

一种采用洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型 GIS 的研究和应用

李德军¹, 沈 威², KUSCHEL M³, DEMANN R¹

(1. 西门子中国有限公司上海分公司, 上海 200082; 2. 上海西门子高压开关有限公司, 上海 200245;

3. Siemens AG, High Voltage Products, Berlin 13629, Germany)

摘要: 对于高压产品尤其是 GIS/AIS 开关, SF_6 一直被作为主要的灭弧和绝缘介质广泛使用。但因为其非常高的全球变暖潜能 ($\text{GWP}=23\,900$), 在过去几十年人们从没停止过对其替代气体的研究和寻找工作。近年氟化腈 (如: $\text{C}_4\text{-PFN}$ 即 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$) 和氟代酮 (如: $\text{C}_5\text{-PFK}$ 即 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$) 气体及其混合气体作为潜在的 SF_6 替代气体受到关注和初步应用; 同时采用基于真空灭弧室灭弧配合洁净空气绝缘的 GIS/AIS 开关产品上也被开发并有了实际应用。文中简单总结了现有 SF_6 替代气体方案的技术现状, 并重点介绍一种基于洁净空气绝缘和真空灭弧技术、不采用 SF_6 和任何氟类气体的 GIS 产品在研发过程中的一些关键技术, 试验发现和最终应用情况。首先通过洁净空气在 GIS 中不同工况下的绝缘击穿试验和典型缺陷下的局放试验确立该新型 GIS 的尺寸参数标准; 其次比较了 GIS 隔离开关和接地开关在洁净空气、 $\text{C}_4\text{-PFN}$ 混合气体、 $\text{C}_5\text{-PFK}$ 混合气体以及 SF_6 气体等不同工况下的小电流开合性能, 并确定了洁净空气的相关开合特性和相对的优缺点; 然后描述了为了满足高压断路器性能对真空灭弧室关键技术的相关改进情况; 此外还从环境、安全和运维角度, 对使用上述几种气体的开关进行了优劣势评估和讨论; 最后结合该类新型开关设备的现场运行经验, 认为基于洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型 GIS 是理想的 SF_6 GIS 的替代产品。

关键词: GIS; 全球变暖潜能 (GWP); SF_6 替代气体; 洁净空气; 真空灭弧室; $\text{C}_4\text{-PFN}$; $\text{C}_5\text{-PFK}$; 绝缘介质和绝缘性能

Development and Application of Environment-friendly GIS Combined Clean Air and Vacuum Interruption Technology

LI Dejun¹, SHEN Wei², KUSCHEL M³, DEMANN R¹

(1. Siemens China Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai 200082, China; 2. Shanghai Siemens High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 3. Siemens AG, High Voltage Products, Berlin 13629, Germany)

Abstract: Sulphur hexafluoride (SF_6) is widely used as main medium for arc quenching and insulation gas in AIS and GIS high voltage products. However, it is also a gas with a high global warming potential ($\text{GWP} = 23\,900$), therefore, searching for alternative gases has been ongoing since the past several decades. In recent years, perfluoronitrile (e.g. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ called as $\text{C}_4\text{-PFN}$) and perfluoroketone (e.g. $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ called as $\text{C}_5\text{-PFK}$) have been proposed as alternative to SF_6 . On the other hand AIS and GIS high voltage products based on vacuum interrupting and clean air technology are successfully introduced into operation. In the present article the technical status of SF_6 alternative approaches is summarized and an SF_6 - and F-gas free GIS based on clean air insulation and vacuum switching technology is presented. Several key technical considerations, tests and applications with regard to this GIS are given. Firstly, criteria for reliable and safe insulating dimensions of this new GIS are gained through dielectric breakdown tests under various conditions and typical partial discharge tests using clean air as the medium. And vacuum interrupting unit is accordingly improved in certain aspects to meet requirements for high-voltage circuit-breakers. Then the low-

current switching tests are carried out on real GIS disconnector and earthing switch, respectively using clear air, C₄-PFN mixtures, C₅-PFK mixtures and SF₆ as medium, to determine the switching performance in clean air in comparison with other above gases, and the benefits and drawbacks within clean air are described as well. Moreover, the crucial technical improvements of VIU for HV circuit breaker application are introduced. Finally GIS with these gases are also compared from perspective of safety, environment, operation and maintenance. In conclusion, combining with experiences of real applications of such switchgear, we do believe that this SF₆-/F-gas free GIS, based on clean air insulation and vacuum switching technology, is the ideal replacement of SF₆ GIS.

Key words: GIS; GWP; SF₆ alternatives gas; clean air; vacuum interrupter; C₄-PFN; C₅-PFK; insulating media and insulating performance

0 引言

SF₆以其卓越的绝缘性能和灭弧性能,一直被广泛应用于高压领域,尤其是GIS、AIS等高压开关产品。同时作为一种全球变暖潜能(GWP)非常高的温室气体,SF₆对环境的负面影响也为人们所诟病。中国政府官方报告^[1]显示,仅2012年全国SF₆排放/泄漏量达1 000 t,相当于近2 390万t CO₂排放量。还有数据显示,中国电力工业每年对SF₆的需求量接近1万t。所以推进电力开关设备SF₆气体替代技术也被中国政府纳入非CO₂类温室气体减排的重要措施中;在国际上,各国政府也都在限制SF₆的使用量,如欧盟的含氟气体法规(F-gas directive)极有可能将禁止SF₆气体的使用纳入2022年的法规修改议程。因此在高压开关领域,寻找SF₆气体的替代技术变得更加迫切。

事实上,从20世纪70年代开始人们一直在探索和研究不同的气体来代替SF₆作为高压开关尤其是GIS开关的绝缘和灭弧用介质。Wootton等^[2]验证出多种绝缘强度优于SF₆的气体,但是这些气体要么具有毒性,要么具有很高的臭氧破坏潜能(ODP),亦或会在电弧的作用下分解产生出碳类析出物质造成绝缘劣化。Niemeyer等^[3]的研究则关注于替代气体的其他几个指标,诸如全球变暖潜能(GWP)、在电场长期作用下的稳定性以及临界液化温度等。而Christophorou等^[4]进行了意在降低GWP水平的不同种SF₆混合气体的综合性研究,并发现在氮气(N₂)中混入少量的SF₆气体会产生协同效应从而显著提升混合气体的绝缘强度。目前在国家电网公司推动下一种特定混合比的SF₆/N₂混合气体(30% SF₆ + 70% N₂)在若干变电站的GIS母线上进行了试点应用,但这种SF₆/N₂混合气体的GWP仍然较高。近年来三氟碘甲烷(CF₃I)气体也引起了广泛的关注,人们对其分别与N₂和CO₂混合的气体进行了大量的研

究。邓云坤等^[5]通过实验发现在相同压力下,CF₃I体积比分别为20%和30%的CF₃I-N₂混合气体能够分别达到纯SF₆气体50%和55%以上的工频耐压水平。然而作为一种CMR为3级的对人体有潜在危害的气体,CF₃I在开断时还会产生部分不可逆的分解,因此其在高压GIS中的应用前景还有待进一步的试验研究。

此外氟化腈(fluoronitrile,如C₄-PFN或称作C₄F₇N)和氟代酮(fluoroketone,如C₅-PFK或称作C₅F₁₀O)类气体与CO₂或N₂混合后具有优于其他SF₆替代气体的绝缘性能和开断关合性能,近年已经被尝试应用到中高压开关行业^[6-8]。

任何一种气体想成为SF₆的理想替代品,其必须满足国际上的公认的特性^[9]:①低的GWP和ODP;②低毒或无毒,不可燃;③高的绝缘强度、灭弧能力和散热性能;④稳定性和材料可混用性;⑤市场上易于获得。

鉴于上述特性要求,结合多年的内部研究,西门子采用了洁净空气(79.5% N₂ + 20.5% O₂)来替代SF₆气体作为其新一代GIS高压开关产品的绝缘介质。洁净空气是一种稳定的、液化温度低的、GWP/ODP=0、无毒环保的气体。同时应用最新改进的真空灭弧技术来提升真空灭弧室的绝缘、通流和开合电流等能力,替代常规SF₆灭弧室用于高压GIS断路器。文中将分享该系列产品在研发过程中的一些关键技术和发现及其应用。

1 SF₆主要替代气体的绝缘性能

具有可靠的绝缘能力是保证GIS安全运行的一个关键,因此有必要对主要的SF₆替代气体的绝缘性能展开研究和比较,为设计选型提供必要的技术数据支持。近年来主要被研究和试点应用的替代气体绝缘性能和其他主要特性指标见表1^[10-16]。

从表1可以看出,在相同气压并且气体不液化的情况下,如果纯SF₆的绝缘强度是1,那么洁净空

表1 主要替代气体和SF₆关键特性比较

Table 1 Comparison of key characteristics between SF₆ and main alternative gases

名称	SF ₆	洁净空气	氟化腈 C ₄ -PFN	氟代酮 C ₅ -PFK
分子式	SF ₆	N ₂ /O ₂ (79.5%/20.5%)	(CF ₃) ₂ CFCN	(CF ₃) ₂ CFC(O)CF ₃
GWP	23.900	0	2.210	1
沸点/°C	-64	< -183	-4.7	+26.9
LC50/(μL·L ⁻¹)	—	—	10 000~15 000	> 20 000
TWA/(μL·L ⁻¹)	1 000	—	65	225
运载气体 (混合气态)	纯SF ₆ 或 与N ₂ , CF ₄ 的各种混合	不适用	对 GIL:96% CO ₂ 对 GIS:94% CO ₂	83% CO ₂ /11% O ₂
GWP	< 23.900	0	327~462	< 1
沸点 /°C	<- 64(可变的)	< -183	-30~-25	0
相同压力下的绝 缘强度/p.u.	1	约 0.43	对 GIL:0.70~0.75 对 GIS:< 0.75	与空气混合约 0.70
电离 /分解 (化学 平衡常数)	可逆 (约 2 000 K)	可逆 (N ₂ 约 7 000 K, O ₂ 约 4 000 K)	不可逆 (> 920 K)	不可逆 (约 970 K)
燃弧分解物	HF、SO ₂ 、硫化物	如果放电: 氮化合物 臭氧	HF、CO、OF ₂ 、CF ₃ CN、 C ₂ F ₅ CN、C ₂ F ₆ 对两种气体: C ₄ F ₁₀ 、C ₃ HF ₇ ; C ₄ F ₈ , C ₄ F ₆ , C ₃ F ₆ , C ₂ F ₃ N, C ₂ N ₂	HF、CF ₄ 、C ₂ F ₆ 、C ₃ F ₈

注:LC50 = 大鼠吸入 4 h 后的半数致死浓度;TWA = 时间加权的平均浓度(通常指该浓度下连续工作 8 h 不会出现危险)。

气只有其 43%左右的绝缘水平,C₄-PFN 混合气体和 C₅-PFK 混合气体的绝缘强度则大约分别是 SF₆的 75%和 70%。基于现有的研究成果,文中将对不同类的替代气体的绝缘性能展开讨论。

1.1 天然气体及其混合气体的绝缘性能

来自于自然界的气体或其相互混合气体,如:氮气(N₂)、二氧化碳(CO₂)、N₂/CO₂混合气体以及洁净空气(79.5% N₂ + 20.5% O₂)都是无毒的和化学稳定的,因此都可以作为高压 GIS 用的潜在绝缘气体来使用。但其共同的缺点是:相同气压下,其绝缘强度比 SF₆低。相同中等气压时(0.4 MPa ≤ P ≤ 0.7 MPa),几种天然气体与 SF₆气体分别在雷电冲击电压和交流电压工况下的绝缘特性比值见表 2^[17]。气体绝缘能力的降低可以通过合理的设计和优化压力配合得到增强和改善,从而满足新型环境友好型 GIS 产品的开发。

表2 主要天然气体和SF₆的绝缘性能比较

Table 2 Comparison of dielectric performance between SF₆ and main nature gases

气体类型	绝缘强度(同等气压下与 SF ₆ 的比值)		雷电冲击击穿电压与交流击穿电压(峰值)的比值
	雷电冲击电压	交流电压	
氮气(N ₂)	0.30	0.35	1.23
二氧化 碳(CO ₂)	0.39	0.42	1.17
干燥空气	0.43	0.43	1.36
SF ₆	1.00	1.00	1.41

1.2 氟代酮类气体及其混合气体的绝缘性能

含氟代酮类尤其是 C₅-PFK 的混合气体也是可替代气体的有力竞争者。Mantilla 等^[15]试验得出:分别加入了不同氟代酮的混合气体在不同压力情况下对其绝缘强度的影响,例如:95%的空气与 5%的 C₅-PFK 混合气体,只需比 SF₆气体高 0.3 MPa 的压力

就能达到近似于 SF_6 的绝缘强度。Simka等^[18]也研究指出:在7 bar的压力下,混入6%的 $\text{C}_5\text{-PFK}$ 的空气具有 SF_6 在0.45 MPa压力下95%的绝缘强度。此外国内李兴文等^[19]通过试验得出混合气体(95% CO_2 + 5% $\text{C}_5\text{-PFK}$)的绝缘强度相当于相同压力下 SF_6 绝缘强度的49%,且该混合气体的液化温度接近0℃。综合来说上述几种混合气体的液化温度大约在-5~5℃之间,在没有额外配置加热装置的情况下,相关GIS只能用于特定工况,很难满足GIS户外通用环境温度要求。总的来说,虽然GWP值极低,但液化温度点过高是氟代酮类混合气体非常大的劣势。

1.3 氟化腈类气体及其混合气体的绝缘性能

含氟化腈类尤其是 $\text{C}_4\text{-PFN}$ 与 CO_2 的混合气体也是重要研究对象。Kieffell等^[6]指出 CO_2 中混入不同比例的 $\text{C}_4\text{-PFN}$,其绝缘强度能够达到80%~100%的 SF_6 的绝缘强度,比如:混入5.6% $\text{C}_4\text{-PFN}$ 后的 CO_2 气体在0.67 MPa的绝缘强度约为 SF_6 在0.55 MPa下绝缘强度的87%;而当混入4.6% $\text{C}_4\text{-PFN}$ 后, CO_2 气体在0.77 MPa的绝缘强度约为 SF_6 在0.55 MPa下绝缘强度的92%。但上述两种混合气体在上述对应气压下,当环境温度-25℃时便产生了气体液化现象,对于相关GIS在低温气候环境(比如最低温度 $\leq -30^\circ\text{C}$ 的地区)和严寒气候环境(最低温度 $\leq -50^\circ\text{C}$ 的地区)的应用会有比较大的局限性。此外纯 $\text{C}_4\text{-PFN}$ 气体的GWP为2 210;即便与 CO_2 混合使用,相关混合气体的GWP也仍然保持在327~462的相对高值^[12]。

1.4 基于洁净空气的绝缘设计标准

国外某公司展开了非常全面的调查去评估洁净空气在GIS里的绝缘能力。通过在小尺寸样品和真实尺寸大小的GIS样机上进行的各种试验来评估在洁净空气中造成绝缘击穿的各种影响因素,诸如气压、气体水分、绝缘件/导体/壳体等部件的表面质量、电场设计强度、工频和雷电冲击电压类型等因素。

此外,还调查了各种典型缺陷(例如:金属微粒等)和不同充气压力对GIS的绝缘击穿性能和局部放电特性的影响。

经过大量的试验和统计分析,建立了一套安全可靠的、用于确定无 SF_6 的GIS产品尺寸的参数标准。在不同的表面质量下,洁净空气中电气击穿场强和气压之间的关系见图1。

基于国内外现有的研究和应用成果,到目前为

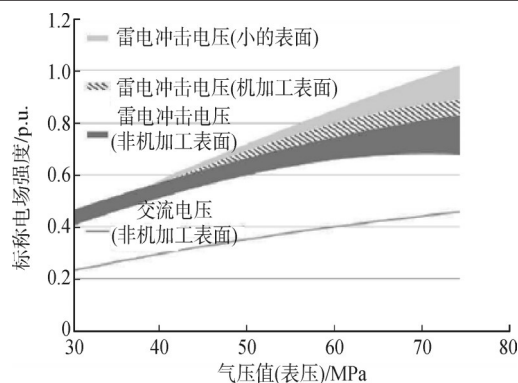


图1 不同表面质量下的电气击穿场强和气压之间的关系

Fig. 1 Relationship between electric breakdown field strength and gas pressure for different surfaces in clean air

止还没有任何一种气体能够完全替代 SF_6 气体拥有其所有的绝缘特性^[9]。对于不使用 SF_6 的全新环境友好型GIS来说,有必要在产品的设计(比如增加气压)或产品技术条件(比如环境温度)上做出一定的改进和让步。因此对于采用洁净空气作为绝缘介质的GIS来说,在现有 SF_6 产品的基础上利用上面试验获得的产品尺寸参数标准通过稍微提高气室气压、精确的电场控制和稍许放大壳体尺寸就能够满足设备的绝缘性能要求。

2 替代气体的开合性能研究

除了绝缘能力,高压开关的电流开合能力也是极为重要的。而理论上替代气体的灭弧性能都与纯 SF_6 气体不同,所以还有必要在GIS所有具有开合功能的模块(比如断路器、隔离开关和快速接地开关)上进行替代气体工况下的开合电弧能力研究。因此将文献中对于相关替代气体的开合电弧性能进行一个简短的总结,同时给出了在真实的GIS模块上分别以洁净空气、 SF_6 和其它几种气体为灭弧介质进行的若干试验的结果,以及它们之间的试验结果比较。

2.1 隔离开关开合性能

对于隔离开关来说,替代气体可能会影响到母线转移电流能力和/或母线充电电流能力,因此需要通过相关试验来进行验证。依据IEC 62271-102—2013和GB 1985—2014的参数要求(试验电流1 600 A,试验电压20 V),在真实的252 kV GIS模块上对几种不同气体(被试验气体信息见表3)进行了母线转移电流的试验。同时在试验前和试验后分别进行了试品的状态检测(即交流耐压460 kV和雷电冲击耐压1 050 kV试验)。试品结构参见图2。

表3 被试验气体(露点温度 $\leq -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Table 3 List of tested gases (dew point $\leq -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

气体 编号	运载气体	含氟化合物	
		化学成分	体积百分数/%
A	CO ₂ (90%)+ O ₂ (10%)	—	—
B	CO ₂ (90%)+ O ₂ (10%)	C ₅ -PFK	1.1
C	CO ₂	C ₅ -PFK	1.1
D	CO ₂	C ₄ -PFN	5.0
E	洁净空气 N ₂ (79.5%)+ O ₂ (20.5%)	—	—
F	—	SF ₆	100



图2 245 kV GIS母线转移电流试品

Fig. 2 245 kV GIS test setup for BTC tests

所有试验气体均通过了试验前的状态检测和母线转移电流试验,并且各自的母线转移电流的燃弧时间平均值相差不大,具有可比性。燃弧时间分布在0.5~12.1 ms。随着试验操作次数的增加,燃弧时间均没有明显的变长。D、E和F这三种气体的燃弧时间分布和变化见图3。

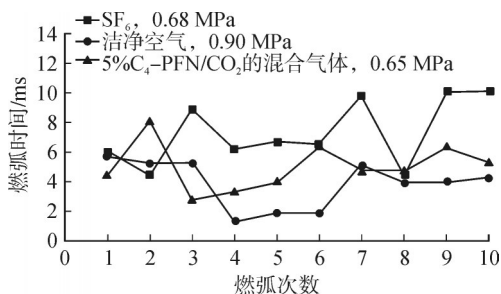


图3 3种气体在1 600 A/20 V母线转移电流试验时燃弧时间分布

Fig. 3 Development of arcing times in BTC test (1 600 A/20 V)

在试验后的状态检测发现只有气体E(洁净空气)和F(纯SF₆)通过了相应的耐压试验。值得关注的是,气体D在交流耐压和雷电冲击耐压试验时均发生了绝缘击穿,绝缘水平分别下降了约10%和20%。试品进一步解体后,在绝缘盆上发现有固体

炭灰状分解物,见图4。这些分解物极可能造成绝缘盆绝缘劣化,并在较低的电压下诱发了沿面放电。类似的炭灰分解物并没有在气体E和F的试品中发现。

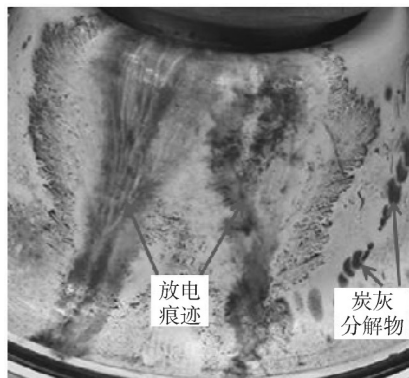


图4 绝缘件沿面放电痕迹和炭灰状分解物

Fig. 4 Tracks of surface flashover and soot spots on an insulator after BTC test

为了监测各试验气体的状态变化,在试验前后分别对气体进行采样用于气体混合百分比检测。对于气体D来说,其试验前后各5份样品的检测结果显示,C₄-PFN的平均百分比含量从试验前的4.7%下降到试验后的3.6%。这个结果结合固体炭灰状分解物的出现也佐证了部分C₄-PFN在电弧能量的作用下产生了不可逆的化学分解^[20]。

该试验测得的单次母线转移电流分闸操作产生的电弧能量不超过1 000 J,整个试验中C₄-PFN的分解率大约是3.1 mol/MJ。而 Mantilla^[14]和 Radisavljevic^[20]的研究指出,在几十千安和上百千伏的断路器大容量开断过程中,测量到的C₄-PFN和C₅-PFK分解率大约分别是0.24 mol/MJ和0.14 mol/MJ;同时还指出,通过一些设计优化和/或混合气体成分配比改进(比如C₅-PFK混合气中添加适当的氧气O₂)能够一定程度上抑制分解物的形成,从而使得气体分解问题不会影响到高压设备在设计寿命周期内的使用。

综合来说,气体分解率的大小取决于很多因素,如:开关的设计结构、开断能量、使用材料、气体湿度和气体成分配比等。所以使用替代气体的高压开关设备在不同工况下开断/关合操作对气体的损耗,和进而产生的对设备整体绝缘能力的影响还需要进一步的调查和研究;对于开断产生的分解物及其毒性的危险度也还需要更深入全面的调查和试验验证^[9]。

对于额定电压 $\leq 252\text{ kV}$ 的隔离开关,通常不需要进行母线充电电流试验。但出于研究的目的,在与母线转移电流试品相同结构的模块还进行了洁

净空气工况下的母线充电电流试验。试验依据 IEC 62271-102—2013 附录 F 试验要求进行,并在试验前后增加了试品的状态检测。所有试验均顺利完成,没有发生任何燃弧故障或绝缘击穿。

2.2 快速接地开关开合性能

在高压系统中,快速接地开关主要功能是执行并满足短路电流关合、电磁感应电流开合和静电感应电流开合等操作要求。为了验证不同气体对这些功能的潜在影响,采用真实的 252 kV GIS 模块并按照 IEC 62271-102—2013 的相关试验条目要求,对表 3 中的气体分别进行了上述 3 个操作试验。其中电磁感应电流开合试验具体试验步骤如下:①2 000 V/80 A 的 10 次操作(依据 IEC 62271-102—2013 附录 C 中 B 类试验要求进行);②如果步骤 1 失败,则进行 500 V/50 A 的 10 次操作(依据 A 类试验要求进行)。

主要试验成果如下(D、E 和 F 这 3 种气体的燃弧时间分布和变化见图 5):

1) 洁净空气的灭弧性能能够满足短路电流关合和静电感应电流开合的要求,顺利通过试验。

2) 除气体 F(SF₆) 通过 B 类试验要求外,所有其他气体都没能通过电磁感应电流开合 B 类试验要求。气体 D 和 E 通过电磁感应电流开合 A 类试验要求,但燃弧时间离散性很大(0.8~46 ms 不等,如图 5 所示)。对于表 3 中的被试验气体,如果要满足标准中电磁感应电流 A 类乃至 B 类要求,需要对接地开关尤其是触头系统进行必要的设计改进。

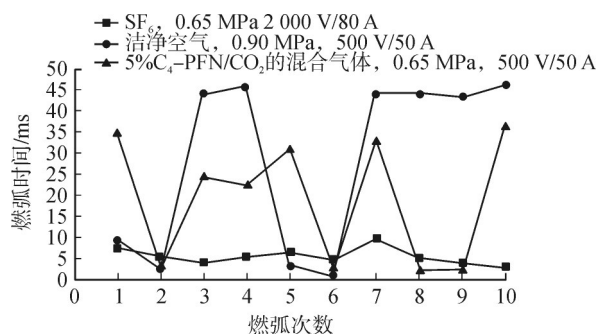


图 5 3 种气体在电磁感应电流开合试验时燃弧时间分布

Fig. 5 Development of arcing times during induced current switching test

2.3 断路器开合性能

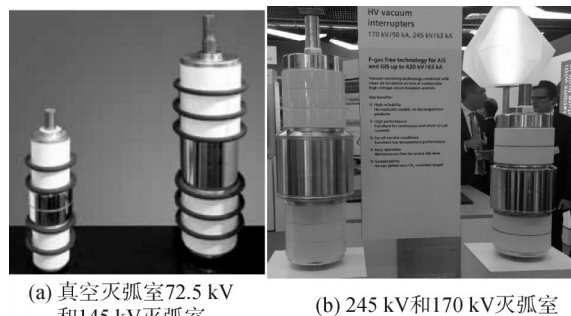
总的来说,对于 SF₆ 自能式断路器目前有两种可能的替代方案:①真空断路器灭弧配无 SF₆ 气体作绝缘介质;②自能式断路器配替代气体作灭弧和绝缘介质。在 1990 年后期,人们开始对替代气体和它们与 SF₆ 混合气体的灭弧性能进行研究^[21]。随后人们又关注和研究 CO₂ 作为灭弧介质的可能性,以

纯 CO₂ 为介质的高压气体断路器样机,目前电压等级已达到 145 kV,开断容量为 31.5 kA^[22-24]。此外对于 CF₃I 的电流开断能力也展开了很多调查。近几年采用自能式断路器配氟代酮^[14]或氟化腈类^[13]气体来灭弧的 GIS 也在若干地区实现了试运行;国内相关研究在中压领域也有所突破,其中采用 C₆F₁₂O 为灭弧介质的 12 kV 环网柜也于 2018 年 7 月完成了相关型式试验^[25]。

尽管已经取得了上述进展和成果,但直到今天人们对于替代气体配合自能式断路器使用所带来的优缺点还没有一个清晰完整的认识,还有很多具体问题需要去澄清和解决,例如:①长期运行后的开断能力;②较高的能量和触头速度要求,对长期运行的机械性能影响;③开合操作对气体的损耗,以及对绝缘能力的影响;④环境、健康和安全方面的考量(所产生分解物的毒性等)。

真空灭弧技术作为一种成熟的被认可的技术,如下几个优异特性使得其过去几十年在中压领域得到非常广泛的应用:①高机械寿命和免维护性能(灭弧室可耐受超过 30 000 次机械操作,不存在真空渗漏);②额定电流和额定短路电流下,高开断次数(如:145 kV 额定短路电流开断≥30 次);③低温工况下不会发生气体液化现象。

近几年的研究和运行经验表明,通过合理的设计改进和生产工艺优化,真空灭弧技术的应用已经从中电压领域升级进入高电压领域(≥66 kV)。国内某两电气公司都推出了各自的 126 kV 单断口真空灭弧室。国外某公司从 2010 年开始陆续推出了 72.5 kV 和 145 kV 真空灭弧室,见图 6(a),并在 2018 年 8 月的 CIGRE 巴黎大会上展示了其 170 kV/50 kA 和 245 kV/63 kA 单断口真空灭弧室产品,见图 6(b)。



(a) 真空灭弧室 72.5 kV 和 145 kV 灭弧室

(b) 245 kV 和 170 kV 灭弧室

图 6 国外某公司真空灭弧室

Fig. 6 The foreign company VIU

以国外某公司 145 kV 真空灭弧室为例,采用基于准中性电弧等离子体的双温磁流体动力学(MHD)瞬态三维模型来模拟真空电弧^[26],从而对纵向磁场(AMF)触头的几何结构进行优化,使其在开断时能

够在更长的触头间隙(开距)间产生更强的纵向磁场和更优的磁场空间分布,见图7。从而满足高电压大开距的要求。



图7 40 kA 电流开断与等离子体流和磁收缩力模拟图
Fig. 7 Verification of AMF arc model of 40 kA arc and simulated plasma flow and magnetic constriction forces

此外先进的生产工艺控制,比如电化学清洁处理、高洁净度的装配车间、洁净的自动化封装流程以及严苛的成品试验(含高压老练试验^[27]、雷电冲击试验、X-ray 检测和真空度检测等)等确保灭弧室的高绝缘性能、高洁净度和高真空度,同时也使得 AMF 触头表面宏观和微观结构都得到最大程度的优化;再配合对断路器分/合闸速度的合理控制,最终使得该灭弧室具有更优的短路电流开断能力(≥ 30 次额定短路电流开断)、更好的截流过电压抑制能力和更强的容性电流开合能力。

依照 IEC 62271-100-2017 的试验要求,采用了该 145 kV 真空灭弧室的 GIS 顺利通过了全套的断路器型式试验,与常规 SF₆ 灭弧室相比,其试验结果表明:

- 1)对故障电流和负载电流进行标准的试验方式开合时,两者有相似的优异表现。理论上来说真空灭弧室开合需要的操作功更低。
- 2)真空断路器的弧电压更低,燃弧时间更短。从而触头系统烧蚀更轻微,开合次数更高。
- 3)对于感性电流/感性负载(如电抗器)关合,真空断路器会产生较高的截流过电压,但其大小和 SF₆ 断路器在一个数量级上。此外两者都有一个无重燃时间窗口,必要时都可以采用选相合闸装置。
- 4)对于容性电流开合性能,灭弧室的设计和动作特性都是至关重要的,因此优化的设计和合理的动作特性都有助于开合能力的提升;而真空断路器在生产工艺方面的控制也非常关键的。

总之,基于日益成熟的真空灭弧室技术,不少电力设备厂家或科研单位相继研制出采用真空灭弧室的 72.5、126 和 145 kV 柱式断路器,见图 8^[28-30]。以及 72.5 kV^[31-32]和 145 kV 的 GIS 产品,见图 9。其主要技术参数都能满足相关产品标准(IEC/GB)的要求,并且部分设备已经在电网中安装运行^[33]。总之,高电压大容量真空灭弧室的出现,以及其工业化的批量生产工艺为研制和生产电压等级更高和质量更稳定可靠的真空断路器和 GIS 产品提供了必要的技术保证。



图8 运行中的户外 145 kV 柱式真空断路器
Fig. 8 145 kV outdoor LT with VIU

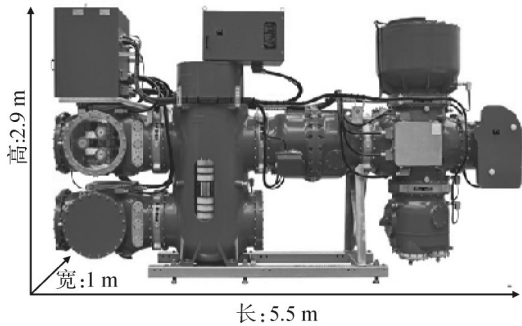


图9 145 kV 采用真空灭弧室的 GIS
Fig. 9 145 kV GIS with VIU

以国外某公司 145 kV 采用真空灭弧室的 GIS 为例,其完全按照最新版的 IEC 62271-1-2017、IEC 62271-100-2011、IEC 62271-102-2018 和 IEC 62271-203-2011 的标准要求进行设计和全套型式试验,主要技术参数见表 4。鉴于对应国标基本和 IEC 标准等效,所以该 GIS 参数也能满足国内市场需求。

表 4 国外某公司真空灭弧室 145 kV GIS 主要参数
Table 4 Key parameters of one foreign company 145 kV GIS with VIU

名称	数值	名称	数值
额定电压/kV	145	额定电流/A	3 150
额定工频耐受电压/kV	275	额定短路电流(kA)/耐受时间(s)	40/3
额定雷电冲击耐受电压/kV	650	额定短时耐受电流/kA	40
额定频率/Hz	50/60	额定峰值耐受电流/kA	108
额定气压(绝对压力)/MPa	0.77	短路电流开断次数/次	≥ 30
气室年泄漏率(非灭弧室)/%	< 0.1	真空灭弧室(断口数量)	1
断路器机械寿命/次	$\geq 10\,000$	适用温度范围/℃	-55~+55
绝缘介质	洁净空气 (79.5%N ₂ + 20.5%O ₂)	标准间隔尺寸(长/高/宽)/mm	5 500/ 2 900/ 1 000

3 环境、安全与运维

替代气体不应影响 GIS 的技术性能和安全性。在表 1 中除了气体的物理特性之外,还列出这些气体与环境和安全相关的属性,例如 GWP 值、毒性、燃弧过程中的化学稳定性以及燃弧后的化学分解物等。其中 SF_6 的高 $\text{GWP}=23\,900$ 和燃弧产生诸如氢氟酸和硫化物等有毒化学分解物对环境和人员安全造成很大的负面影响;由于具有微量的毒性(LC50)和较小危险暴露浓度(TWA)值,以及燃弧过程中不可逆的化学反应产生的诸如氢氟酸、碳酰氟、乙二腈等有毒化学分解物,在处理 $\text{C}_4\text{-PFN}$ 和 $\text{C}_5\text{-PFK}$ 时也同样需要采取措施对操作人员和环境实施必要的安全防护。

洁净空气方案是一种不含氟的气体绝缘方案,其 GWP 值为 0。更重要的是,由于它的沸点很低,洁净空气可以用于低至 -55°C 的环境工况。此外洁净空气不像其它气体,不存在泄漏影响环境的危险。与 SF_6 一样,洁净空气是一种无毒无害的安全介质。与含氟类气体方案相比,洁净空气的操作处理人员不需要经过专门培训。洁净空气经过过滤后可以直接排放到大气中,不会对环境造成损害,而含氟类气体则要过滤抽真空,然后存储在专用气瓶中,后续处理成本很高。因此洁净空气在保护身体健康和环境方面具有明显的优势。

还需要指出的是,含氟类混合气体在现场进行气体工作时(如安装后注气、漏气后补气或检修后补气等)通常需要在现场对气体进行混合并测定最终的混合比来保证设备的绝缘性能和灭弧性能,整个过程繁琐费时。运行后如果设备万一发生漏气而补气,需要先测定漏气后的气室混合比,再依此进行混合气体的调配来保证最终的混合比满足产品技术要求。这些都给后期的运维带来困难。而洁净空气可以如同 SF_6 一样,预制在专用气瓶中,通过现有的气体处理装置就可以对气室进行加气和补气工作。

近年来,国内电网公司对运行中的 GIS 设备里 SF_6 气体状态尤其是气体组分的要求日益严苛。在断路器若干次正常短路电流开断(开断电流小于额定短路电流)后,如果检测出气体组分中 HF 、 SO_2 和其他硫化物等含量超出企业内部的设备运行标准要求,通常会要求设备厂商协助对气室气体甚至是灭弧室进行更换,这无疑增加了后期运维的难度和复杂度。而采用真空灭弧室的 GIS 设备,在进行正

常短路开断时,整个开断过程在封装的真空灭弧室中完成,自身不会产生任何化学分解物,因而也不会对整个断路器气室造成污染引起绝缘劣化。

此外,对于真空断路器来说,还应该考虑设备在试验、调试和运行阶段潜在的 X 射线发射问题。国外某公司在中压领域有近 550 万只真空灭弧单元的生产和使用经验,统计和试验数据表明,即便在更高的电压下,通过合理的结构设计和生产流程优化与控制,X 射线发射可以被很好的抑制,满足相关标准:IEC 62271-1—2017, GB/T 11022—2011 等的要求。

4 试验和现场经验

为了确保真空灭弧室配洁净空气绝缘技术在高压领域的安全可靠运用,该公司在试验室进行了大量的性能试验,例如:容性开合、感性开合和绝缘试验等^[34]。从 2010 年开始,在法国、丹麦、卢森堡和奥地利等国家超过 6 台该公司 72.5 kV 真空柱式断路器安装在电网中运行,到目前为止所有断路器总操作次数超过 6 500 次,对不同负载电流和短路电流进行过开断,运行状况良好;而在 2017 年底,该公司首台 145 kV 柱式真空断路器开始在德国 Netze BW GmbH 电网公司挂网运行(图 8)。此外 4 台 72.5 kV 采用真空灭弧室的 GIS,也于 2016 年首次在丹麦海上风电一个 28 MW 项目中投入使用,见图 10。

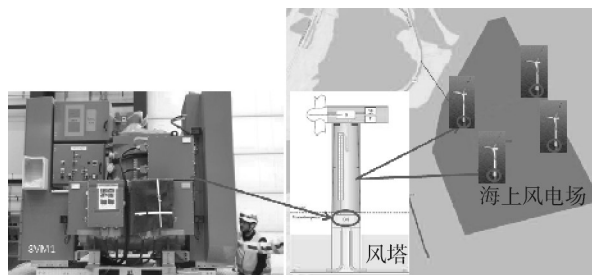


图 10 用于风电的采用真空灭弧室的 72.5 kV GIS

Fig. 10 72.5 kV GIS with VIU for wind turbine

另外在 20 世纪 70 年代,该公司在荷兰电网投入使用过 88 台 170 kV GIS,其以干燥压缩空气作为整个开关设备的绝缘和灭弧介质。这些设备运行至今,没有发生过绝缘和灭弧类故障。这也佐证了洁净空气作为绝缘介质甚至灭弧介质是安全可靠的。

5 结论

国外某公司开发应用了真空灭弧室配洁净空气的 GIS 产品技术方案。通过综合性的研究和试验

确定了安全可靠的洁净空气绝缘 GIS 的设计标准。同时还通过多个试验验证了采用洁净空气作灭弧介质的 GIS 隔离开关和接地开关的灭弧功能和特性。有力的试验室试验结果和现场安装运行经验(72.5、145 kV 断路器和 72.5 kV GIS) 佐证了该产品技术的可靠性和实用性。相对于现有的基于 SF₆ 技术的 GIS, 采用真空灭弧室配洁净空气的 GIS 具有很多优点:

1) 对环境和操作人员友好, 开断后不产生有毒副产品, 且 GWP=0。

2) 在电场长期作用下具有优异的稳定性。

3) 具有更优异的开断能力。

4) 更适应低温工况, 无任何加热装置的情况下工作温度低至 -55 ℃。

5) 真空灭弧室免维护, 产品安装、运维和后续报废处理成本更低。

综上所述, 采用真空灭弧室配洁净空气的 GIS 产品满足新一代高压变电站的需求, 是理想的用于替代 SF₆ GIS 的环境友好型产品。245 kV/63 kA 单断口真空灭弧室样机的成功开发也为更高电压等级的 GIS 研制奠定了坚实的技术基础, 应用前景可观。

参考文献:

- [1] 中国国务院应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告[R]. 北京: 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心出版, 2016.
Department of Climate Change, State Council of China. The People's Republic of China first biennial update report on climate change[R]. Beijing: National Center of Strategic Research and International Cooperation on Climate Change, 2016.
- [2] WOOTTON R E. Gases superior to SF₆ for insulation and interruption, EPRI-2620 Research Project 847-1 [Z].[S.l.]: Westinghouse Electric and E.I. du Pont de Nemours & Co., 1982.
- [3] NIEMEYER L. A systematic search for insulation gases and their environmental evaluation[C]//8th Springer Conference on Gaseous Dielectrics. S, US: Springer, 1998: 459-464.
- [4] CHRISTOPHOROU L O, LTHOFF G J, GREEN D S. Gases for electrical insulation and arc interruption: Possible present and future alternatives to pure SF₆[R]. Gaithersburg, US: NIST, 1997.
- [5] 邓云坤, 马仪, 陈先富, 等. CF₃I-N₂混合气体在稍不均匀和极不均匀电场中的工频击穿特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 754-764.
DENG Yunkun, MA Yi, CHEN Xianfu, et al. AC breakdown characteristics of CF₃I-N₂ gas mixtures in condition of quasi-homogeneous and extremely non-uniform electric field[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 754-764.
- [6] KIEFFEL Y, GIRODET A, BIQUEZ F, et al. CF₃I gas and its mixtures: Potential for electrical insulation[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2014: 24-29.
- [7] DIGGELMANN T. Okoeffiziente GIS: Innovation in der GIS technologie [R]. Zurich, Switzerland: ABB Press, 2015.
- [8] HYRENBACH M, HINTZEN T, MULLER P, et al. Alternative gas insulation in medium-voltage switchgear[C]//23th International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France: IEEE, 2015: 587-591.
- [9] SEEGER M, SMEETS R, YAN J, et al. Recent development and interrupting performance with SF₆ alternative gases[R].[S.l.]: Electra, 2017.
- [10] 3M. 3M novoc 4710 dielectric fluid[Z]. Saint Paul: 3M, 2015.
- [11] 3M. 3M novoc 5110 dielectric fluid[Z]. Saint Paul: 3M, 2015.
- [12] OHLINK P, MEYER F, KIEFFEL Y, et al. Characteristics of a fluoronitrile/CO₂ mixture—An alternative to SF₆[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2016: 204.
- [13] GAUTSCHI D, FICHEUX A, WALTER M, et al. Application of a fluoronitrile gas in GIS and GIL as an environmental friendly alternative to SF₆[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2016: 106.
- [14] MANTILLA J, CLAESSENS M, KRIEGEL M. Environmentally friendly perfluoroketones-based mixture as switching medium in high voltage circuit breakers[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2016: 113.
- [15] MANTILLA J, GARIBOLDI N, GROB S, et al. Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP[C]//Electrical Insulation Conference. Philadelphia, USA: [s.n.], 2014: 1-5.
- [16] PREVE C, MALADEN R, PICCOZ D, et al. Validation method and comparison of SF₆ alternative gases[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2016: 205.
- [17] CIGRE WG D1.51. Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated system[R]. [S.l.]: CIGRE, 2018.
- [18] SIMKA P, RANJAN N. Dielectric strength of C₅ perfluoroketone[C]//19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen Czech: ISH, 2015: 23-28.
- [19] 李兴文, 邓云坤, 姜旭, 等. 环保气体 C₄F₇N 和 C₅F₁₀O 与 CO₂ 混合气体的绝缘性能及其应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 708-714.
LI Xingwen, DENG Yunkun, JIANG Xu, et al. Insulation performance and application of environment-friendly gases mixtures of C₄F₇N and C₅F₁₀O with CO₂[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 708-714.
- [20] RADISAVLJEVIC B, STOLLER P C. Switching performance of alternative gaseous mixtures in high-voltage circuit breakers[C]//20th International Symposium on High Voltage Engineering. Buenos Aires, Argentina: ISH, 2017: 1-6.

- [21] KNOBLOCH H. The comparison of arc-extinguishing capability of sulfur hexafluoride (SF_6) with alternative gases in high-voltage circuit-breakers[C]//8th Conference on Gaseous Dielectrics. Springer, US: Springer, 1998:565-571.
- [22] MAJINA A, UCHILLI T, MORI T, et al. Arc temperature around current zero in a large current interruption using pure CO_2 gas, CO_2/O_2 and CO_2/N_2 gas mixtures[C]//19th International Conference on Gas Discharges and Their Application. Beijing, China: GD, 2012:289-295.
- [23] UCHILL T, MAJINA A, KOSHIZUKA T, et al. Thermal interruption capabilities of CO_2 gas and CO_2 -based gas mixtures [C]//18th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Greifswald, Germany:GD, 2010:78-81.
- [24] STOLLER P C, SEEGER M, IORDANIDIS A, et al. CO_2 as an arc interruption medium in gas circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(8): 2359-2369.
- [25] 张晓星. 研制环保气体绝缘金属封闭开关设备 [EB/OL]. 2018-08-08. http://www.ces-plasma.org.cn/show_news.
ZHANG Xiaoxing. Developed eco-friendly gas insulated switch-gear[EB/OL]. 2018-08-08. http://www.ces-plasma.org.cn/show_news.
- [26] WENZEL N, LAWALL A, SCHÜMANN U, et al. Combined experimental and theoretical study of constriction threshold of large-gap AMF vacuum arcs[C]//XXVI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Mumbai, India:ISDEIV, 2014: 193-196.
- [27] PSOTTA T, HINRICHSSEN V, KYNAST E, et al. Investigation on the conditioning of high-voltage vacuum Interrupters arcs[C]// XXVI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Mumbai, India: ISDEIV, 2014:1-4.
- [28] BRUCHER J, GIERES, WATIER C, et al. 3AV1FG-72.5 kV prototype vacuum circuit breaker (case study with pilot customers)[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2012:1-6.
- [29] PENG L, FENG P, SONG'AN J, et al. Research and development of 126 kV single-break vacuum circuit breaker[C]//1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Xi'an, China:EPE, 2011:110-114.
- [30] Siemens AG, Vacuum switching technology up to 145 kilovolts also benefits CO_2 impact[EB/OL]. 2016-08-22. <https://newscenter.siemens.com/siemens-news>.
- [31] ROKUNOHE T, YAGIHASHI Y, ENDO F, et al. Development of 72 kV high-pressure air-insulated GIS with vacuum circuit breaker[J]. IEEJ Transactions on Power and Energy, 2005, 125(12):1270-1277.
- [32] STEUER M. A GIS innovation at the Hannover Messe [EB/OL]. 2015-04-13. <https://newscenter.siemens.com/siemens-news>.
- [33] Siemens AG. SF_6 -free high-voltage switchgear handed over to customer[EB/OL]. 2018-07-07. <https://newscenter.siemens.com/siemens-news>.
- [34] RICHTER F. Comparison of switching behavior of 145 kV vacuum and SF_6 circuit-breakers in the case of switching off shunt reactor currents[C]//CIGRE. Auckland, US: CIGRE, 2013:432-437.

李德军(1976—),男,硕士研究生,高级工程师,长期从事高压开关产品的设计、生产和技术管理工作。

(上接第20页)

- 39(6):1469-1475.
- [23] 陈刚, 韦晓星, 苑舜, 等. 组合室温硫化硅橡胶对绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):298-303.
CHEN Gang, WEI Xiaoxing YUAN Shun, et al. Effect of combination room temperature vulcanized silicone rubber on electric field distribution of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):298-303.
- [24] QIN Y, XU Z, JIA Z, et al. An application of RTV with different conductivities in anti-icing[C]//Proceedings of 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China: IEEE, 2009: 41-44.
- [25] QIN Y, WANG Z, XU Z, et al. Reducing ice coating on insulators by combining RTV with different volume resistivity[C]//Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach, VA:IEEE, 2009: 446-449.

韦晓星(1985—),男,博士,工程师,主要从事换流站设备高压电试验技术、复合绝缘子老化以及外绝缘污闪防治等研究工作。