[互感器]

环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器绝缘特性研究

文/国网陕西省电力公司经济技术研究院　刘晓立
国网陕西省电力公司电力科学研究院　杨鼎革　高　健　牛　博　尚　宇　刘　强　徐　丹

开展了环保型C_4F_7N/CO_2混合气体在110 kV电流互感器中的绝缘性能研究。通过工频和冲击耐压试验，探究9%C_4F_7N和91%CO_2气体混合比例下，不同压力时电流互感器的绝缘耐受性能，通过试验获得了临界击穿状态对应气压值，确定了9%CC_4F_7N和91%CO_2混合环保气体在110 kV电流互感器中推广使用的许用临界气压值。

在众多的高耐电强度电负性绝缘气体中，SF_6气体是迄今为止唯一得到工业应用的绝缘气体。目前，SF_6已经广泛应用于全封闭组合电器（GIS）和管道充气（CGIT）中，同时也在电力变压器、直流输电换向阀和断路器等设备中获得应用，近年来还出现了全封闭的SF_6气体绝缘变电站和管道充气电缆出线的供电系统。与传统的敞开式电气装置相比，以压缩的SF_6气体为绝缘的组合电器（GIS）的空间占有率可以大大缩小，如500 kV GIS的占地面积只有敞开式的1/50。随着SF_6的大规模广泛应用，其不足之处也逐渐显露出来：①SF_6气体的全球变暖系数约为CO_2的23 900倍，电力设备SF_6泄漏对环境产生污染；②SF_6是分子量较大的重气体，液化温度较一般普通气体高，但是在压力较大、温度过低环境下，容易液化，因此SF_6气体不适用于高寒地区；③SF_6气体价格昂贵，不适用于用气量大的电气设备，如气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）等；④SF_6气体的耐电强度受非均匀电场、导电微粒和电极表面粗糙度的影响而急剧下降。

C_4F_7N气体首次由3M公司提出，名称为七氟异丁腈。C_4F_7N气体优异的介电强度可归因于其分子结构中氟含量高，以及大量自由度所赋予的高能量吸收能力。C_4F_7N的绝缘能力约为SF_6的两倍，不可燃，无毒，化学稳定性好。值得注意的是，C_4F_7N的全球变暖潜能值（Global Warming Potential, GWP）为2 400，只有SF_6的1/10，可以大大减轻SF_6所带来的环境问题。然而，C_4F_7N的液化温度较高，标准压力下液化温度为－4.7℃，故无法作为单一气体使用，为了满足更低的运行温度，经常需要混合CO_2、N_2等缓冲气体。C_4F_7N体积分数为10%的混合气体可以达到相同条件下SF_6绝缘水平的80%，体积分数20%的混合气体可以达到SF_6绝缘水平的95%以上，基本接近SF_6的绝缘性能。综合考虑到环保气体的绝缘性能以及经济适用型，本文选用9%C_4F_7N和91%CO_2的混合比例进行研究。

本文通过工频和冲击耐压试验，探究环保型C_4F_7N和CO_2混合气体在9%和%91的混合比例下，不同压力时110 kV电流互感器的绝缘耐受性能，试验获得临界击穿状态对应气压值，最终确定了9%C_4F_7N和91%CO_2混合环保气体在110 kV电流互感器中推广使用的许用临界气压值。

试验平台及方法

在实验室开展环保气体绝缘电流互感器绝缘特性研究时，选择与运行设备外观结构、尺寸一致的110 kV瓷柱式电流互感器作为试品，其试品

实物及结构图如图1所示。

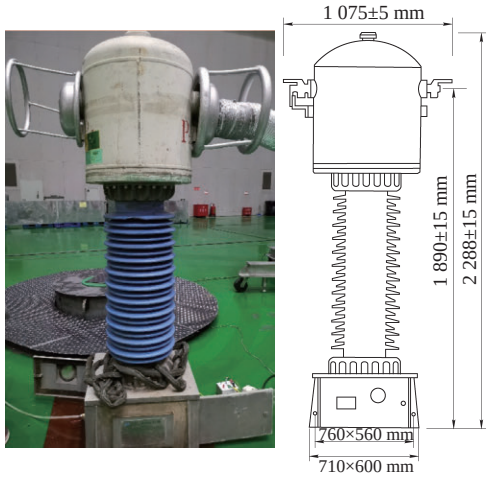

图1　电流互感器实物与结构示意

试验前需要向电流互感器腔体内充入不同气压9%和C_4F_7N91%/CO_2混合比例的气体，其具体操作步骤为：①利用气体回收装置对电流互感器内部残余气体进行回收与分离；②回收结束后，对腔体和充气管路进行抽真空及保持、复抽，使其内部气压低于133 Pa；③根据试验需求，计算混合比例及目标压力下，混合气体中C_4F_7N与CO_2各自的分压力；④利用分压控制比例法，向电流互感器腔体内依次充入$C_4F_7NSF_6$和CO_2，并达到各自的分压力；⑤充气完毕后静置24 h，保证腔体内部混合气体混合均匀；⑥利用C_4F_7N/CO_2混合气体比例检测仪，检测混合气体比例，满足要求后进行试验。

根据GB 20840.1—2010《互感器第1部分：通用技术要求，IEC 61869—1:2007，MOD》中的要求，电流互感器一次端额定绝缘水平需要满足表1要求。国标规定：暴露安装时推荐选用最高的绝缘水平，额定工频耐受电压为设备外绝缘干状态下的耐受电压值，额定雷电冲击耐受电压为设备内绝缘的耐受电压值。对于本项目中的电流互感器而言，采取C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘后，仅对其内绝缘产生影响，因此主要关注其内绝缘能否满足绝缘要求。本项目研究过程中，采用工频耐受电压200 kV，雷电冲击电压450 kV进行试验。

表1　电流互感器一次端额定绝缘水平（单位：kV）

设备最高电压（方均根值）	额定工频耐受电压（方均根值）	额定雷电冲击耐受电压（峰值）	额定操作冲击耐受电压（峰值）
126	185/200	450	–

工频耐压试验原理图和实际接线图分别如图2和图3所示，利用400 kV工频试验变压器输出试验所需工频电压。正式试验前先开展老炼试验，电压从0缓慢升至U_m/ 3（73 kV）并持续5 min，然后缓慢升至U_m（126 kV）并持续3 min。老炼试验结束后，电压由U_m（126 kV）升至U_m（200 kV）并持续1 min，若该过程中未发生击穿现象，则判定通过绝缘试验。

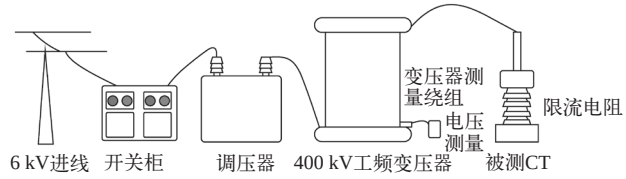

图2　工频耐压试验原理图

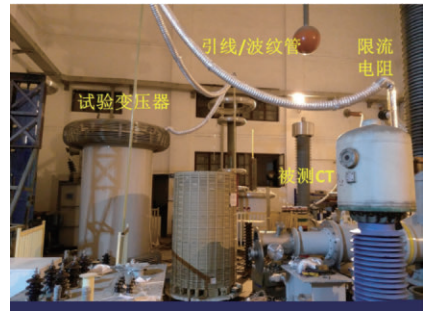

图3　工频耐压试验实际接线图

雷电冲击耐压试验的接线如图4所示，等效电路回路如图5所示。冲击电压发生器可输出最高幅值为900 kV的雷电冲击电压波形。

图4　雷电冲击耐压试验现场接线图

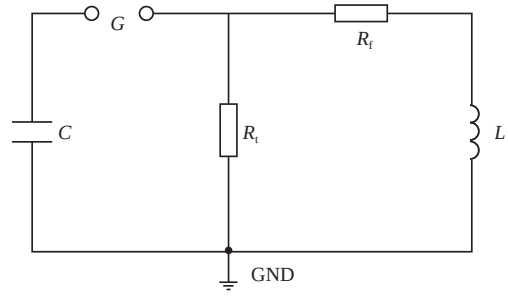

图5　雷电冲击耐压试验回路等效示意图

图5中，G为触发球隙，C为充电电容，R_t为波尾电阻，R_f为波头电阻，L为待测试品（电流互感器）。

与工频耐压试验时选择的气压值相同，雷电冲击耐压试验时压力值仍为0.80 MPa、0.70 MPa和0.60 MPa依次减小，如果正、负极性均出现击穿就停止试验。

试验结果讨论

1．额定工频耐压特性

在此次试验中所使用的电流互感器防爆膜能承受的最大压力值为1.2 MPa，充气时需考虑环境温度带来的影响，出于安全考虑，进行环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器试验时内部气压从0.8 MPa（表压）开始。

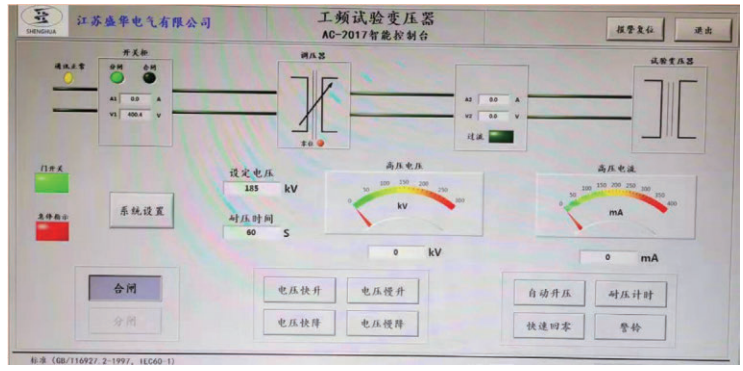

图6　干燥空气绝缘电流互感器工频耐受电压试验设置

为了探索环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器的许用临界压力值，需要研究不同气压下干燥空气绝缘电流互感器的绝缘性能，寻找其临界绝缘对应压力值。依次降低干燥空气绝缘电流互感器腔体内部干燥空气压力值，并分别开展工频耐受试验。干燥空气绝缘电流互感器工频耐受电压试验设置如图6所示。试验结果如表2所示。

表2　不同压力下干燥空气绝缘电流互感器的工频耐压试验结果

压力/MPa	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
试验结果	通过	通过	通过	通过	通过	通过	击穿

从上述试验结果可以看出，对于干燥空气绝缘电流互感器来说，在0.4～0.8 MPa气压下，工频耐受试验均通过，在0.3 MPa下发生击穿现象。在工频耐受试验获得的临界压力值的基础上，将结合雷电冲击电压试验，获得最终的许用临界气压值。

2．干燥空气绝缘电流互感器雷电冲击耐压特性研究

雷电冲击试验的接线图如图4所示。冲击电压发生器最高可输出幅值为900 kV的雷电冲击电压波形，根据GB 20840.1—2010的要求，本次试验雷电冲击电压幅值设置为450 kV。

与工频耐压试验时压力值相同，雷电冲击耐压试验时环保型C_4F_7N/CO_2混合气体压力值介于0.3～0.8 MPa，逐步降低开展试验。

（1）0.4～0.8 MPa下C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器均未击穿

在冲击电压发生器控制台处将冲击电压的极性设置为正极性，并设置好每级球隙放电电压，确保输出电压为450 kV，然后对被试电流互感器进行15次正极性雷电冲击电压试验。正极性雷电冲击电压波形如图7所示，幅值452 kV，前沿0.933 μs，半高宽52.582 μs。试验结果：在0.4～0.8 MPa下环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器正极性雷电冲击15次均未击穿。

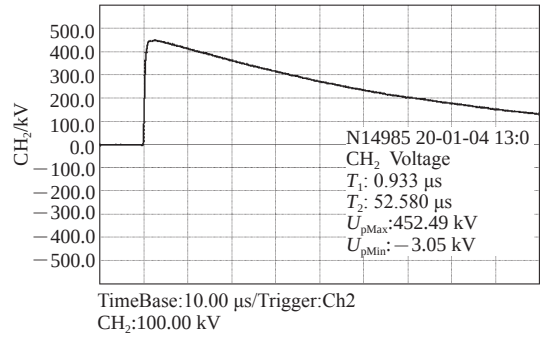

图7　0.9 MPa下C_4F_7N/CO_2绝缘电流互感器正极性雷电冲击电压波形

正极性雷电冲击试验完成后，在控制台处转换电压极性为负极性，对被试电流互感器进行15次负极性雷电冲击试验。试验结果：在04～0.8 MPa下环保型环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器负极性雷电冲击15次均未击穿，如图8所示。

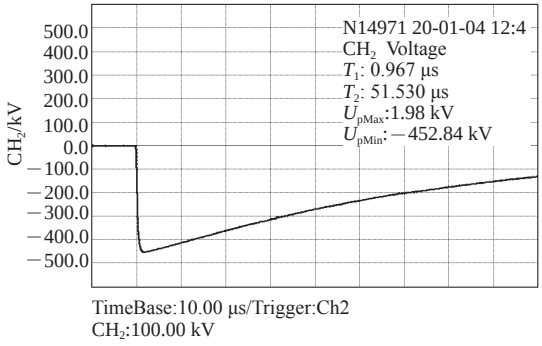

图8　0.9 MPa下C_4F_7N/CO_2绝缘电流互感器负极性雷电冲击电压波形

（2）0.3 MPa下C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器

在冲击电压发生器控制台处将冲击电压的极性设置为正极性，并设置好每级球隙放电电压，确保输出电压为450 kV，然后对被试电流互感器进行15次正极性雷电冲击电压试验。正极性雷电冲击电压波形如图9所示，幅值452 kV，前沿0.933 μs，半高宽52.582 μs。试验结果：在0.8 MPa下C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器正极性雷电冲击15次均未击穿见图9。

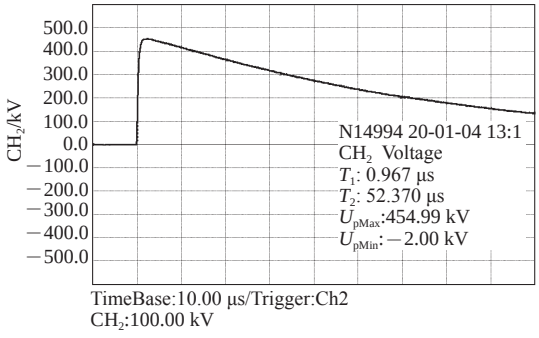

图9　0.3 MPa下C_4F_7N/CO_2绝缘电流互感器正极性雷电冲击电压波形

正极性雷电冲击试验完成后，在控制台处转换电压极性为负极性，对被试电流互感器进行15次负极性雷电冲击试验。试验结果：在0.8 MPa下干燥空气绝缘电流互感器负极性雷电冲击2次未击穿，如图10所示；12次击穿，击穿波形如图11所示。

试验结果表明：在0.3 MPa下，负极性雷电冲击试验时C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器内部出现击穿，而在0.2 MPa下，正、负极性雷电冲击试验时C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器内部均出现击穿，0.3 MPa及0.2 MPa气压下均未通过雷电冲击耐压试验。

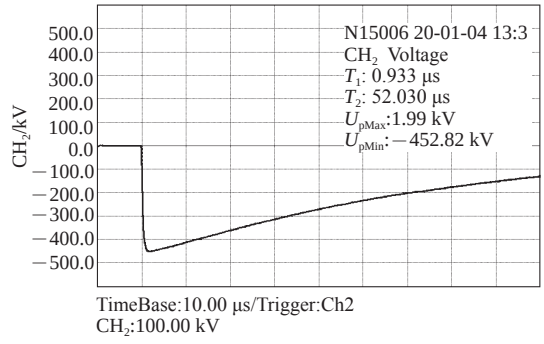

图10　0.3 MPa下C_4F_7N/CO_2绝缘电流互感器负极性雷电冲击电压波形

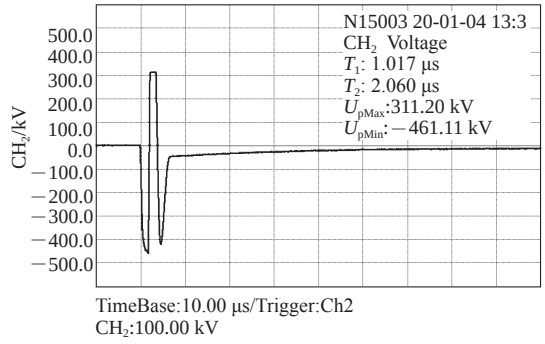

图11　0.3 MPa下C_4F_7N/CO_2绝缘电流互感器负极性雷电冲击电压击穿波形

综合以上工频和雷电冲击耐压试验结果，若气体绝缘电流互感器内部绝缘介质为环保型C_4F_7N/CO_2混合气体，临界许用压力值应选择大于0.3 MPa。

结束语

本文针对环保型C_4F_7N/CO_2混合气体绝缘电流互感器绝缘性能开展研究。首先根据环保型C_4F_7N/CO_2混合气体间隙击穿电压计算公式计算了不同混合比例下环保型C_4F_7N/CO_2混合气体等值压力，为绝缘试验气压选取奠定基础。对电流互感器开展工频耐压试验，获得了9%C_4F_7N和91%CO_2比例下，通过工频耐压试验对应的临界气压值0.2 MPa。对电流互感器开展雷电冲击耐压试验，试验结果发现，当逐渐降低混合气体气压时，电流互感器首先在0.3 MPa气压下负极性雷电充电电压下出现击穿，随后在0.2 MPa气压下正、负极性雷电冲击电压下均被击穿。雷电冲击电压下，电流互感器临界气压值高于工频电压下临界气压值。综合工频电压和雷电冲击电压耐受试验，确定了9%C_4F_7N和91%CO_2临界气压是0.3 MPa。EA

（收稿日期：2020.07.09）
（编辑：朱金凤）