

[开关设备]

高压开关设备用环保气体的研究现状与应用前景

文/西安西电开关电气有限公司 贺小瑞 何创伟 张震锋 郭伟 常治国 阮艳丽

在高压开关设备中，环保替代气体与 SF_6 相比展示出不同的优势和劣势，基于目前研究现状，从理化性质、绝缘性能、温升性能以及开合特性等方面进行详细的归纳总结，分析不同替代气体应用在高压开关设备上的适用范围、局限性以及发展趋势和应用前景，指出了进一步的研究方向。

2018年夏天北半球大部地区持续高强度的极端高温天气引起了国际社会对全球气候变暖问题的广泛关注。2015年习近平主席签署了《巴黎气候协定》，根据协定要求全球将尽快实现温室气体排放达标，在此背景下，控制并减少温室气体排放，减缓全球变暖趋势已刻不容缓；作为《京都议定书》中定性的六大温室效应气体之一，减少并替代 SF_6 气体在高压设备中的使用迫在眉睫；基于可持续发展的考虑，国内外开关设备制造商、化学公司还有高校，都在寻找可替代 SF_6 的环保绿色气体，主要集中在三类气体上：常规单质气体、 SF_6 混合气体、完全替代气体如 CF_3I 、全氟碳化物（PFC）等气体及其混合气体，虽然取得了一定的研究成果和具体应用，但一直没有找到各种特性能与 SF_6 等效替代的介质。最近几年，国内外学者把研究焦点集中在一些具有很高绝缘性能、低温室效应的新型环保介质上，3M公司、ABB和Alstom等公司合作经过大量的研究，氟代酮类和氟代腈系列气体被研发出来，这些新型环保气体及其混合气体在替代 SF_6 应用于高压设备上表现出较大的潜力。本文在国内外制造商以及学者研究的基础上，对三种类型替代气体的绝缘性能、温升性能、开合性能以及在72.5 kV以上高压设备中的应用等情况进行归纳总结，指出不同替

代气体的局限性和适用范围，结合当前的研究现状和存在的问题，分析各种替代气体在高压开关设备中的应用前景。

常规气体

常规气体主要集中在 N_2 、 CO_2 和干燥空气上，其理化性质稳定，生产成本低，无毒，液化温度和温室效应也远低于 SF_6 ，但由于其绝缘和灭弧性能较低，在72.5 kV以上的高压开关设备中，受制于其灭弧性能和高压真空灭弧室大间隙绝缘饱和特性等问题， SF_6 替代技术无法实现经济性、可靠性、安全性并存。常规气体与 SF_6 气体的理化特性如表1所示。

表1 常规气体和 SF_6 理化特性对比（20℃，0.1 MPa）

气体	SF_6	CO_2	N_2	干燥空气
相对分子质量	146.06	44.01	28.01	28.8
气态密度/（ kg/m^3 ）	6.07	1.8	1.1	1.19
温室效应潜能值/GWP	23 500	1	0	0
沸点/（℃）	-64	-78	-198	-194
化学稳定性	稳定	稳定	稳定	稳定
临界场强/（ kV/cm ）	88.4	25.0	30.0	33.0
热导率/（ $\text{W}/(\text{mK})$ ）	0.13	0.016	0.0238	0.0257
定压比热/（ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ）	0.657	0.85	1.038	1.013

国内外制造商主要是将常规气体应用于72.5~145 kV等级产品，大部分作为绝缘介质，也有少量将 CO_2 气体作为开断气体的应用实例，具体如表2所示。

表2 常规气体在72.5 kV以上高压开关设备中的应用

公司	型号和类型	额定参数	绝缘介质	充气压力/MPa	灭弧介质
沈阳华利集团	HG6-72.5/2500-31.5 GIS	72.5 kV/2 500 A/31.5 kA	干燥空气	0.7/0.13	真空灭弧室
平高集团	ZW64-126/T2500-40断路器	126 kV/2 500 A/40 kA	N ₂	—	真空灭弧室
日本东芝公司	瓷柱式断路器	72 kV/31.5 kA 145 kV/31.5 kA	CO ₂	0.7 (闭锁)	CO ₂
日本日立公司	GIS	72 kV/1 200 A/25 kA	干燥空气	0.5	真空灭弧室
日本AE帕瓦株式会社	GIS	72 kV/1 200 A/25 kA	干燥空气	0.45 (VCB), 0.5 (BUS&DS)	真空灭弧室
日本三菱公司	GX-70 V型C-GIS	72.5 kV/1 200 A/25 kA	干燥空气+界面绝缘	0.5	真空灭弧室
	HG-VA型C-GIS	72.5 kV/1 200 A/31.5 kA	干燥空气+覆层+隔板	0.15	
	8VM1型GIS	72.5 kV/1 250 A/25 kA	干燥空气	0.56	
	8VN1型GIS	145 kV/3 150 A/40 kA		0.77	
Siemens公司	3AV1型瓷柱式断路器	72.5 kV/2 500 A/31.5 kA	干燥空气	—	真空灭弧室
		145 kV/3 150 A/40 kA			
ABB公司	LTA瓷柱式断路器	72.5 kV/2 750 A/31.5 kA	CO ₂	—	CO ₂
		145 kV/3 150 A/31.5 kA			

SF₆混合气体

SF₆混合气体的着眼点是希望发挥SF₆的特点,混合低液化点气体,形成介电强度较高、液化温度和GWP较低的混合气体,在SF₆中加入N₂、CO₂、CF₄或空气等普通气体构成二元混合气体显示出多方面的优越性,其可行性已被国内外许多试验证明。

1. 混合气体的绝缘特性

SF₆混合气体研究最多的是SF₆/N₂,如果恰当的选择混合比例,在低温下可获得和SF₆相当的绝缘强度,且对电极表面粗糙度和导电微粒的敏感度比SF₆低,说明SF₆/N₂能提高电力设备的可靠性,而耐电强度与SF₆相比下降甚少,50%SF₆/50%N₂绝缘强度比SF₆下降11%左右。华北电力大学研究发现SF₆/N₂比SF₆/CO₂击穿电压增长快,而且SF₆/N₂击穿电压随SF₆含量增加比SF₆/CO₂较容易达到饱和趋势;相比CO₂,SF₆/N₂在工程中可进一步减少SF₆气体的使用量。新东北电气公司研究指出SF₆/N₂绝缘性能随SF₆体积分数的增加而缓慢增加,20%SF₆/80%N₂击穿强度为相同气压纯SF₆的70%,该混合比的混合气体总压力达到纯SF₆的1.4倍时才可达到纯SF₆的击穿强度。中国南方电网公司研究表明SF₆/CF₄较纯SF₆具有更优异的低温

特性,-40℃下50%SF₆/50%CF₄的绝缘强度可以达到纯SF₆的1.4倍。西安交通大学研究热态下绝缘特性发现当温度高于1 800 K时,50%SF₆/50%CF₄折合临界击穿场强高于纯SF₆,当温度高于2 600 K时,由于CF₄分解物的影响,50%SF₆/50%CF₄折合临界击穿场强随温度升高而增大。由于CF₄具有良好的灭弧性能和较低的液化温度,SF₆/CF₄混合气体可有效解决纯SF₆在高寒地区的液化问题,已被应用于寒冷地区运行的断路器中。

2. 混合气体的温升特性

由于SF₆比常规气体具有更好的导热性能,当纯SF₆被相同绝缘强度的混合气体替代时,对高压开关设备温升的影响也是需要关注的问题。

3. 混合气体的开合特性

SF₆混合气体的开合性能研究主要集中在SF₆/N₂及SF₆/CO₂上。

4. 混合气体在72.5 kV及以上高压开关设备中的应用

SF₆混合气体应用情况如表3所示,尽管SF₆/N₂、SF₆/CF₄等已被国内外部分高压开关制造商采用,但从环保来讲这种方案仅仅是一个过渡阶段,最终还是要采用更绿色的替代气体完全取代SF₆。

表3 SF₆混合气体在72.5 kV以上高压开关设备中的应用

公司	型号和类型	额定参数	绝缘介质	混合比例
西开电气公司	126-550 kV GIS母线	126 kV/3 150 A/40 kA	SF ₆ /N ₂	30%/70%
		252 kV/4 000 A/50 kA		
		363 kV/4 000 A/63 kA		
		550 kV/5 000 A/63 kA		
新东北电气公司	550 kV GIL	550 kV/4 000 A	SF ₆ /N ₂	20%/80%
Siemens公司	500 kV断路器	500 kV/6 000 A	SF ₆ /N ₂	60%/40%
	550 kV GIL	—	SF ₆ /N ₂	20%/80%
Alstom公司	240 kV GIL	—	SF ₆ /N ₂	20%/80%
ABB公司	550 kV断路器	550 kV/4 000 A/40 kA	SF ₆ /CF ₄	50%/50%

新型环保气体

近几年，国内外学者把主要精力集中在了一些具有很高绝缘性能、低温室效应的新型环保气体上，例如 CF_3I ，但由于其具有3-4ppm的接触导则，属于3类致癌、致突变和生殖毒性物质，而且 CF_3I 在电晕或火花放电下的分解产物 C_3F_6 和 CH_3I 也有毒，本文对 CF_3I 的研究成果不再赘述。3M公司、ABB和Alstom/GE等公司经过大量研究合作研发出氟代酮类（PFK）和氟代腈新型介质，这些介质的混合物在替代 SF_6 应用于高压设备上表现出较大的潜力。氟代酮（ $\text{C}_n\text{F}_{2n}\text{O}$ ）研究较多的有 $\text{C}_4\text{F}_8\text{O}$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 和 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 等。 $\text{C}_4\text{F}_8\text{O}$ 具有很高毒性不能应用于开关设备中。2018年8月武汉大学和山东泰开公司合作研制的XGN-12(V)/T630-20型环保开关柜（内充入 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 混合气体）通过全部型式试验，但 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 液化温度较高（49.2℃），在较低温条件下蒸气压不足浓度太低，所以不适用于高压设备的使用要求。 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ （3M Novec 5110）和 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 氟代腈（3M Novec 4710）在较广的温度范围内均具有相当高的绝缘强度，它们与 SF_6 主要性能比较如表4所示。

ABB公司基于5110研发出两种混合气体（AirPlus气体），通过一系列研究选择5110+ CO_2 + O_2 混合气体用于高压开关设备，选择5110+干燥空气混合用于中压开关设备。Alstom/GE公司基于4710研发出其与 CO_2 的混合气体（g3气体）作为高压开关设备的绝缘和灭弧介质。AirPlus和g3两种混合气体各有优缺点，AirPlus气体GWP很低，但沸点较高不适用于寒冷地区，g3气体沸点相对较低，但GWP较高。

表4 新型环保气体与 SF_6 主要性能比较

特性/25℃	Novec 4710	Novec 5110	SF_6
分子量/（g/mol）	195	266	146
沸点/℃	-4.7	26.9	-68.3
蒸气压/kPa	252	94	2 149
1 bar下气体密度/（kg/m ³ ）	7.9	10.7	5.9
1 bar下绝缘强度/kV （2.5 mm间隙平板电极）	27.5	18.4	14.0
大气中寿命/年	30	0.04	3 200
温室效应潜能值/GWP	2 210	<1	23 500

1. 新型环保气体的绝缘特性

ABB公司研究发现将5110（5.6%）+ CO_2 压力提高0.22 MPa下绝缘性能接近 SF_6 。西安交通大学利用棒板电极研究表明，0.2 MPa的5110+ CO_2 中混入20 kPa和40 kPa的5110，工频放电电压达到相同气压下 SF_6 的61.89%和81.99%，5110分压

力40 kPa、总压力0.5 MPa的混合气体正、负极性雷电冲击放电电压分别是0.3 MPa时 SF_6 的88.9%和89.9%，增加5110的含量或提高混合气体总压力均可提高绝缘性能，但5110过高的含量将使混合气体的液化温度上升，难以满足行业需求；分压力40 kPa、总压力0.8 MPa的5110+ CO_2 有望实现对现有0.5 MPa GIS中 SF_6 的替代。Alstom/GE公司利用现有145 kV GIS研究发现纯 CO_2 绝缘强度约为 SF_6 的40%，18%~20%的4710+ CO_2 的绝缘强度同 SF_6 相当，同等条件下4%的4710混合气体绝缘强度较 SF_6 低约25%，-25℃时最低操作温度下4710+ CO_2 的绝缘强度是 SF_6 的90%，剩下10%的介电强度可适度提高 CO_2 压力或调整设计来获得。西安交通大学研究表明4710+ CO_2 在-5℃、-15℃和-25℃三种温度下及在相同配比下绝缘强度明显高于5110+ CO_2 ， CO_2 摩尔分数为95%时，5110+ CO_2 和4710+ CO_2 混合气体相对于 SF_6 绝缘强度分别达到0.49和0.78，当 CO_2 摩尔分数为80%时，4710+ CO_2 的相对绝缘强度已经超过纯 SF_6 ；在-25℃温度限制下，5%4710+95% CO_2 混合气体约在0.65 MPa时可达0.5 MPa下 SF_6 的绝缘强度，采取适当混合比的4710+ CO_2 能满足当前高压电力设备应用所需的环境温度要求，且绝缘性能较好，GWP较低。武汉大学研究4710+N₂指出，-25℃最低运行温度，在0.6 MPa和0.3 MPa下4710混合比应小于6%和12%，在0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa和0.6 MPa下的击穿特性约为纯 SF_6 的63.4%、54.6%、49%和56.4%，若混合比不变，0.2~0.3 MPa下绝缘强度最高，继续提高压力则绝缘强度降低；若要满足-10℃的最低运行温度，在0.7 MPa、0.5 MPa和0.4 MPa下4710混合比应分别小于12%、16%和20%。

2. 新型环保气体的温升特性

纯5110或4710气体的散热能力优于 SF_6 气体，但在高压设备应用中其在混合气体中的含量太低，不能非常有效地进行热传导，因此，等体积替代 SF_6 会使得GIS的热性能降低。

ABB公司研究表明使用5110+ CO_2 （7 bar）与 SF_6 （6 bar）相比电流额定值降低约8%，使用5110+干燥空气的GIS可获得的最大电流值比 SF_6 降低7%~15%。Alstom/GE公司在145 kV GIS上测量3种不同比例4710+ CO_2 和 SF_6 温升对比，研究也表明3种比例混合气体温升均比 SF_6 高5~6 K，这些差距需要通过增加散热板等方法来填补，或者可能需要降低设备的额定值。

3. 新型环保气体在高压开关设备中的应用

国内目前对于新型环保气体的研究处于起步

阶段,国外公司72.5 kV以上高压开关设备中新型环保气体的应用情况如表5所示。

表5 新型环保气体在72.5 kV以上高压开关设备中的应用

公司	型号和类型	额定参数	绝缘介质	充气压力/MPa
Alstom/GE公司	F35-145 kV GIS	145 kV/2 500 A/40 kA	g3 (4710+CO ₂)	0.7
	420 kV GIL	420 kV/5 000 A/63 kA	g3 (4710+CO ₂)	0.55
	SKF-245 kV CT	245 kV	g3 (4710+CO ₂)	—
ABB公司	GLK-14-170 kV GIS	170 kV/1 250 A/40 kA	5110+CO ₂ +O ₂	0.6

西开电气关于环保气体的研究

西安西电开关电气有限公司(简称:西开电气)将各种环保气体充入现有SF₆开关设备中进行了一些试验研究,为后续环保产品的研发积累了一些宝贵的经验。

在三相母线样机上进行了不同压力 and 不同电流下SF₆、N₂和干燥空气的温升性能研究,通过多组测量点的对比发现,相同气压、相同电流下N₂和干燥空气散热性能大大低于SF₆,干燥空气散热略优于N₂,电流不变情况下气压提高可以缩小2种气体与SF₆的温升差值,但效果有限;如果气压不变,电流提高时,2种气体与SF₆的温升差值将会进一步扩大。

在126~550 kV GIS母线上充入30%SF₆/70%N₂进行了绝缘试验和温升试验,与纯SF₆相比适当提高了气体压力,在压力提升的情况下温升值与SF₆基本相同,2018年已在几个试点变电站试运行。在126 kV和252 kV隔离开关上充入了30%SF₆/70%N₂顺利通过母线转换电流试验,但由于混合气体电弧电压高,熄弧能力降低,导致开合过程中燃弧时间延长,触头烧蚀有所加重。

2018年将新型氟碳混合气体应用在126 kV GIS母线上,经过大量试验获得与SF₆相当绝缘水平的最佳配比方案,并顺利通过绝缘和温升试验,为后续环保GIS的研发确定了设计基准;新型氟碳混合气体应用在现有隔离开关中顺利通过母线转换电流试验,燃弧时间和触头烧蚀与SF₆类似,但在快速接地开关开合电磁感应电流时出现问题,说明现有结构不能进行等效替换,需对现有结构进行改进设计。

环保气体在高压开关设备上的应用前景

高压开关设备工程应用上,替代SF₆气体需要满足各项性能基本不变、体积大小相当、综合成本接近以及GWP大幅度降低的基本原则,这需要进行更加全面的研究,才能够应用于高压开关设备中。

1)从环保来说SF₆混合气体在高压设备中的应用仅是一个过渡阶段,由于N₂与SF₆混合协同

性较好,不同比例的SF₆/N₂未来在各电压等级GIL中会推广使用;CF₄、CO₂相比SF₆对环境的影响极小,且都具有一定的开断能力,所以SF₆/CO₂、SF₆/CF₄两种混合气体具有用于容量较小断路器与隔离开关中的潜力。

2)常规气体的绝缘强度较低,作为SF₆替代气体带来的缺陷需通过结构改进和气压提升等措施予以补充,或采用多元混合和气固复合绝缘的方式,结合绝缘强度和经济性考虑,未来N₂、干燥空气仍会用于电压等级200 kV以下的开关设备。

3)真空技术在高压领域应用还存在技术难题,目前单个真空灭弧室断口绝缘只能达到145 kV,但由于真空具有优异的灭弧能力,随着技术的进步,真空灭弧室+高绝缘强度混合气体在高压开关设备也有一定的应用空间。

4)完全替代SF₆是环保型高压开关设备的终极目标,虽然目前取得了阶段性的成果,但新型环保气体仍存在一些不足,例如等效替代SF₆需提高充气压力,这对现有的产品设计制造提出挑战。现阶段AirPlus和g3等新型环保气体具有较大应用潜力,特别是g3气体,其在高压开关设备领域展示出了广阔的应用前景,但目前有以下问题需要进行深入研究:①混合气体的种类与配比如何选取最优;②气体电弧与喷口、电极材料的相互作用,及与断路器灭弧室结构、尺寸、操作机构的匹配特性;③电弧开断后的分解物特性及复合性能,弧后热击穿与电击穿特性等;④混合气体及其分解物的泄露及回收问题。

结束语

随着全球气候变暖趋势的加剧,国内外高压开关设备制造商需进一步加强与气体生产厂商和检测设备制造商的合作,加快各种环保气体在开关设备中的应用研究,共同为电力行业绿色减排做出贡献。EA

(收稿日期:2019.04.29)

(编辑:朱金凤)