

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.040

气体变电站故障泄漏预警回收技术研究与应用

陈 平, 石 磊, 赵建勇, 刘弘景, 于希娟

(国网北京电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 文中详细介绍了一种应对SF₆电器突发泄漏故障的预警回收技术,该技术可以解决SF₆变电站发生大量气体泄漏时,混入空气中的微量SF₆的快速回收的难题。该技术包括气体泄漏监测、SF₆气体分解物处理,空气中水分、粉尘处理,以及SF₆/Air分离回收技术。文中就地下变电站的实际情况给出了详细地解决方案和控制流程,为以后各种地下变电站故障后气体泄漏处理提供参考。

关键词: SF₆/air分离; SF₆气体回收处理; SF₆分解产物处理; SF₆泄漏气体净化

Research on Early Warning and Recovery Technology of Gas Leakage

CHEN Ping, SHI Lei, ZHAO Jianyong, LIU Hongjing, YU Xijuan

(SGCC Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: This paper introduces a kind of SF₆ electrical paroxysmal leakage fault early warning and recovery technology. The technology can solve SF₆ substation of gas leakage occurs, mixed with the problem of rapid recovery of trace SF₆ in the air. Which include gas leakage monitoring, SF₆ gas decomposition process, moisture, dust in the air, and SF₆ /air separation recovery technology. In this paper, the actual situation of the underground substation solution in detail is given and the control process, for all kinds of underground substation fault gas leak after processing to provide the reference.

Key words: SF₆/air separation; SF₆ gas recycling; SF₆ decomposition; SF₆ purification

0 引言

六氟化硫地下变电站一般建造在大中型城市人口密集区,而变电站电气开关设备都充满着SF₆气体。SF₆是一种理想的绝缘气体,具有优良的绝缘性能和灭弧性能。但是SF₆气体又是一种造成温室效应的气体,SF₆气体单个分子对温室效应的影响约为CO₂的23 900倍,且在大气中寿命为3 200年,故它对温室效应存在着潜在的危险^[1]。并在高能因子作用下产生的分解产物具有毒性,对人的生命安全造成影响。由于制造、安装等质量差异以及材料老化等因素,SF₆高压开关设备发生SF₆气体泄漏是一个普遍存在的现象^[2]。六氟化硫室内变电站一旦爆炸或是故障,设备间会有大量的SF₆气体泄漏,引起电网的安全问题,又会造成地面空气的污染,危害人身安全使人出现乏力、记忆力差、咽痛、胸闷^[3]。

地下变电站虽然在设计时已经考虑SF₆气体泄漏到空间中的监测和通风换气系统,通过联动将室内的气体置换,以保证进入地下变电站维修人员的人身安全。但是这种方式仅能监测并通过通风换气保证两种气体达到国家卫生标准的要求——O₂不小于18%保证人员身体正常的需求和SF₆气体浓度不大于6 000 mg/m³,不会使人窒息的要求^[4]。但是其产生的有毒有害的分解产物及无毒的温室效应气体仅采用的是无组织自由排放,排放到地面居民生活区域,并没有根本清除或进行集中收集处理,造成了地下变电站外的对环境污染和人身安全的威胁^[4-7]。

1 SF₆气体泄漏预警回收系统设计

地下变电站发生突发性故障或泄漏时,采用SF₆气体泄漏预警回收系统即可进行迅速回收,该系统可防止泄漏后的SF₆气体大量外逸,可及时地将泄漏后的SF₆气体快速回收,避免对环境以及人员的伤害而出现的公共安全事件。该系统可将泄漏

收稿日期:2016-06-27; 修回日期:2016-07-29

后的气体回收,经过有毒有害气体、水分的处理后,将气体与空气分离,最后通过再生处理,回收后的气体质量满足 GB/T 12022—2014《工业六氟化硫》新标准^[9],不仅避免了 SF₆ 对环境和人员的伤害,而且也具有极大的经济效益。

为此文中专门针对地下变电站设计一套解决方案及处理系统——六氟化硫气体泄漏预警回收系统,即可对于瞬间泄漏到空间中的气体的回收处理净化,并辅以 SF₆ 气体再生技术,使得再生后的 SF₆ 气体满足 GB/T 12022—2014《工业六氟化硫》新气标准。文中对某变电站经过现场实地调研之后,专门设计出对设备出现故障性大量泄漏时的预警回收系统。该系统主要包括气体自动收集模块、有毒有害气体预处理模块、气体分离模块、动力及检修模块、SF₆ 气体储存模块、SF₆ 气体远程监测控制模块。

1.1 自动收集模块的设计

经过现场考察,在不影响变电站布局、日常维护以及状态检修等工作的情况下,最大程度上不对变电站内部基建进行改动,决定通过 SF₆ 电气设备就近的通风栅栏进行气体收集。通过对自动收集系统的设计,可满足以下几点要求:①最大程度上减少泄漏后的 SF₆ 气体外逸;②不可影响变电站内部正常运行时的通风换气工作;③发生泄漏时,能够迅速封闭该栅栏,防止气体外逸;④泄漏气体回收后,能够迅速开启,正常通风换气。考察某变电站主变室地面通风换气散热格栅见图 1。针对现场考察情况,气体自动收集装置设计见图 2。



图 1 主变室格栅及格栅下部空间

Fig. 1 Main transformer chamber and gratings lower space

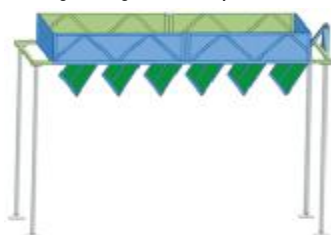


图 2 自动收集装置

Fig. 2 Automatic collection device

自动收集装置通过 4 根支架进行固定,底部为百叶结构,通过电动机提供动力,可在控制系统接收

到气体泄漏报警时,电动机启动将百叶机构拉起,密封,防止 SF₆ 气体外逸;解除报警后电动机释放百叶机构,形成敞开环境,不影响散热及通风换气工作。

1.2 有毒有害气体预处理模块设计

SF₆ 电气设备在突发故障时因温度、压力及其他因素六氟化硫与内部的金属、空气、水发生化学反应生成有毒有害气体,这些气体大多为强酸性气体,具有强烈的毒性和腐蚀性,因此有必要对这些气体进行处理,防止对人员以及设备造成损伤^[6]。而且气体回收是针对 SF₆ 气体泄漏区域内的所有气体,由于空间中的湿度以及粉尘,都会对设备造成损伤,影响设备使用寿命,因此该模块也需对空气中的水分、粉尘进行干燥过滤。其设计见图 3^[8-11]。



图 3 有毒有害气体预处理模块

Fig. 3 Poisonous and harmful gas pretreatment module

有毒有害气体预处理模块主要由涡旋压缩机组、粉尘过滤器、有毒有害气体过滤器、汽水分离器等组成。涡旋压缩机主要作用是提供动力以及后级系统处理气体所需压力,该压缩机流量可自由调节,根据出口压力反馈,保持后级缓存罐中气体为恒压状态。压缩机流量的选择,以所考察某变电站为例,按照 1 台气体变发生泄漏进行计算回收速率及时间。

1.2.1 泄漏后六氟化硫体积分数

计算出发生泄漏后六氟化硫主变室空间内六氟化硫体积分数 w 。

气体变气体总量为 $390+70=460$ kg; 压力为 0.5 MPa; 主变房间内的容积为 464.38 m³。

设 V 为房间内容积; V_1 为主变内的容积; P 为主变内的压力。由 $M=\rho V$ 公式计算出主变内的容积 $V_1=460\div35=13.1$ m³; 由六氟化硫三态表得出在 0.5 MPa 压力下的密度为 35 kg/m³。

假设忽略气体泄漏速度,认为气体泄漏即充满整个气室,计算出其标况下泄漏体积分数为

$$w = \frac{V_{SF_6}}{V_{总}} = \frac{(V_1 P) / P_{标}}{[(V - V_1) + (V_1 P) / P_{标}]} = \frac{13.1 \times 5}{(463.38 - 13.1 + 13.1 \times 5)} = 126.992.128 \mu\text{L/L}。$$

1.2.2 故障后六氟化硫体积分数

计算由发生故障后产生的六氟化硫体积分数

(126 992.128 $\mu\text{L/L}$)降低到 1 000 $\mu\text{L/L}$ [12] (体积比 0.1%)所需的时间为 T ; M 为主变内六氟化硫总质量; V 为主变室内的总体积; S 为速率; ρ 为六氟化硫气体常压下的密度 (20 $^{\circ}\text{C}$, 101.325 kPa) 6.16 kg/m^3 。由 $M - M \div V \times S \times T = 0.1\% V \rho$ 进行计算。

1) 设六氟化硫总回收速率 $S = 50 \text{ m}^3/\text{h}$, 得 $460 - 460 \div 464.38 \times 50 \times T = 0.1\% \times 464.38 \times 6.16$ 。则六氟化硫气体回收时间 $T = 9.23 \text{ h}$ 。

2) 若设六氟化硫总回收速率 $S = 150 \text{ m}^3/\text{h}$, 得 $460 - 460 \div 464.38 \times 150 \times T = 0.1\% \times 464.38 \times 6.25$ 。则六氟化硫气体回收时间 $T = 3.08 \text{ h} \approx 3 \text{ h}$ 。

故当 SF_6 泄漏预警系统回收速率 $S = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 主变室内 SF_6 气体由 126 992.128 $\mu\text{L/L}$ 降低到 1 000 $\mu\text{L/L}$ 所需时间约为 3 h, 符合电力保障单位安全快速处理故障要求。

1.3 气体分离模块设计

1.3.1 气体分离模块

气体分离模块主要部件为膜处理系统, 采用的是中空纤维膜, 聚碳酸酯结构, 能够以 $S = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 的速率处理 SF_6 及空气混合气体, 通过该系统可以快速地将 SF_6 气体与空气分离。膜分离示意图见 4, 气体分离模块见图 5 [13-18]。

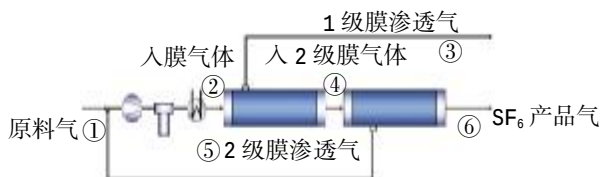


图 4 膜分离流程

Fig. 4 Membrane separation process



图 5 气体分离模块

Fig. 5 Gas separation module

1.3.2 膜分离理论计算

1) 原料气体初始组分见表 1。

2) 原料气体参数。原料气体流量为 150 Nm^3/h ; 原料气体温度为 25 $^{\circ}\text{C}$; 原料气体平均分子量为 40.571 g/mol 。

3) 产品气要求。产品气中 SF_6 体积分数 $\geq 50\%$; 产品气压力为 0.8 MPa。

4) 原料气体的预处理及膜分离。原料气从 GIS 密封房间底部抽出并过滤后, 经无油式压缩机增压

表 1 某变电站泄漏后原料气体组分

Table 1 A transformer substation leak after raw material gas composition

组分名称	组分体积分数
SF_6	设计按 10% 考虑
N_2	71.1%
O_2	18.9%
H_2O	按当地大气湿度计算

压缩到 0.9 MPa, 进入气液分离器除去液态水, 后进入深度干燥装置进一步去除气体中所含水分, 然后进入膜装置。进入膜装置后首先进入两级精密过滤器过滤, 去除机械类杂质及少量油分; 之后经过电加热器将气体温度加热到 45 $^{\circ}\text{C}$ 后进入到活性炭过滤器中, 深度清除气体中存在的气态杂质, 尤其是油蒸汽。在最终进入膜件前, 还必须经过粉尘过滤器, 清除掉颗粒状杂质后, 进入膜组件中。

经预处理后的净化原料气, 以约 0.85 MPa 的压力, 45 $^{\circ}\text{C}$ 的温度进入两级膜分离。经一级膜分离后, 从渗透侧排出的气体中含有一定量的 SF_6 气体, 为避免排放, 将这部分气体返回至 GIS 密封房间内重复回收, 一级膜非渗透气进入二级膜分离进一步分离, 二级膜的渗透气中 SF_6 体积分数较高, 返回到压缩机入口进行循环处理, 而二级膜的非渗透气将获得富集后的 SF_6 气体, 进入缓冲罐中, 经后续用户提供的高压压缩机增压至 4.0 MPa 以上储存。

当检测到 GIS 密封房间内 SF_6 体积分数达到允许值后, 可以关闭密封房间的出口阀门, 回收系统在缓冲罐间实行循环净化 SF_6 的方式, 进一步富集提纯 SF_6 气体。

5) 理论计算见表 2。表 2 中总含量均为 1。

表 2 膜分离理论计算

Table 2 Membrane separation theory calculation

描述	流量/ ($\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压力/ Pa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	组分		
				SF_6	N_2	O_2
原料气	150.00	0.10	25	0.100 0	0.711 0	0.189 0
入膜气体	150.00	8.50	45	0.078 9	0.765 9	0.155 2
一级膜渗透气	89.74	0.05	45	0.000 7	0.750 7	0.248 6
入二级膜气	60.26	8.34	45	0.195 4	0.788 5	0.016 1
二级膜渗透气	37.09	0.01	45	0.002 8	0.971 2	0.026 0
SF_6 产品气	23.17	8.24	45	0.503 6	0.496 1	0.000 3

1.4 动力及检修模块

动力及检修模块的作用主要是为了将经过膜分离净化后的 SF_6 气体压缩存储, 也可用于变电站设备检修时的 SF_6 气体回收、回充以及抽真空工作, 设备设计完善, 可与其他模块联动运行, 也可单独使用, 具备完善的安全设置, 如压缩高压报警、过流接

地保护、以及抽真空高压保护等。动力及检修模块设计见图 6^[19-20]。

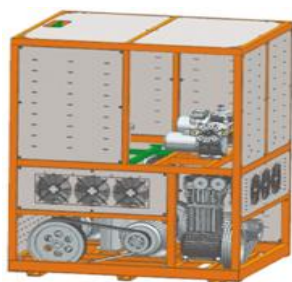


图 6 动力及检修模块

Fig. 6 Power and maintenance module

该模块主要由真空泵、压缩机、真空压缩机、风冷机组、过滤干燥器、电磁阀组等构成,可用于抽真空、处理 SF_6 气体中的分解物杂质、水分、粉尘等、回收回充等工作。回收系统采用双极回收,可自动切换负压回收,减少电气设备中 SF_6 气体残留。

2 SF_6 气体储存模块

SF_6 气体储存模块主要用于储存泄漏后 SF_6 气体,通过设计储存罐可单独使用,用于变电站检修 SF_6 气体回收时,储存使用。 SF_6 气体储存模块具有压力显示以及安全阀,工作压力可达 4.5 MPa,设计工作温度为 50 °C。其设计见图 7。



图 7 SF_6 气体储存模块

Fig. 7 SF_6 gas storage module

3 SF_6 气体泄漏预警回收系统

3.1 变电站设计布局图

变电站设计布局见图 8。

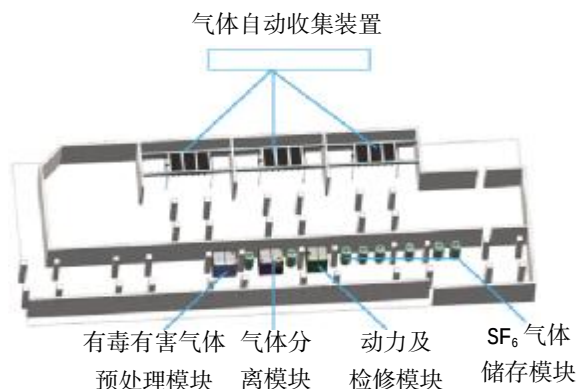
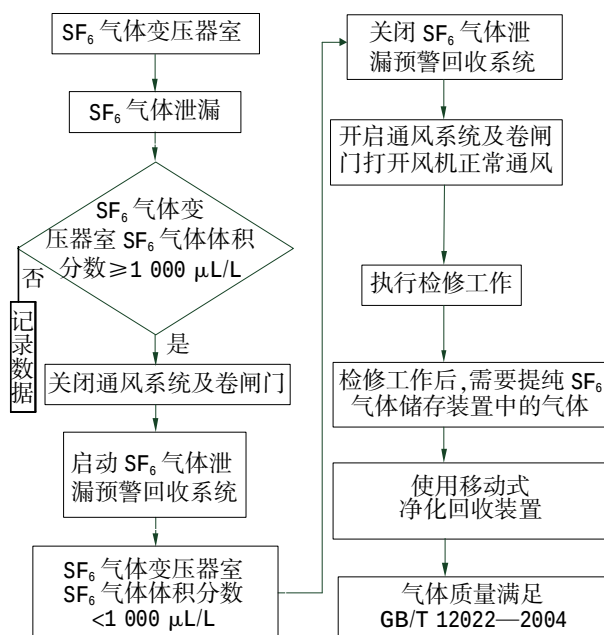


图 8 SF_6 气体泄漏预警回收系统

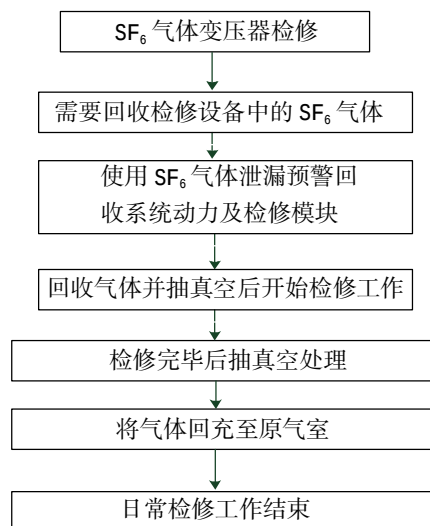
Fig. 8 SF_6 gas leakage warning recycling system

3.2 系统流程

当变电站 SF_6 电气设备发生泄漏时,控制系统收到报警信号,控制气体自动收集模块迅速封闭,并关闭通风排气系统及卷闸门;然后有毒有害气体预处理模块、气体分离模块、动力及检修模块、 SF_6 气体储存模块一次启动,进行气体回收净化。当设备日常检修时,可单独启动动力及检修模块,进行抽真空、气体回收回充操作。其流程见图 9。



(a) SF_6 气体变压器室故障应急处理流程



(b) SF_6 气体变压器日常检修处理流程

图 9 SF_6 气体泄漏预警回收系统工作流程

Fig. 9 SF_6 gas leakage warning recovery system workflow

4 结语

SF_6 气体泄漏预警回收系统可以完美解决变电站突发泄漏时,大量 SF_6 气体排放到空气中的问题。通过该系统气体自动收集模块、有毒有害气体预处

理模块、气体分离模块、动力及检修模块、SF₆气体储存模块、SF₆气体远程监测控制模块等6大模块的处理可以有效回收SF₆，进而可以有效避免环境污染和人员伤害。而且该设备也能够解决地下变电站日常检修需要进行SF₆气体回收回充操作时，SF₆回收设备不方便运输使用的问题。

参考文献:

- [1] 陈飞. GIS设备的发展和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Fei. Research development and application of GIS equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [2] 明亮. 我国六氟化硫行业发展分析[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(4): 73-77.
MING Liang. Development analysis of domestic sulfur hexafluoride industry[J]. Chemical Propulsion and Polymer Materials, 2010, 8(4): 73-77.
- [3] 杨师斌. 六氟化硫气体的危害与预防[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 56-60.
YANG Shibin. The harm and prevention of sulfur hexafluoride gas[J]. Journal of Industrial and Commercial University of Chongqing (Natural Science Edition), 2009, 26(1): 56-60.
- [4] 丁繁荣, 赵学军, 张敏强. 高压电气设备SF₆气体危害及防范措施[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 27.
DING Fanrong, ZHAO Xuejun, ZHANG Minqiang. Hazards of SF₆ gas in power-equipment on human and environment and preventive measures[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 27.
- [5] GB/T 3095—2012 环境空气质量标准[S]. 2012.
GB/T 3095—2012 Ambient air quality standards[S]. 2012.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1995 Report of the scientific assessment working group of IPCC [R]. Switzerland: IPCC, 1995.
- [7] CIGRE WG 23-10 SF₆ and the global atmosphere[J]. Electra, 1996(164): 121-131.
- [8] 崔武孝, 刘永生, 闫晓东. 活性炭吸附剂在六氟化硫生产中的应用[J]. 无机盐工业, 2005, 37(4): 53-55.
CUI Wuxiao, LIU Yongsheng, YAN Xiaodong. Application of the activated carbon adsorbents in SF₆ production[J]. Inorganic Salt Industry, 2005, 37(4): 53-55.
- [9] 顾嘉嘉, 谷宏专. 分子筛在气体分离与净化中的应用[J]. 能源环境保护, 2005, 19(1): 15-18.
GU Jiajia, GU Hongzhan. Application of zeolites in separating and purifying gases[J]. Energy Environmental Protection, 2005, 19(1): 15-18.
- [10] 任滨侨, 张玉婷, 赵路阳, 等. 分子筛在气体分离中的应用[J]. 黑龙江科学, 2012, 3(9): 49-51.
REN Bingqiao, ZHANG Yuting, ZHAO Luyang, et al. The application of zeolite in the area of gas separation[J]. Heilongjiang Science, 2012, 3(9): 49-51.
- [11] 王景儒. 六氟化硫分解气及处理方法[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2003, 1(6): 16-18.
WANG Jingru. Decomposition gas of sulfur hexafluoride and treating methods[J]. Chemical Propulsion and Polymer Materials, 2003, 1(6): 16-18.
- [12] 陆生贵. SF₆气体浓度在线监测系统的研究与设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
LU Shenggui. SF₆ gas concentration on-line monitoring system for the research and design[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2009.
- [13] 王琦, 邱毓昌. 六氟化硫/氮混合气体分离回收方法[J]. 绝缘材料, 2003(3): 33-36.
WANG Qi, QIU Yuchang. Gas separation and recovery methods for SF₆/N₂ gas mixtures[J]. Insulating Materials, 2003(3): 33-36.
- [14] 程志林, 晃自胜, 万惠霖. 气体分离分子筛膜[J]. 化学进展, 2004, 16(1): 61-67.
CHENG Zhilin, HUANG Zisheng, WAN Huilin. Progress in the research of zeolite membrane on gas separation[J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(1): 61-67.
- [15] PITTROFF M, VONDENHOFF F. Separation of SF₆/N₂ mixtures[C]//Gaseous Dielectrics IX, Kluwer Academic/ Plenum Publishers. [S.l.]: IEEE, 2001: 561-566.
- [16] FREEMAN B D, PINNAU I. Polymer membranes for gas and vapor separation[R]. USA: American Chemical Society, 1999.
- [17] YAMAMOTO O, TAKUMA T, KAWAMURA A, et al. SF₆ gas recovery from SF₆/N₂ mixtures using polymer membrane[C]//Gaseous Dielectrics IX, Kluwer Academic/ Plenum Publishers. [S.l.]: IEEE, 2001: 555-560.
- [18] YAMAMOTO O, TAKUMA T, KAWAMURA A. Recovery of SF₆ from SF₆/N₂ gas mixtures by using a polymer membrane[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 32-37.
- [19] 李建国, 王兰兰. RF系列六氟化硫回收净化再生系统的原理及应用[J]. 电力设备, 2008, 9(5): 50-52.
LI Jianguo, WANG Lanlan. RF series sulfur hexafluoride recycling principle and application of clean regeneration system[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(5): 50-52.
- [20] DL/T 662—2009 六氟化硫气体回收装置技术条件[S]. 2009.
DL/T 662—2009 Specification for SF₆ gas refilling and recovery device[S]. 2009.

陈平(1965—), 男, 高级工程师, 从事电力设备状态评价工作。