

## 72.5 kV 环保型 GIS 技术现状及发展趋势

刘景博, 武胜斌, 李佩丽, 杜文娟, 陈志彬

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

**摘要:** SF<sub>6</sub> 的温室效应是 CO<sub>2</sub> 的 23 900 倍, 因此在高压电器中减少 SF<sub>6</sub> 气体用量, 采用环境友好型气体作为绝缘介质已成为未来的发展趋势。随着技术的进步, 特别是复合绝缘技术的发展, 陆续出现了多种类型的 72.5 kV 环保型 GIS。文中对当前国内外出现的 72.5 kV 不同类型的环保型 GIS 进行了分类归纳, 并对典型的产品进行了介绍。同时对 72.5 kV 环保型 GIS 的关键技术——复合绝缘技术进行了研究和分析, 探讨环保产品技术的发展方向与趋势。

**关键词:** 72.5 kV; 环保型 GIS; 干燥空气

**中图分类号:** TM56      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0099-05

Technology Status and Development Trends of 72.5 kV Environmentally Friendly GIS

LIU Jing-bo, WU Sheng-bin, LI Pei-li, DU Wen-juan, CHEN Zhi-bin

(Xi'an High Voltage Apparatus Rresearch Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The greenhouse effect of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) is 23 900 times that of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Therefore, it has become the development trends in the future that to reduce the use of SF<sub>6</sub> and to adopt environmentally friendly gas as the insulating medium in the high voltage apparatus. With the development of the technology, especially the development of the composite insulation technology, various types of 72.5 kV environmentally friendly gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) have appeared. Different types of the 72.5 kV environmentally friendly GIS which appeared at home and abroad, have been classified in the paper, and typical products have been presented. Meanwhile, the key technology, the composite insulation technology, has been investigated in the paper. The development trends of the environmentally friendly products are also discussed.

**Key words:** 72.5 kV; environmentally friendly GIS; dry air

### 0 引言

1997 年的《联合国气候变化框架公约》京都会议后, 中国分别于 1998 年 5 月签署、2002 年 9 月核准了《京都议定书》。《京都议定书》中规定的六种温室气体之一的六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体对大气的温室效应是 CO<sub>2</sub> 的 23 900 倍。中国在“十一五”期间也已明确要履行《京都议定书》义务, 《国家十二五规划纲要》中明确提出要控制温室气体排放, 探索建立完善温室气体排放统计核算制度。SF<sub>6</sub> 气体在电力输变电设备中主要作为绝缘、灭弧介质使用, 电力输变电设备在耐压试验、容量开断试验、出厂试验、设备转移、

运输、安装、运行、设备检修<sup>[1]</sup>等时不恰当处理是向大气排放的主要因素, 因此降低 SF<sub>6</sub> 气体用量, 采用环境友好型气体作为绝缘介质越来越受到人们的重视。

随着复合绝缘技术的不断发展, 有限元分析技术的应用, 在相同空间条件下, GIS 保持原有电场状态, 对 SF<sub>6</sub> 气体的充压要求<sup>[2]</sup>在逐渐降低, 因此在体积不变的情况下, GIS 可以采用降低 SF<sub>6</sub> 充气压力或绝缘性能低的环境友好型气体来取代 SF<sub>6</sub> 气体<sup>[3]</sup>, 于是陆续出现了多种 72.5 kV 环保型 GIS<sup>[4-5]</sup>。

### 1 环保型 GIS 的应用情况及分类

66 kV 电压等级的电网在我国仅分布在东北地

区, 72.5 kV 电压等级的 GIS 在国内的年需求量并不大, 因此多数开关厂家不太愿意投入大量资源去研制该电压等级的产品, 通常将 126 kV 电压等级的 GIS 应用于 72.5 kV。

66 kV 电压等级的电网在国外分布很广, 很多地区都有该电压等级的电网, 但由于绝缘技术、灭弧技术以及成本等方面的原因, 目前该电压等级国外的主流产品与国内相似, 大多采用 126 kV 电压等级 GIS 替代 72.5 kV。但随着开关制造行业竞争日趋激烈和人们对环保事业关注度越来越高, 这种格局正在逐渐改变。这种改变主要体现在两方面, 一方面是出现了使用少量 SF<sub>6</sub> 气体的 GIS, 另一方面是出现了替代 SF<sub>6</sub> 气体的 GIS。

全球变暖是重要的全球环境问题, 为了降低 SF<sub>6</sub> 气体对环境的影响, 主要开展了 3 方面的行动: 减少 SF<sub>6</sub> 气体的使用量; 采用对环境友好的绝缘气体; 采用回收技术减少排放到大气中的 SF<sub>6</sub> 气体。SF<sub>6</sub> 气体回收主要对象是针对产品使用者而言, 减少 SF<sub>6</sub> 气体的使用量和采用低温室效应的环境友好型气体作为绝缘介质则是产品设计者面临的挑战。

根据气体的使用情况将环保型 GIS 分作: ①小型化紧凑型 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备; ②低压力 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备; ③高压力环境友好型气体绝缘金属封闭开关设备; ④低压力环境友好型气体绝缘金属封闭开关设备。

## 2 环保型 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备

### 2.1 小型化紧凑型 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备

小型化紧凑型 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备, 指在传统 GIS 的基础上, 通过优化结构设计, 在体积和使用 SF<sub>6</sub> 气体量都大幅降低的 GIS。典型代表产品是 ABB 公司 2010 年 11 月 10 日发布的 72.5 kV 的 ENK 系列 GIS, 见图 1。该产品结合了已有 ENK 系列和 ELK-04 产品的经验和优点, 它与 ABB 原有产品相比体积减小了 25%, SF<sub>6</sub> 气体的使用量减少了 1/2。

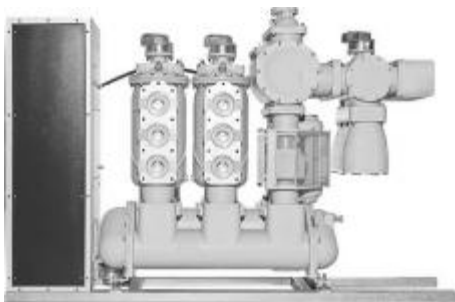


图 1 ABB 公司的 72.5 kV 的 ENK 系列 GIS  
Fig. 1 72.5 kV ENK series GIS of ABB

该产品使用多种创新集成技术, 是小型化紧凑型的精品。首先断路器三相之间采用了三角形布置, 而且三相采用一体浇注方式。这种布置和传动方式的创新设计, 使得整间隔的宽度仅为 800 mm。主母线与隔离/接地三位置开关实现了高度集成。电流互感器在 SF<sub>6</sub> 气体之外, 进一步减少了 SF<sub>6</sub> 气体的使用量。该产品在 20 °C 时满足绝缘的最低压力为 0.42 MPa, 额定电流 2 500 A, 额定开断短路电流为 40 kA, 高度 2 400 mm, 长度 3 200 mm。布线方式方面满足双母线布线方式, 同时完全满足单母线布线方式。

### 2.2 低压力 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备

72.5 kV 低压力 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备, 被认为是在传统中压 40.5 kV 的 C-GIS 基础上发展而来, 通常称为充气柜。充入的气体压力较低, 密封壳体一般通过板材焊接而来, 采用表面涂覆绝缘层与气体绝缘复合的绝缘方式。该类产品的典型代表有国内华利电器的 ZHN3-72.5(见图 2)和国外三菱电机的 GX-70V(见图 3)。



图 2 ZHN3-72.5 型气体绝缘金属封闭式组合电器  
Fig. 2 ZHN3-72.5 GIS



图 3 GX-70V 型气体绝缘金属封闭式组合电器  
Fig. 3 GX-70V GIS

ZHN3-72.5 是华利电器集团的华德海泰电器有限公司自主研发的 72.5 kV 环保型 C-GIS, 该产品

于 2009 年在机械工业高压电器产品质量检测中心(沈阳)完成型式试验,采用了 0.02 MPa 的 SF<sub>6</sub> 作为相间和对地的绝缘介质,环保型 72.5 kV C-GIS 的 SF<sub>6</sub> 气体使用量只有传统 GIS 产品(0.5 MPa)SF<sub>6</sub> 气体使用量的 1/18,柜体宽度为 1 000 mm。该产品集真空灭弧、固封极柱、气体绝缘和界面绝缘技术于一体的新一代高压成套电器产品。产品采用智能控制和保护单元,具有强大的控制、保护、测量功能,可以满足自动化要求。

三菱电机的 GX-70V 型产品,间隔宽 1 000 mm,高 2 700 mm,深 2 200 mm。采用了 0.05 MPa 的 SF<sub>6</sub> 作为相间和对地的绝缘介质,额定电流为 1 250 A,额定短路开断电流为 31.5 kA,操作机构为电动弹簧机构,采用真空断路器,满足户外使用条件。

### 2.3 高压环境友好型气体绝缘金属封闭开关设备

众所周知,在相同环境下干燥空气要取代 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质,必须提高干燥空气的气体压力<sup>[7-9]</sup>。这种高压干燥空气绝缘金属封闭开关设备的典型产品来自日立公司,见图 4。

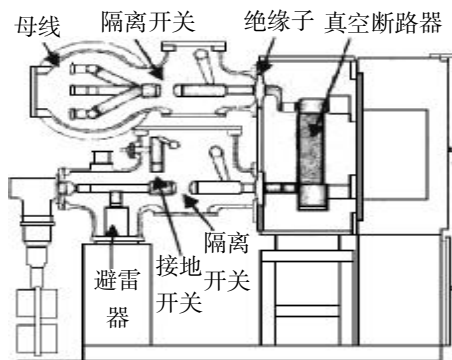


图 4 日立公司的高压力空气绝缘 GIS

Fig. 4 High-pressure air-insulated GIS of Hitachi

该产品间隔宽度 900 mm,高 2 850 mm。额定电压为 0.5 MPa,采用真空断路器,额定电流 1 200 A,额定开断电流为 25 kA,满足户外使用条件。该产品将真空断路器应用于高压环境,解决了高压下真空灭弧室的波纹管所存在的机械性能问题,并通过了 10 000 次的机械寿命验证试验。

### 2.4 低压力环境友好型气体绝缘金属封闭开关设备

高压容器虽然在高电压 GIS 中的应用已经非常成熟,但由于制造成本较高,且制造周期较长,因此在经济上和效率上都不如低压力板材焊接容器,相同体积条件下开关柜中充入气体压力体现了该产品的复合绝缘技术水平。要实现低压力干燥空气替代 SF<sub>6</sub> 作为绝缘介质,就必须降低电场分布对气体绝缘介质的绝缘要求,或提高复合绝缘技术水平。

当前主要采用导体表面涂覆固定绝缘层和安装绝缘隔板两种方式,在此方面应用成功的典型代表是日本 AE 帕瓦株式会社和三菱电机两家公司,见图 5、6。



图 5 日本 AE 帕瓦的 ECG-60 型 GIS

Fig. 5 ECG-60 GIS of AE-POWER from Japan



图 6 三菱电机 HG-VA 型 GIS

Fig. 6 HG-VA GIS of Mitsubishi Electric

图 5 为日本 AE 帕瓦株式会社研制的 72 kV-25/31.5 kA 干燥空气绝缘环境型 C-GIS,型号为 ECG-60,充入的干燥空气压力为 0.16 MPa,间隔宽度 900 mm,高 2 850 mm,深 2 300 mm。额定电流 1 200 A,额定开断电流 31.5 kA。

三菱电机公司坚持环保、省地、安全可靠、少维护、低寿命周期费用的开发理念,实现了世界上首台低压力(充入的干燥空气压力为 0.15 MPa)干燥(相对湿度 1 000×10<sup>-6</sup> 以下)空气复合绝缘的 HG-VA 型 GIS,与原有 SF<sub>6</sub> 绝缘的外观尺寸相同。采用的机构为永磁操动机构,而且配备了 VCB 状态监测系统。额定电压 72 kV,额定耐受雷电冲击 350 kV(隔离开关断口 400 kV),额定耐受工频 140 kV(隔离开关断口 160 kV),额定频率 50/60 Hz,额定电流 800/1 200 A,额定短时耐受电流 31.5 kA,额定气体压力 0.15 MPa,额定开断电流 25/31.5 kA,依据标准:JEC-2300。

HG-VA 的主母线采用插拔的结构方式,省了现场安装时的气体处理工作,简化了现场工作量。从调配投运到报废回收的花费低廉,没有使用温室气体,部分部件可回收再利用,节约资源,可靠性高,无须气体回收装置,真空度适时监测<sup>[9]</sup>,铝材的使用使得产品重量轻、体积小。该产品配备了状态维护功能<sup>[10-11]</sup>,因为 VCB 的分合电流将引起触头的磨损<sup>[12]</sup>,以及摩擦引起的机构磨损<sup>[13]</sup>,这些磨损将反映在永磁机构的线圈电流波形上<sup>[14-15]</sup>,通过线圈电流波形

分析技术推算出设备的状态,从而实现了状态维护(CBM)功能<sup>[6]</sup>。此外该产品还配备了局部放电监测设备,局部放电的监测是通过天线接收具有局部放电信号的电磁波,然后通过滤波技术提取局部放电信号<sup>[17-18]</sup>。

### 3 产品发展的技术分析

66 kV 电网在中国被划分为高压,采用与 110 kV 电网相同的标准与规范。66 kV 被认为是高压与中压的分界值,因此该电压等级开关产品的研制也就存在两种趋势,一种是通过降低高压开关产品的相关技术参数和小型化设计来实现该产品的设计,另外一种是通过对中压开关产品相关技术及参数进行升级与创新来实现该产品的设计。72.5 kV 环保型 GIS 虽然存在上述两种趋势,但并没有明确的界定。

72.5 kV 的 ENK 系列 GIS 是典型的以 SF<sub>6</sub> 气体绝缘和灭弧技术为基础的高压技术产品,该产品具有电压稍高、电流略大、体积较小、灭弧能力强等的显著优点,此外该产品绝缘技术与灭弧技术在高压产品上已经应用了几十年,成熟的技术代表着高的可靠性,因此该产品在今后很长一段时期内依然会被电力部门广泛采用。

以环保型气体绝缘和真空灭弧技术为代表的中压技术,由于其具备显著的环保特征,因此其应用前景被广泛地看好。特别是近些年固体与气体的复合绝缘技术进一步成熟,国内外均研发出了 72.5 kV 电压等级的低压力 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备,国外已研发出了该电压等级高压力和低压力干燥空气绝缘金属封闭开关设备。但由于该类产品绝缘方式发生了改变,其散热性能显著下降,从而导致其额定电流处于 1 250 A 左右的水平。

GIS 中复合绝缘技术的应用降低了对气体绝缘性能的要求。图 7 表明了复合绝缘的原理,图中以原有 SF<sub>6</sub> 气体绝缘水平为标准,要达到此标准的绝缘水平有两种方法,一种方法是采用高压力干燥空气,另外一种方法就是采用低压力干燥空气和固体绝缘的复合绝缘方式。可见,复合绝缘是解决低压力下干燥空气绝缘强度低的有效途径。

人们对电真空技术越来越深入的研究,真空灭弧技术不断取得突破性的成果,特别是 126 kV 与 145 kV 真空断路器的成功研制更是具有里程碑意义,更高电压等级的真空断路器的成功开发使开发高电压等级的非 SF<sub>6</sub> 高压电器成为可能。

此外,环保型 GIS 的发展还受散热技术、压力容器设计与制造技术、固体绝缘层覆盖工艺水平、隔离

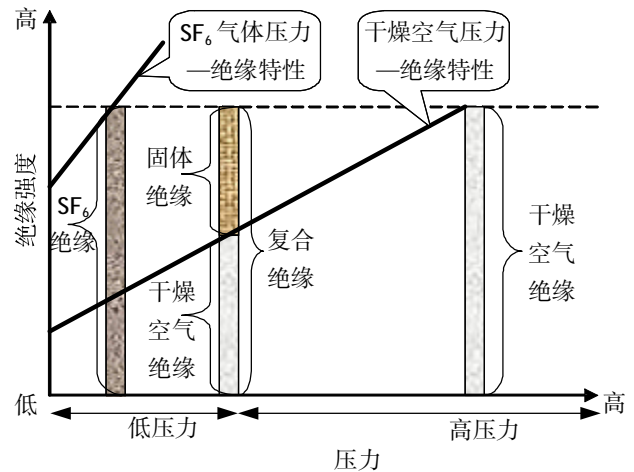


图 7 复合绝缘原理图

Fig. 7 The principle of composite insulation

开关的灭弧技术、经济性等方面的影响。

### 4 结语

通过文中对典型 72.5 kV 环保型 GIS 的介绍与分析,可以看到环境型 GIS 发展趋势表现在:

- 1) SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备的体积在向小型化的方向发展,气体使用量在向少量化的方向发展;
- 2) 非 SF<sub>6</sub> 气体绝缘金属封闭开关设备中绝缘气体在向低压力的方向发展;
- 3) 气体绝缘金属封闭开关设备均由单一的气体绝缘方式发展为固体与气体的复合绝缘方式;
- 4) 操作、监测与控制越来越智能化;
- 5) 寿命周期内的总成本越来越低。

可见产品的研发主要体现在环保、智能化与经济性 3 方面,当前应将实现 SF<sub>6</sub> 气体的零排放作为高压电器设计人员的首要目标,此目标与可持续发展的科学发展观相一致。

### 声明:

文中所引用的产品及技术参数系相应公司资料,版权分别归所属公司所有。

### 参考文献:

- [1] 张强华,谭燕,邬建刚. 40.5 kV 无 SF<sub>6</sub>C-GIS 开关柜研究[J]. 高压电器,2011, 47(6):29-33.  
ZHANG Qiang-hua, TAN Yan, WU Jian-gang. Research of 40.5 kV non SF<sub>6</sub> C-GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6):29-33.
- [2] 牛虎明. 关于环境保护与高压开关设备发展的探讨[J]. 高压电器技术信息,2007,3(5):16-20.

- NIU Hu-ming. Discussion on environmental protection of HV switchgear [J]. High Voltage Apparatus Technical Information, 2007, 3(5): 16-20.
- [3] GOSHIMA H, SHINKAI H, YASHIMA M. Lightning impulse breakdown characteristics of high-pressure N<sub>2</sub> as an alternative insulation gas to SF<sub>6</sub>[C]// Proceeding of 9th International Symposium on Gaseous Dielectrics. Japan: IEEE, 2004:359-364.
- [4] 陈 瑛,译. 7.2~72.5 kV 非 SF<sub>6</sub> 气体绝缘开关柜[J]. 高压电器技术信息, 2009, 5(4): 46-53.  
CHEN Ying, Edit and translation. 7.2~72.5 kV non SF<sub>6</sub> gas insulation switchgear[J]. High Voltage Apparatus Technical Information, 2009, 5(4): 46-53.
- [5] 耿西京,译. 日本研制的 72/84 kV 环保型罐式真空断路器[J]. 高压电器技术信息, 2010, 6(2): 33-35.  
GENG Xi-jing, Edit and translation. 72/84 kV environment dead tank circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus Technical Information, 2010, 6(2): 33-35.
- [6] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.  
QIU Yu-chang. GIS and insulation technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994.
- [7] 陈 元. 干燥空气的制取及其在电力设备检修中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(3): 30-33.  
CHEN Yuan. Application of dry air in overhaul of transformer and reactor [J]. Electrical Equipment, 2005, 6(3): 30-33.
- [8] 李建基,译. 72.5 kV 非 SF<sub>6</sub> GIS 的研发[J]. 高压电器技术信息, 2007, 3(6): 41-46.  
LI Jian-ji, Edit and translation. Development of SF<sub>6</sub>-free 72.5 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus Technical Information, 2007, 3(6): 41-46.
- [9] 李恩玲,刘峰擎. 真空开关管内真空度检测的研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(2): 192-195.  
LI En-ling, LIU Feng-qing. Study of vacuum degree detection in a vacuum switch [J]. Transaction of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2): 192-195.
- [10] 臧春艳,胡李栋. 智能型开关电器的研发现状与分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 1-5.  
ZANG Chun-yang, HU Li-dong. Development and analysis of intelligent switch devices [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 1-5.
- [11] 赵丽华,高进强,郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 1-4.  
ZHAO Li-hua, GAO Jin-qiang, GUO Xiang-guo. Discussion on intelligent electric power equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 1-4.
- [12] 李兴文,陈德桂. 空气开关电弧的数学模型及其特性的研究综述[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 269-273.  
LI Xing-wen, CHEN De-gui. Review of the investigations on the modeling and characteristic of air switching arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 269-273.
- [13] 范兴明,贺家敏,潘永成,等. 真空断路器电磨损监测与诊断方法综述[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 81-86.  
FAN Xing-ming, HE Jia-min, PAN Yong-cheng, et al. Review of monitoring and diagnosis methods for vacuum circuit breaker electrical wear [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 81-86.
- [14] 魏本纪. 双稳态永磁机构与真空断路器的特性配合问题探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(1): 18-20.  
WEI Ben-ji. Discussion on characteristic matching of bi-stable permanent magnetic actuator and vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(1): 18-20.
- [15] 赵 洋,刘汉宇,曾庆军. 高压真空断路器机械特性在线监测系统研制[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 91-95.  
ZHAO Yang, LIU Han-yu, ZENG Qing-jun. Study on on-line monitoring for mechanical characteristics of high voltage vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 91-95.
- [16] 邹积岩,段雄鹰,罗 彦. 智能真空开关中的智能检测系统[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 1-4.  
ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, LUO Yan. Online monitoring system of intelligent vacuum circuit breakers [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 1-4.
- [17] 邹建明. 在线监测技术在电网中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 48-51.  
ZOU Jian-ming. Application of on-line monitoring technology on power grid [J]. High Voltage Engineering 2007, 33(8): 48-51.
- [18] 黎大健,梁基重,步科伟,等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 75-78.  
LI Da-jian, LIANG Ji-zhong, BU Ke-wei, et al. Ultrasonic detection of partial discharge on typical defects in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 75-78.
- 刘景博(1966—),男,高工,从事高压开关开发和工程应用。