计分析, 得到了不同类型设备中的分解产物特性。统计分析结果表明, 正常运行设备均未检测到 SO₂ 和 H₂S 组分, 50% 以上的设备检测到 CO 组分但含量不超过 20 μL/L, 互感器检测到 CO 组分概率稍高且含量较大。对检测到 SO₂ 组分的设备气室进行了跟踪检测, 结合设备运行工况, 对设备状态进行了综合判断, 通过解体检查验证了 SF₆ 气体分解产物检测措施及状态监测结果的有效性。

关键词: SF₆; 分解产物; 气体绝缘开关设备; 监测; 绝缘

中图分类号: TM 56

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.015

0 引言

SF₆ 断路器和 GIS 设备等气体绝缘开关设备已广泛应用于 110 kV 及以上电压等级电网中, 作为确保电网安全运行的关键输变电设备, 高压开关设备的状态监测及其判断显得尤为重要。现场运行表明, SF₆ 气体分解产物检测方法是气体绝缘开关设备带电检测的重要手段^[1-3]。因现场设备运行工况复杂、设备中 SF₆ 气体分解及反应的影响因素多等, 通过检测分解产物判断设备状态仍存在较大困难, 有必要开展针对该项技术的设备状态监测应用研究。

自 20 世纪 80 年代起, 加拿大、日本等国家的开关设备厂家针对放电下的 SF₆ 气体分解及其对设备绝缘的影响开展了试验和检测研究^[1-2], 在此基础上 IEC 提出了设备中 SF₆ 新气及其重复使用的控制指标, 因缺乏运行设备检测需求, 较少涉及基于 SF₆ 气体分解产物的设备状态监测研究。国内从 20 世纪 90 年代开始研究断路器和 GIS 设备在放电下的 SF₆ 气体分解产物^[3], 部分电网运行单位应用该项技术在现场检测故障设备产生的 SF₆ 气体分解产物, 实现了事故后设备故障定位^[4-5], 制定了较宽泛的设备状态检测指标。设备中 SF₆ 气体分解及其产生的特征组分和含量范围与设备类型、运行工况、吸附剂使用情况和环境条件等紧密相关, 亟需开展大量的实验室研究和现场检测, 得到设备状态监测及其评价的 SF₆ 气体分解产物指标。为此, 国家电网公司自 2006 年起成立攻关团队, 开展基于 SF₆ 气体分解产物检测的设备故障诊断技术研究, 设立了多个重大科研项

目, 取得了较大的进展。前期研究成果已广泛应用于我国电网的设备隐患排查中^[6-8], 发现了多起设备潜伏性故障, 但其在设备状态监测方面的应用仍需大量有效的现场检测数据支持, 以确定 SF₆ 气体分解产物与设备状态的对应关系, 指导现场设备的运行管理。

本文应用 SF₆ 气体分解产物检测方法, 对跨区电网 550 kV 和 1 100 kV 的 GIS/HGIS 设备进行分解产物带电检测, 统计分析设备中分解产物分布及其特征组分与含量特性, 进而对检测到 SO₂ 组分的设备进行分解产物的跟踪监测和局放检测, 并结合设备运行工况进行分析, 综合判断设备内部状态, 通过设备解体检验状态监测措施和分解产物检测结果的有效性。

1 SF₆ 气体分解产物检测方法

SF₆ 气体分解产物检测方法是设备状态监测的重要手段, 设备运行产生的分解产物组分及其含量与设备工况有对应关系, 据此提出运行设备的分解产物特征气体和评价指标。

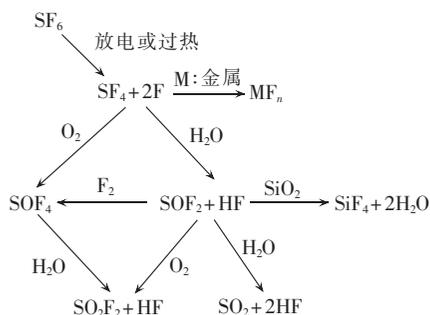
1.1 分解产物特征气体

若运行设备存在放电、过热等故障, SF₆ 气体发生分解并与设备内其他物质反应, 生成的主要产物有 SOF₂、SO₂F₂、SO₂、H₂S、CO、CF₄ 和 HF 等^[9-17], 如图 1 所示。其中, SOF₂、SO₂F₂ 和 CF₄ 等气体主要在实验室进行检测分析, 而 HF 具有强腐蚀性, 并缺乏标准物质, 其检测仍不具备条件。现场较多应用电化学传感器、气体检测管法检测设备中的分解产物, 可有效检出 SO₂、H₂S 和 CO 等组分。由此, 主要以 SO₂、H₂S 组分作为运行设备状态监测的特征气体, 辅以检测 CO 组分, 可实现设备状态判断和潜伏性故障或缺陷诊断。

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2014-03-25

基金项目: 国家电网公司 2009 年科技项目; 国家电网公司 2011 年科技项目; 国家电网公司 2012 年科技项目

Project supported by the Science & Technology Program of SGCC in 2009, 2011 and 2012

图 1 SF₆ 气体分解反应示意图Fig.1 Schematic diagram of SF₆ decomposition

通常,气体绝缘开关设备内会安装吸附剂用于吸附水分和分解产物,设备缺陷或故障产生的分解产物可能被吸附剂吸附掉。可见,运行设备的分解产物检测结果受吸附剂的干扰。同时,带灭弧气室的开关设备正常操作时也会产生大量的分解产物。试验研究表明^[18],在吸附剂作用下,操作后 24~48 h 内分解产物含量可下降到小于 1 μL/L。因此,应在该类设备操作 48 h 后才检测其分解产物,以有效判断设备运行状态。

1.2 分解产物评价指标

关于运行设备状态的分解产物评价指标,IEC 60480—2004^[19]规定 SF₆ 气体杂质最大允许含量为 50 μL/L,其中 SO₂ 与 SOF₂ 的总含量不超过 12 μL/L 时,HF 的含量不超过 25 μL/L;新加坡电力公司提出 SO₂ 含量超过 8 μL/L 时,设备必须检修。国内适用的《电力设备带电检测技术规范(试行)》指出:若 SO₂ 和 H₂S 含量不超过 2 μL/L,则设备正常;若 SO₂ 或 H₂S 含量大于 5 μL/L,则设备存在缺陷。因设备运行工况较复杂,这些评价指标稍显宽泛,难以有效指导分解产物现场检测。

本项目组开展了大量的实验室研究和现场实测,结合现有的分解产物评价指标和设备的其他状态参量,对文献[8]提出的分解产物参考指标进行了修正和完善(列于表 1),确定了设备状态判断的分解产物评价标准^[20]。若设备中检测到的分解产物中 SO₂ 或 H₂S 含量出现异常,应结合 CO 含量及其他状态参量的变化、设备电气特性和运行工况等,对设备

表 1 SF₆ 气体分解产物的评价标准Tab.1 Evaluation criterion of SF₆ decomposition products

气体组分	检测指标/(μL·L ⁻¹)	评价结果
SO ₂	正常值: ≤1	正常
	注意值:(1,5]	缩短检测周期
	警示值:(5,10]	跟踪检测,综合诊断
	警示值:>10	综合诊断
H ₂ S	正常值: ≤1	正常
	注意值:(1,2]	缩短检测周期
	警示值:(2,5]	跟踪检测,综合诊断
	警示值:>5	综合诊断

状态进行综合诊断。

2 GIS 设备分解产物带电检测

为确保设备正常可靠运行,应用 SF₆ 气体分解产物检测方法,开展了跨区电网的换流站和特高压变电站的 GIS 设备分解产物带电检测,统计分析了检测结果,为设备状态判断提供了依据。

2.1 分解产物检测方案

2.1.1 检测范围

对跨区电网 GIS 设备进行了分解产物带电检测,包括 500 kV、800 kV 直流换流站和 1 000 kV 特高压变电站,检测期间的设备状况如下。

a. 江陵、宜都、华新、复龙、奉贤换流站的 550 kV GIS 设备:江陵换流站运行了 6 a,宜都、华新换流站运行了 4 a,±800 kV 复龙和奉贤换流站处于系统调试阶段。

b. 特高压交流输电工程中长治、南阳和荆门变电站的 1 100 kV GIS/HGIS 设备运行了 2 a。

2.1.2 检测方案

结合现场设备的运行工况,采用便捷的电化学传感器法对带电设备进行分解产物现场实测。根据表 1 的分解产物评价指标,选用了泰普联合科技开发(北京)有限公司生产的 STP1003 型 SF₆ 气体分解产物检测仪(简称检测仪),仪器的各项指标见表 2。

表 2 SF₆ 气体分解产物检测仪性能指标Tab.2 Performance indexes of SF₆ decomposition products detector

检测组分	量程/(μL·L ⁻¹)	检测范围/(μL·L ⁻¹)	最大示值误差	重复性允许误差	最小检测量/(μL·L ⁻¹)
SO ₂	≥100	≤10	±0.5 μL/L	0.2 μL/L	0.5
		>10	±5%	2%	
H ₂ S	≥100	≤10	±0.5 μL/L	0.2 μL/L	0.5
		>10	±5%	2%	
CO	≥500	≤50	±2 μL/L	1.5 μL/L	2
		>50	±4%	3%	

用聚四氟乙烯管就近连接检测仪与设备气室取气口,采用导入式取样方法检测分解产物组分及其含量。对 GIS 设备的断路器、隔离开关和接地开关、TV 和 TA 其他气室(包括母线、套管、避雷器等)逐个进行检测,每个气室进行 2 次有效检测,取检测数据的平均值作为检测结果。若检测到的 SO₂ 或 H₂S 含量大于 10 μL/L,该次检测后须用纯净 SF₆ 气体(SF₆ 体积分数大于 99.99%)对检测仪进行吹扫直至示值为 0,消除其对下次检测的干扰。

2.2 检测结果统计分析

开展的跨区电网 GIS 设备分解产物带电检测共检测了 1 480 个气室,包括 1 326 个 550 kV GIS 设备气室和 154 个 1 100 kV GIS/HGIS 设备气室。除华新换流站的 4 个隔离开关气室检测到 SO₂ 组分外,

其他类型设备均未检测到 SO₂ 和 H₂S 组分,50% 以上的气室检测到了 CO 组分。

采用概率统计方法进一步分析上述检测结果,得到不同电压等级设备的分解产物分布、特征组分及其含量特性,以确定分解产物与设备状态的关系。

2.2.1 GIS 设备中的分解产物分布特性

2.2.1.1 550 kV GIS 设备中的分解产物分布特性

550 kV GIS 设备分断路器、隔离开关和接地开关(简称刀闸)、TV 和 TA(简称互感器)、其他气室 4 类,对 2.1 节中 5 个换流站的 550 kV GIS 设备中检测到 SO₂、H₂S 和 CO 的气室数进行了统计,不同类型设备的气室总数和检测到分解产物的气室数列于表 3。

表 3 550 kV GIS 设备检测到分解产物的气室
Tab.3 Amount of 550 kV GIS gas cell containing decomposition products detected

气室类型	气室总数	检测到分解产物的气室数量		
		SO ₂	H ₂ S	CO
断路器	321	0	0	172
刀闸	329	4	0	173
互感器	500	0	0	322
其他气室	176	0	0	6

从表 3 中结果可看出,除 4 个刀闸检测到 SO₂ 组分外(在第 3 节中分析),其他类型气室未检测到 SO₂ 和 H₂S 组分;有 673 个气室检测到 CO 组分,占设备气室总数的 51%。把 CO 含量按 [0,20) μL/L、[20,50) μL/L 和 [50,100] μL/L 进行区间划分,统计 4 类设备气室检测到的 CO 含量概率分布,见图 2。

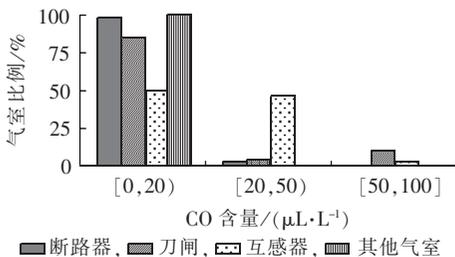


图 2 550 kV GIS 设备气室的 CO 含量分布
Fig.2 Distribution of CO concentration of 550 kV GIS gas cells

根据图 2 可知,80% 以上的断路器、刀闸、其他气室检测到的 CO 含量不超过 20 μL/L,CO 含量分布在 [0,20) μL/L 和 [20,50) μL/L 的互感器气室各占 50% 左右,不超过 10% 的刀闸和互感器气室检测到的 CO 含量达 [50,100] μL/L。可见,4 类设备气室中,互感器检测到 CO 组分的概率稍高。

2.2.1.2 1100 kV GIS/HGIS 设备中的分解产物分布特性

采用与 550 kV GIS 设备相同的分类方法,对 1100 kV GIS/HGIS 设备的分解产物检测结果进行了统计。表 4 给出了不同类型设备检测到 SO₂、H₂S

和 CO 的气室数,可见所有设备气室均未检测到 SO₂ 和 H₂S 组分,近 51% 的气室检测到了 CO 组分。

表 4 1100 kV GIS/HGIS 设备检测到分解产物的气室数量
Tab.4 Amount of 1100 kV GIS/HGIS gas cell containing decomposition products detected

气室类型	气室总数	检测到分解产物的气室数量		
		SO ₂	H ₂ S	CO
断路器	18	0	0	3
刀闸	51	0	0	28
互感器	36	0	0	21
其他气室	49	0	0	26

1100 kV GIS/HGIS 设备检测到的 CO 含量可分成区间 [0,20) μL/L、[20,50) μL/L、[50,100) μL/L 和 [100,+∞) μL/L,统计不同类型气室中的 CO 含量分布如图 3 所示。3 个断路器气室检测到的 CO 含量小于 20 μL/L;50% 以上的刀闸、互感器和其他气室检测到了 CO 组分,75% 以上气室的 CO 含量不超过 20 μL/L;部分刀闸和互感器检测到的 CO 含量分布在区间 [20,50) μL/L 和 [50,100) μL/L,有 1 个 TA 气室检测到的 CO 含量大于 100 μL/L。结果表明,1100 kV GIS 中互感器检测到 CO 组分的概率稍高且 CO 含量较高,与 550 kV GIS 设备的分布规律一致。

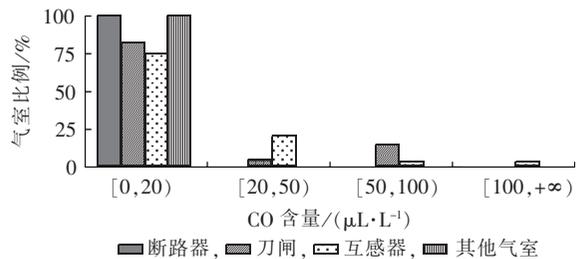


图 3 1100 kV GIS/HGIS 设备气室的 CO 含量分布
Fig.3 Distribution of CO concentration of 1100 kV GIS/HGIS gas cells

2.2.2 分解产物特征组分及其含量

利用表 3、4 和图 2、3 的结果统计,结合表 1 中的评价标准,分析运行设备中的分解产物特性,为制定设备状态监测措施提供指导。

2.2.2.1 SO₂ 和 H₂S 组分

在跨区电网 1480 个气室中,除华新换流站的 550 kV GIS 设备的 4 个隔离开关气室外,其他类型设备均未检测到 SO₂ 组分,可见其是区分设备运行状态的特征组分。4 个隔离开关气室检测到的 SO₂ 最大含量达 4.9 μL/L,处于注意值范围,表明设备可能存在运行隐患,需缩短检测周期,提出有效的设备状态跟踪监测措施。

所有设备气室未检测到 H₂S 组分。试验研究表明,高温环境下,SF₆ 气体发生分解,可能与设备内的绝缘材料环氧树脂或聚四氟乙烯等发生化学反应,

生成 H_2S ^[18]。因此,设备内是否存在 H_2S 组分应与设备绝缘材料缺陷有关。检测到 SO_2 组分的隔离开关并未检测到 H_2S 组分,意味着该设备缺陷不涉及固体绝缘材料。

2.2.2.2 CO 组分

跨区电网内 50% 以上的设备气室检测到 CO 组分,按 CO 含量由大到小排序为:互感器>刀闸>其他气室和断路器。对不同运行时间的 550 kV GIS 设备进行比较发现^[20],运行年限越长,检测到的 CO 含量越高。结果表明,设备中的 CO 组分及其含量与设备类型及运行时间有关。

目前,设备 SF_6 气体中的 CO 来源难以明确。现行的 SF_6 气体标准^[21-22]未控制新气中的 CO 指标,缺乏设备交接验收的分解产物检测原始数据;同时,设备内润滑脂涂覆过量、互感器绝缘材料老化等,可能引起有机材料分解反应产生 CO 组分。与硫化物不同,吸附剂对 CO 吸附作用较弱^[18],随着设备运行时间增加,CO 组分具有累积效应。

考虑到 CO 的复杂影响因素,表 1 并未给出 CO 组分的评价指标。上述分析表明 CO 组分间接反映了设备内部绝缘状况,应从源头把关,使其成为设备状态评价的特征气体。现阶段需监控 CO 含量较大的设备状态,分析 CO 含量变化趋势,确保设备安全运行。

2.2.3 分解产物含量

此次 GIS 设备分解产物带电检测中,正常运行设备气室检测到的 SO_2 和 H_2S 含量为 0,验证了表 1 所示的分解产物评价标准的可行性和有效性。

4 个隔离开关检测到的 SO_2 含量小于 $5 \mu L/L$,根据表 1,制定了缩短检测周期、加强监控的设备状态监测措施(见第 3 节)。鉴于 CO 组分与设备状态的关系尚未明确,需开展大量的试验研究和现场普测,统计检测结果,提出设备状态评价的 CO 含量指标。

3 高压开关设备状态监测应用

在分析检测结果的基础上,对检测到 SO_2 组分的设备气室进行状态监测,分析设备的运行状况,提出了设备监控措施,跟踪检测设备中的分解产物变化,综合判断设备状态,通过设备解体检查验证监测措施和检测结果的有效性。

3.1 设备运行状况分析

分解产物带电检测中,华新换流站 4 个检测到 SO_2 组分的隔离开关编号分别为 50112A、50222C、50411A 和 50432C,其中隔离开关 50411A 和 50432C 均与母线相通,气室体积较大。

为准确判断设备状态,对 4 个隔离开关运行的历史数据进行了调研分析。分析发现设备安装期间,

在 GIS 设备交流耐压试验中,这 4 个隔离开关的绝缘拉杆均发生了闪络,导杆和拉杆呈现明显的黑色碳化痕迹,如图 4 所示。随后,对所有缺陷设备部件进行了更换,设备整体通过了交流耐压试验。



图 4 隔离开关气室绝缘拉杆闪络图
Fig.4 Insulating rod flashover in gas cell of disconnector

3.2 设备状态跟踪监测

结合设备运行状况,制定了设备状态监测措施,每月对 4 个隔离开关的分解产物进行连续跟踪检测,辅以局放检测,以提供设备状态判断的重要参量。

3.2.1 分解产物检测

采用电化学传感器法,对 4 个隔离开关进行了 5 个月的分解产物跟踪检测,检测到的 SO_2 和 CO 含量随时间的变化如图 5 所示,图中,序号 1—5 分别对应 4 月、5 月、6 月、10 月和 12 月,序号 6 对应 12 月设备停电后的检测。

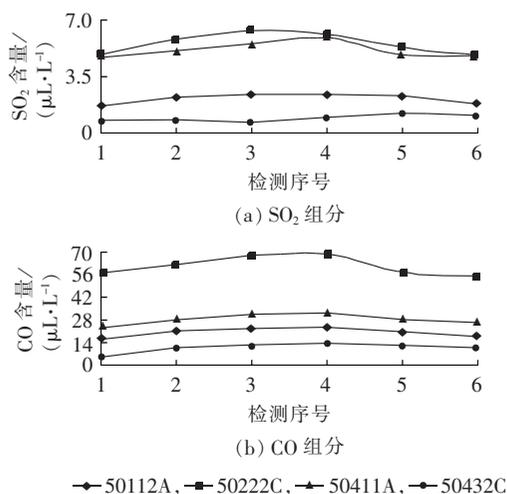


图 5 隔离开关气室检测到的 SO_2 和 CO 含量变化
Fig.5 Variation of SO_2 and CO detected in gas cells of disconnector

由图 5 可见,设备在运行期间一直检测到 SO_2 和 CO 组分,含量范围分别为 $[1, 7] \mu L/L$ 、 $[5, 70] \mu L/L$,发展趋势较稳定,没有出现突变。其中,隔离开关 50222C 和 50411A 隔离开关的 SO_2 含量大于 $5 \mu L/L$,处于警示值范围,需对设备状态进行综合诊断,确定后续的设备运行维护措施。

为了使分解产物不同检测方法相互印证检测结果,在 6 月和 10 月对隔离开关 50222C 和 50411A 气室进行现场气体取样,带回实验室用气相色谱-质谱方法进行了检测分析,结果见表 5。该方法除检测

表 5 气相色谱-质谱的分解产物检测结果

Tab.5 Results of decomposition products detection by gas chromatography-mass spectrum

隔离开关	检测时间	气体含量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)			
		SO ₂	CO	CF ₄	CO ₂
50222C	6月	4.3	40	203.0	150.9
	10月	4.7	45	211.8	154.3
50411A	6月	4.1	30	314.1	160.1
	10月	4.6	33	317.8	169.3

到 SO₂ 和 CO 外,还检测出 CF₄ 和 CO₂ 组分,检测出的 SO₂ 和 CO 含量与电化学传感器法检测的结果基本一致,CF₄ 和 CO₂ 含量在正常运行范围内^[22]。

综合图 5 和表 5 的结果分析可知,2 种方法得到的规律一致,设备检测到的分解产物发展稳定,未出现突变,验证了跟踪检测结果的有效性。

3.2.2 局放检测

对设备状态进行综合诊断,在检测到分解产物含量最大的 6 月,分别用内置式和外置式 2 种局放传感器对 4 个隔离开关进行了超高频局放检测。图 6 为隔离开关气室的超高频局放检测典型谱图,图中, x 轴上的 +pk、-pk 分别表示正、负峰值,0 表示过零点。由图可见未检测到设备内部局放典型特征,局放信号未出现明显异常,表明设备内未发生严重放电缺陷。

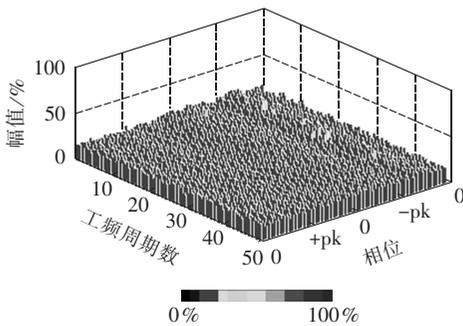


图 6 隔离开关的超高频局放检测典型谱图

Fig.6 Typical UHF PD spectrum of disconnector

3.3 设备状态判断验证

基于设备状态的分解产物跟踪监测和局放检测结果,分析设备的运行负荷,判断设备内部状态,通过解体验证分解产物监测设备状态的可行性。

3.3.1 运行负荷水平

对设备状态监测期间的运行负荷水平进行了统计,列于表 6。设备在 5、6 月的运行负荷水平最高,12 月运行于最低负荷水平,待转检修。

结合图 5 与表 6 可知,发现各气室检测到的分解产物含量随运行负荷正向变化。当设备运行电流增大时,设备内部温度升高,使得分解产物含量增加;运行负荷下降时,在吸附剂作用下,分解产物含量下降。可见,运行负荷对分解产物的影响较小,设备检测到的分解产物含量变化不明显,表明设备运

表 6 隔离开关的负荷水平和运行电流

Tab.6 Load level and operating current of disconnectors

检测时间	运行负荷/MW	运行电流/A			
		50112A	50222C	50411A	50432C
4月	700	210	165	190	240
5月	2127	640	500	570	730
6月	3000	886	706	800	1024
10月	1500	450	350	401	515
12月	300	89	71	80	100

行状态稳定,未出现恶化。

3.3.2 设备状态判断

由 3.1 节分析可知,设备投运前发生了绝缘闪络故障,造成了气室中 SF₆ 气体的污染,虽进行了换气处理,但缺乏设备投运的分解产物检测原始数据,难以排除气源带入问题。同时,设备闪络产生的分解产物易被 GIS 外壳吸附,特别是体积较大的气室,更换气体难以完全处理干净,设备投运后,随着设备内温度升高,外壳吸附的分解产物会脱附进入气室。由此,设备内检测到的分解产物存在气源和脱附的可能性。

根据 3.2 节的设备状态跟踪监测结果,4 个隔离开关一直检测到 SO₂ 和 CO 组分,其含量变化不明显,未检测到 H₂S 组分,局放检测结果正常,且计及上述气源和脱附的干扰,难以明确判断设备状态。结合 2.2 节的统计分析结果可知,设备运行状态稳定,未出现严重放电,但存在运行隐患,其缺陷不涉及固体绝缘材料。需加强监控,严防隐患失控酿成事故。

3.3.3 设备解体验证

在 12 月设备检修期间,考虑到设备拆装的便利性,对 SO₂ 含量最高的隔离开关 50222C 进行了解体检査,发现了 2 处运行隐患:该气室的绝缘拉杆开槽处出现了机械裂纹;隔离开关 50231C(与 50222C 共气室)侧横盆上、静触头下方有固体微粒。用扫描电子显微镜对微粒进行了元素分析,其主要成分为铝(Al),图 7 为微粒成分的谱线图。现场检查结果表明,该隔离开关的动、静触头存在轻度不对中,使得设备处于异常运行工况,产生了 SF₆ 气体分解产物和金属杂质。

随后更换了存在缺陷的设备部件,恢复设备至正常运行状态。由此,通过设备解体检查,验证了用

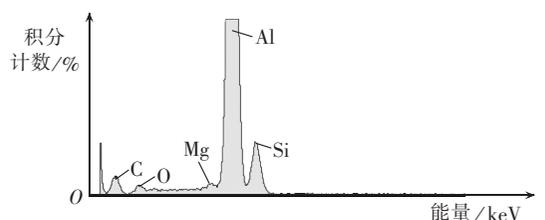


图 7 固体微粒的元素分析谱线图

Fig.7 Spectrum of elements analysis for solid particle

SF₆ 气体分解产物检测方法进行开关设备状态监测的可行性和有效性,表明该方法对开关设备的潜伏性故障或缺陷诊断具有较高的灵敏度,是设备状态监测的有效手段。

4 结论

a. 通过检测设备中 SF₆ 气体分解产物的特征气体 SO₂、H₂S 组分,可判断气体绝缘开关设备状态,提出了设备状态判断的 SO₂ 和 H₂S 评价指标。

b. 开展了跨区电网 550 kV 和 1100 kV GIS 设备共 1480 个气室的 SF₆ 气体分解产物带电检测,统计分析结果表明,正常运行设备均未检测到 SO₂ 和 H₂S 组分,50% 以上的设备检测到 CO 组分且含量不超过 20 μL/L,互感器检测到 CO 组分概率稍高且含量较大。

c. 对检测到 SO₂ 组分的 4 个隔离开关进行了设备状态监测,分解产物跟踪检测表明 SO₂ 和 CO 含量稳定;结合设备运行工况分析,判断设备运行状态,设备解体检查发现了设备运行隐患,验证了监测措施和检测结果的有效性。

d. SF₆ 气体分解产物检测方法已成为高压开关设备状态监测的有效手段,仍需进一步深入研究分解产物组分及含量与设备状态的对应关系,指导该项技术在现场的推广应用。

参考文献:

- [1] CHU F Y. SF₆ decomposition in gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1986,21(5):693-725.
- [2] TOMINAGA S,KUWAHARA H,HIROOKA K,et al. SF₆ gas analysis technique and its application for evaluation of internal conditions in SF₆ gas equipment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1981,100(9):4196-4206.
- [3] 李建基. SF₆ 在高压断路器和 GIS 不同放电下的分解物[J]. 华通技术,1992(3):58-64,46.
LI Jianji. The decompositions of SF₆ in high voltage circuit breaker and GIS under different discharge[J]. Hua Tong Technology,1992(3):58-64,46.
- [4] 汪金星,杨韧,郑小川. SF₆ 开关设备带电测试新技术在陕西电网的应用[J]. 陕西电力,2008,36(11):15-17.
WANG Jinxing,YANG Ren,ZHENG Xiaochuan. Application of novel live test methods for SF₆ switch equipment to Shaanxi Power Grid[J]. Shaanxi Electric Power,2008,36(11):15-17.
- [5] 刘永,印华,姚强,等. 气体分析技术在 GIS 故障定位和故障类型判断中的应用[J]. 高压电器,2009,45(3):132-134.
LIU Yong,YIN Hua,YAO Qiang,et al. The application of gas analysis technology to fault location and fault diagnosis of GIS [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):132-134.
- [6] 颜湘莲,王承玉,季严松,等. 开关设备中 SF₆ 气体分解产物检测的应用[J]. 电网技术,2010,34(9):160-165.
YAN Xianglian,WANG Chengyu,JI Yansong,et al. Application of decomposition products detection of SF₆ in switchgears [J]. Power System Technology,2010,34(9):160-165.
- [7] 季严松,王承玉,杨韧,等. SF₆ 气体分解产物检测在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2011,47(2):118-123.
JI Yansong,WANG Chengyu,YANG Ren,et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(2):118-123.
- [8] 颜湘莲,王承玉,杨韧,等. 应用 SF₆ 气体分解产物的高压开关设备故障诊断研究[J]. 电网技术,2011,35(12):120-123.
YAN Xianglian,WANG Chengyu,YANG Ren,et al. Fault diagnosis of high voltage switchgears by decomposition products of SF₆[J]. Power System Technology,2011,35(12):120-123.
- [9] BEYER C,JENETT H,KLOCKOW D. Influence of reactive SF_x gases on electrode surfaces after electrical discharges under SF₆ atmosphere[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2000,7(2):234-240.
- [10] BELARBI A,PRADAYROL A C,CASANOVAS J,et al. Influence of discharge production conditions,as pressure,current intensity and voltage type,oil SF₆ dissociation under point-plane corona discharges[J]. Journal of Applied Physics,1995,77(4):1398-1406.
- [11] BELMADANI B,CASANOVAS B J,CASANOVAS A M. SF₆ decomposition under power arcs[J]. IEEE Transactions on Chemical Aspects B,1991,26(6):1177-1182.
- [12] 刘有为,吴立远,弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术,2009,33(5):58-61.
LIU Youwei,WU Liyuan,GONG Yanpeng. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology,2009,33(5):58-61.
- [13] 张晓星,姚尧,唐炬,等. SF₆ 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术,2008,34(4):664-669,747.
ZHANG Xiaoxing,YAO Yao,TANG Ju,et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge [J]. High Voltage Engineering,2008,34(4):664-669,747.
- [14] 袁亮. 高压电器中 SF₆ 气体分解物的检测与研究[D]. 长春:长春理工大学,2009.
YUAN Liang. Detection technology of the decomposed product of SF₆ gas in high voltage apparatus[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2009.
- [15] SUEHIRO J,ZHOU G,HARA M. Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2005,105(2):164-169.
- [16] DERDOURI A,CASANOVAS J. 3 Spark decomposition mixtures of SF₆/H₂O[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1989,24(6):1147-1157.
- [17] 颜湘莲,王承玉,季严松,等. 开关设备中 SF₆ 气体分解产物检测技术[J]. 电网技术,2010,34(增刊 2):1-6.
YAN Xianglian,WANG Chengyu,JI Yansong,et al. Detection techniques for decomposition products of SF₆ in switchgears[J]. Power System Technology,2010,34(Supplement 2):1-6.
- [18] 中国电力科学研究院. 气体绝缘设备中 SF₆ 气体分解产物试验研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2011.
- [19] IEC. IEC60480-2004 Guidelines for the checking and treatment of (下转第 95 页 continued on page 95)

技术及应用[J]. 西安交通大学学报,2008,42(8):1021-1025.

SI Wenrong,LI Junhao,YANG Jinggang,et al. Fast and practical grouping technique for partial discharge pulse sequence and its application[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(8):1021-1025.

[22] 张锋,李剑,杨丽君,等. 油纸绝缘电热老化的聚类判别算法[J]. 高电压技术,2009,35(5):1020-1025.

ZHANG Feng,LI Jian,YANG Lijun,et al. Clustering algorithm for electrical-thermal aged oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering,2009,35(5):1020-1025.

作者简介:



陈伟根

陈伟根(1967-),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气设备的在线智能检测及故障诊断技术方面的研究工作(E-mail:weigench@cqu.edu.cn);

杜杰(1987-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备的在线智能检测及故障诊断技术(E-mail:darajie87@163.com)。

Energy-wavelet moment characteristics of air-gap discharge in oil-paper insulation of transformer and partition of discharge process

CHEN Weigen¹,DU Jie¹,LING Yun²,XIE Bo¹,LONG Zhenze¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518001, China)

Abstract: The variation law of discharge energy is researched based on the model of air-gap discharge in oil-paper insulation. The discharge repetition rate is introduced and the average discharge energy per second is proposed to describe the developing process of air-gap discharge. The phase of power frequency is introduced and a three-dimensional statistic graph φ - W - n is constructed based on the discharge energy, which is then projected to the discharge energy-phase plane to obtain the gray intensity image. A feature extraction method based on wavelet moment feature is adopted to extract the global and local features of the obtained gray intensity image. Based on the wavelet moment feature values extracted at different times, the whole discharge process is divided into four stages by the fuzzy C -means clustering method: the discharge generation and oscillation development stage, the weak discharge stage, the discharge outbreak stage and the pre-breakdown stage.

Key words: electric transformers; insulation; oil-paper insulation; air-gap discharge; discharge energy; wavelet moment characteristics; fuzzy C -means clustering; partial discharges

(上接第 88 页 continued from page 88)

sulfur hexafluoride(SF₆) taken from electrical equipment and specification for its reuse[S]. [S.I.]:IEC,2004.

[20] 中国电力科学研究院. 运行设备中 SF₆ 气体分解产物检测现场应用[R]. 北京:中国电力科学研究院,2011.

[21] IEC. IEC60376-2005 Specification of technical grade sulfur hexafluoride(SF₆) for use in electrical equipment[S]. [S.I.]: IEC,2005.

[22] 全国化学标准化技术委员会. GB/T12022—2006 工业六氟化硫[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

作者简介:



颜湘莲(1977-),女,湖南安仁人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统过电压和电弧建模、开关设备故障诊断与 SF₆ 气体检测技术(E-mail:alian_yan@163.com)。

Gas-insulated switchgear state monitoring based on SF₆ decomposition products detection

YAN Xianglian¹,SONG Gao¹,WANG Chengyu¹,JI Yansong¹,YANG Ren²,
JIAN Yongfeng²,LIU Hanmei¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The method of SF₆ decomposition products detection is analyzed and the online decomposition products detection is carried out for different grid GISs(Gas-Insulated Switchgears). The detection results are statistically analyzed and the decomposition products characteristics of different GISs are obtained, which shows that, no SO₂ or H₂S content is detected in normally operating GISs; more than 50% of GISs contain CO with the concentration less than 20 μL/L; the probability of transducer containing CO and with higher concentration is big. The GISs containing SO₂ are traced and combined with the operating conditions, their states are comprehensively estimated. The inspection by GIS disassembly verifies the effectiveness of the proposed detection method and monitoring results.

Key words: SF₆; decomposition products; gas-insulated switchgear; monitoring; insulation