

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.025

基于 SF₆ 混合气体绝缘性能的设备补气策略研究

周倩^{1,2}, 柯锬¹, 张晓星¹, 田双双¹, 胡军台³, 王波³

(1. 湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心,

湖北 武汉, 430068; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015;

3. 国网河南省电力公司平顶山供电公司, 河南 平顶山 467001)

摘要:随着电力需求的增长和环境保护要求的提高, SF₆ 气体的使用逐渐受到限制。SF₆ 混合气体在一定程度上减少了 SF₆ 气体用量, 目前已经在电气设备中应用。文中针对 SF₆ 混合气体在 220 kV 气体绝缘组合电器(GIS)中发生泄漏引起的绝缘变化展开研究, 通过改变微小的气压值和混合比, 探究混合气体的绝缘性能变化, 分析气压、混合比因素对工频击穿电压的影响规律, 获取各气压下各比例混合气体的绝缘强度曲线图, 从而得到保证设备安全稳定运行的补气策略。研究发现, 混合气体击穿电压的变化规律呈现出随着压强和混合比的提高, 非线性程度增大的特点, 并且得到了设备安全运行的混合比和气压的边界值。文中的研究可以为 SF₆/N₂ 混合气体绝缘设备提供运维规程和技术标准, 同时为制定混合气体的检测技术标准奠定基础。

关键词:气体绝缘组合电器(GIS)运维技术; SF₆/N₂混合气体; 击穿电压; 替代气体; 补气策略

中图分类号: TM213

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0175-07

0 前言

SF₆ 气体绝缘组合电器(gas insulated switch-gears, GIS)自 1967 年首次在德国投运以来, 便以其可靠性高、维护量小、占地面积小、配置灵活等优点迅速发展并广泛应用于电力系统中^[1-6]。随着技术发展, 气体绝缘变压器(gas insulated transformer, GIT)、气体绝缘线路(gas insulated line, GIL)、气体绝缘断路器(gas circuit breaker, GCB)和气体绝缘开关柜(cubic type gas insulated switchgears, C-GIS)等 SF₆ 绝缘设备在国内外电力系统中被广泛使用^[7-8]。但 SF₆ 气体被认为是一种对大气环境具有较大危害的温室气体, 其温室效应潜在值是 CO₂ 的 23 500 倍左右, 在大气中的存活寿命约为 3 200 a^[9-10]。联合国气候变化公约缔约方在 1997 年签订的《京都议定书》中, 将 SF₆ 气体列为 6 种限制性使用的温室气体之一, 要求限制 SF₆ 气体的使用。

SF₆ 混合气体绝缘电气设备的推广和使用可以一定程度减少 SF₆ 气体的使用量和排放量。文献[11]研究得出 SF₆/N₂ 混合气体在一定条件下拥有替代纯 SF₆ 的可行性; 文献[12]从气体放电理论角度分析了不同混合比下 SF₆/N₂ 混合气体的绝缘性能; 文献[13-14]的研究结果表明 SF₆/N₂ 混合气体的击穿电压随气压的增长呈线性变化; 文献[15-16]对 SF₆ 与空气、N₂O、N₂、CO₂ 等的混合气体在不

同电场条件下的绝缘特性进行了系统研究, 并先后与诸多国内电力设备生产厂家合作研制开发了 SF₆ 混合气体 GIT、GIS 以及 C-GIS 等电力设备。SF₆ 混合气体作为绝缘介质在实际电气设备中得到了应用, 全球首条 SF₆/N₂ 绝缘 GIL 于 21 世纪初期在瑞士投入运行^[17]。ABB 公司在法国境内研制并建设了首条长距离的以 SF₆/N₂ 作为气体绝缘介质的 GIL, 取代了该地区原有的 420 kV 架空输电线路^[18]。2016 年, 由中国研制的 SF₆/N₂ 混合气体的 1 100 kV GIL 长期考核试验线段于 2016 年 6 月在武汉特高压交流试验基地开始带电运行, 并顺利通过了近一年的带电考核。江苏帕威尔电气有限公司、上海天灵开关厂有限公司开发的 N2X-24 kV 充气柜采用的也是 SF₆/N₂ 混合气体, SF₆ 在混合气体中的比例很少, 仅为 10%, 大大节省了 SF₆ 的使用量^[19]。研究发现, SF₆ 体积分数为 5%~30% 的混合气体受到更加广泛的关注^[20]。目前国内已经有 220 kV GIS 母线采用 30% 的 SF₆/N₂ 混合气体作为绝缘介质, 但是运维的研究处于一个空白状态, 并未制定相应的行业标准。

基于以上现状, 文中对 SF₆/N₂ 混合气体在气压为 0.7 MPa、混合比为 30% 发生微量变化条件下进行工频交流击穿特性研究, 测量混合气体不同气压、混合比条件下的击穿电压值, 总结出混合气体的击穿电压特性, 为 SF₆/N₂ 混合气体提供运维规程和技术标准, 同时为制定混合气体的检测技术标准奠定基础。

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977159)

1 实验平台、方法与过程

1.1 实验平台

实验平台示意如图 1 所示。

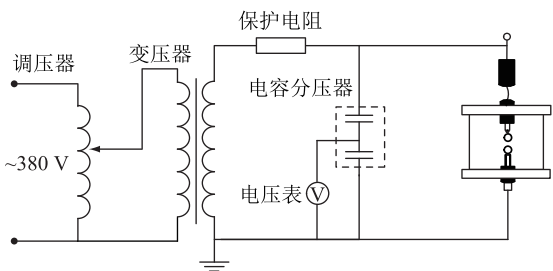


图 1 实验平台示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental platform

主要实验设备及作用:

(1) 感应调压器。输入电压为 380 V, 输出电压为 0~250 V, 额定功率为 50 kV·A。

(2) 无晕试验变压器。可以为实验提供最高 250 kV 的工频试验电压。

(3) 保护电阻。阻值为 20 kΩ, 保护试验变压器在发生闪络时免遭破坏。

(4) 电容分压器。 $C_1/C_2 = 500 \text{ pf}/1 \text{ } \mu\text{f}$, 将幅值较高的实验电压转换成可被电压表直接测量的量程内值。

(5) 气体绝缘性能测试气室。安装电极和充入实验气体, 使实验气体发生击穿, 进而检测待测气体绝缘性能。

实验采用球球电极模拟实际设备中的准均匀电场, 电极的直径为 50 mm, 材质为铜。将电极物理模型置入放电气室内, 如图 2 所示。实验时, 为排除水分含量对实验结果的影响, 实验室温度通过空调控制在 20 °C 左右, 湿度通过除湿机控制在相对湿度 50% 左右, 所有实验均在该条件下进行, 确保实验结果具有可比性。

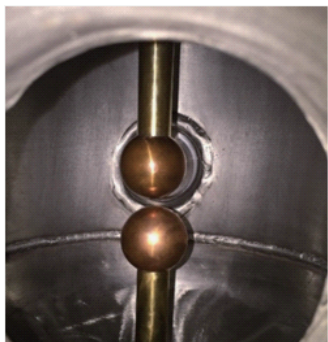


图 2 球球电极在罐体内的放置

Fig.2 The placement of the ball electrode in the tank

为了验证球球电极可以模拟 GIS 设备内的准均

匀场, 借助于 COMSOL 计算软件对其进行仿真计算。电场的均匀程度由电场不均匀系数 f 来衡量:

$$f = E_{\max}/E_{\text{av}} \quad (1)$$

$$E_{\text{av}} = U/d \quad (2)$$

式中: E_{av} 为平均场强; E_{\max} 为最大场强; U 为电极间电压; d 为电极间距, 文中在实验中设置的电极间距为 2 mm。通过 COMSOL 计算软件完成最高场强的计算, 电场分布如图 3 所示, 得到电场不均匀度为 1.02, 介于 1~1.1 之间, 属于均匀电场。

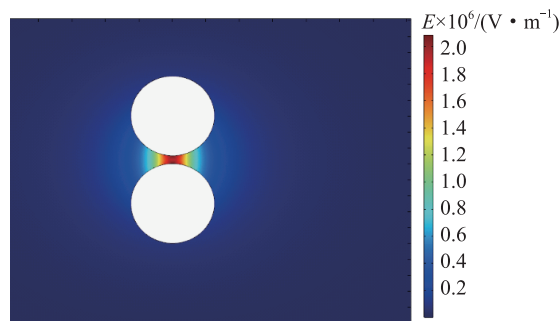


图 3 球球电极电场分布

Fig.3 Electric field distribution of the ball electrode

1.2 实验方法与过程

工频击穿实验对象为 SF₆/N₂ 混合气体, 其中 SF₆ 纯度为 99.995%, N₂ 纯度为 99.999%, 两者的微水含量均小于 5 μL/L。混合气体压力取为 0.682 0~0.700 0 MPa (绝对压力), 混合比 k 取 0%, 10%, 20%, 25%, 27%, 28%, 29%, 30%, 31%, 35%, 100%, 电极间距为 2 mm, 环境温度为室温 (25 °C), 主要探究气压、混合比对 SF₆/N₂ 混合气体工频击穿电压的影响。运用控制变量法, 保持混合比不变, 利用排气阀每次控制降低 2 kPa 的气压, 每降低一次气压进行 5 次击穿实验。

SF₆/N₂ 混合气体的实验过程基本步骤为: 先后进行实验准备、充气、排气等操作。在实验中保证混合比不变的条件, 从高气压至低气压依次进行工频击穿实验。0.700 0 MPa 的实验完成后, 打开放气阀门, 使精密气压表示数显示的气压达到预期的实验气压条件下, 再进行工频击穿实验。待固定混合比条件下完成实验后, 更换混合比, 重复上述操作过程。

2 实验结果分析

2.1 气压对 SF₆/N₂ 工频击穿电压的影响

根据实验结果, 整理数据, 取每次实验击穿电压的平均值, 得到 SF₆/N₂ 混合气体工频击穿电压与气压的关系, 如图 4 所示。

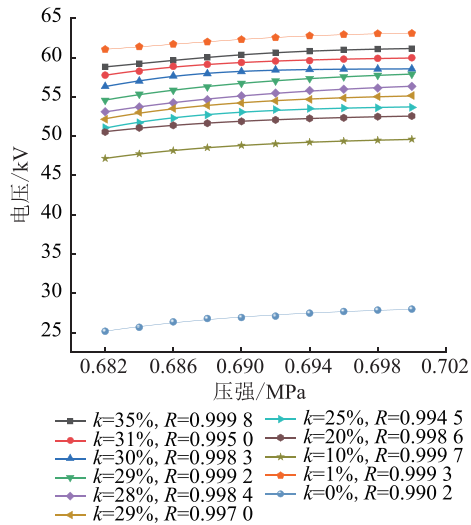


图4 SF₆/N₂混合气体工频击穿电压与气压的关系

Fig.4 Relationship between power frequency breakdown voltage and air pressure of SF₆/N₂ mixed gas

观察图4可知,击穿电压与气压的变化呈非线性关系。希尔(Hill)方程常用于非线性的情况,而Hill1是带偏移量的修正希尔函数,根据式(3)将工频击穿电压与压强进行拟合。

$$U = A + (B - A) \frac{P^n}{m^n + P^n} \quad (3)$$

式中:U为击穿电压;P为压强;A,B,m,n为拟合参数。

运用Hill1对实验数据进行拟合,R为拟合系数,其值越接近1,说明拟合度越高。由图4可见,R的值均在0.99以上,说明拟合程度及效果非常好,同时也表明在维持混合比不变的条件下,通过改变压强的值,SF₆/N₂混合气体的击穿电压增长缓慢,体现了SF₆浓度越高,SF₆/N₂混合气体的非线性程度越大,符合理论效果。拟合方程的主要参数见表1。

表1 拟合方程的主要参数

Table 1 Main parameters of the fitting equation

k	R	A	B	m	n
0.35	0.999 8	57.23	61.31	0.684	139.410
0.31	0.995 0	55.46	60.12	0.620	97.756
0.30	0.998 3	53.49	58.58	0.681	207.598
0.29	0.999 2	51.34	58.71	0.592	62.122
0.28	0.998 4	49.68	57.36	0.547	54.877
0.27	0.997 0	48.12	55.48	0.596	83.414
0.25	0.994 5	46.42	53.92	0.613	102.627
0.20	0.998 6	44.94	52.92	0.604	71.085
0.10	0.999 7	42.66	49.97	0.616	75.628
1	0.999 3	59.97	63.29	0.685	135.572
0	0.990 2	21.57	28.62	0.594	63.933

分子的游离会产生大量正负空间电荷,使电场产生畸变,而大量的空间电荷以及畸变的电场会导致光游离,对击穿过程产生影响。均匀电场中气体的击穿过程与气体的相对密度δ和极间距离d相关,δd值较小时可以用汤逊理论,δd值较大时可以用流注理论来解释电子崩。电子崩在产生大量电子的同时,也会产生大量的离子,离子在电场力的作用下与电极撞击,而当离子在电极表面发生自持放电时就意味着气隙被击穿。当气室处在一个较小气压时,气室内各气体分子密度相对较小,分子间平均距离较大,电子平均自由行程较大。随着气压逐渐升高,电子平均自由行程逐渐减小,电子碰撞前积累的平均动能下降,使电子发生有效碰撞的几率降低。随着气压继续升高至0.7 MPa,此时即使气压增大,电子平均自由行程减少,其降低电子有效碰撞的作用已十分有限。因此随着气压的增大,击穿电压的非线性也越大。

2.2 混合比对 SF₆/N₂工频击穿电压的影响

在保持压强不变的情况下,变量混合比k也保持相同的增幅,对数据进行详尽分析,主要针对混合比k为0.25,0.27,0.28,0.29,0.30,0.31进行拟合,得到如图5所示的SF₆/N₂混合气体的工频击穿电压与混合比的关系。

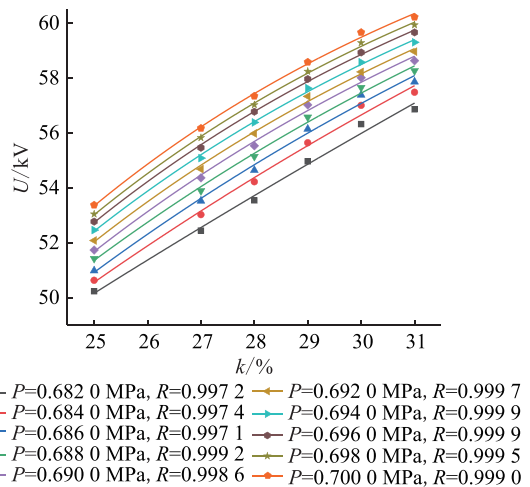


图5 SF₆/N₂混合气体工频击穿电压与混合比k的关系

Fig.5 Relationship between power frequency breakdown voltage and mixing ratio k of SF₆/N₂ mixed gas

根据式(4),将工频击穿电压与混合比进行拟合。

$$U = V_{\max} \frac{k^N}{M^N + k^N} \quad (4)$$

式中:V_{max},M,N为拟合参数。其主要参数如表2所示。

表 2 拟合方程的主要参数

Table 2 Main parameters of the fitting equation

P	R	V_{\max}	m	n
0.682	0.997 2	81.68	21.56	0.69
0.684	0.997 4	94.68	22.74	1.43
0.686	0.997 1	79.13	18.54	1.97
0.688	0.999 2	77.29	18.01	2.08
0.690	0.998 6	72.19	17.47	2.57
0.692	0.999 7	70.86	17.31	2.76
0.694	0.999 9	70.52	17.20	2.84
0.696	0.999 9	69.80	17.24	3.03
0.698	0.999 5	69.48	17.26	3.15
0.700	0.999 0	69.23	17.28	3.27

由图 5 可见,0.682 0~0.700 0 MPa 的 SF₆/N₂混合气体的击穿电压均随混合比 k 的增大而非线性增大。其次,同一气压值下,提高气压能显著改善 SF₆/N₂混合气体绝缘性能。理论上,随着混合比的增加,非线性逐渐增大。

上述规律可以用流注理论的分子电离过程来解释。由于 N₂ 的电离能约为 15.5 eV,而 SF₆ 的电离能约为 15.6 eV,所以在 SF₆/N₂混合气中,N₂ 相较于 SF₆ 更加容易发生电离。电离出的电子被 SF₆ 分子俘获(SF₆ 的电子亲和能仅约为 3.4 eV),形成离子半径较大的负离子团,导致气体中自由电子浓度减小并抑制了流注的发展,使击穿电压较纯 N₂ 有明显提高。但随着混合比增大(SF₆ 含量相对增大、N₂ 含量相对减小),SF₆ 绝缘性能的非线性影响更加明显,SF₆/N₂混合气体击穿电压的增长趋势随之变缓。

2.3 混合比和压强对 SF₆/N₂工频击穿电压的影响

为研究混合比和压强 2 个变量因素同时对 SF₆/N₂混合气体工频击穿电压的影响,构建式(5)所示的拟合函数,将工频击穿电压与混合比以及压强进行拟合。

$$F(k, P) = a + b \sin(h\pi k P) + ce^{-(wP)^2} \quad (5)$$

式中: P 为压强; a, b, c, h, w 为拟合系数。

以混合气体的总气压值 P 以及混合比 k 作为变量,对其与击穿电压的进行数据拟合,最后得到 SF₆/N₂混合气体工频击穿电压与混合比及压强的关系,如图 6 所示。其中,拟合参数 $R=0.983 1$ 。

曲线回归是建立不同变量间相关关系的非线性数学模型数量关系式的统计方法。为了进一步提高击穿电压 U 对双变量压强 P 和混合比 k 的拟合度,拟采用曲线回归对实验数据进行非线性二次回归平滑曲线拟合,得到 SF₆/N₂混合气体工频击穿电压与混合比及压强的关系,如图 7 所示。其中, $R=0.999 7$ 。采用二次回归函数可以使 SF₆/N₂混合

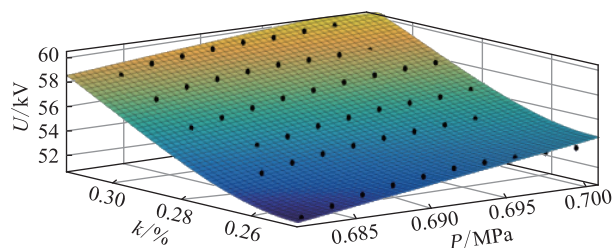


图 6 SF₆/N₂混合气体工频击穿

电压与混合比及压强的关系

Fig.6 Relationship between power frequency breakdown voltage and mixing ratio and pressure of SF₆/N₂ mixed gas

气体工频击穿电压与混合比及压强的拟合效果更好。

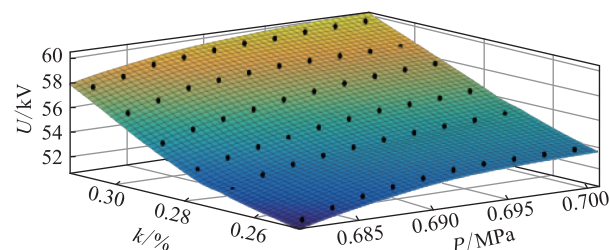


图 7 优化后 SF₆/N₂混合气体工频

击穿电压与混合比及压强的关系

Fig.7 Relationship between power frequency breakdown voltage and mixing ratio and pressure of SF₆/N₂ mixed gas after optimization

由图 7 可以看出,随着压强和混合比的提高,击穿电压均非线性程度越来越大,与图 4 和图 5 结果一致,且与拟合结果吻合。

3 SF₆混合气体绝缘设备补气策略

SF₆气体和 N₂气体的绝缘强度不同,气体的分子量不同,如若运行过程中,气体的体积比发生变化,会导致绝缘强度发生变化。

根据国内外的文献资料及研究成果总结得出,以纯 SF₆气体作为绝缘介质的间隙工频击穿电压的经验公式^[21]为:

$$U = \frac{1}{f} 65 (10P)^{0.73} d \quad (6)$$

其中, P 为气体绝对压力。工程中纯 SF₆气体绝缘 GIS 母线的充气压力^[12]一般为 0.5 MPa,并且文中的实验电极距离 d 为 0.2 cm,将以上 2 个数据带入式(6)可得以纯 SF₆气体作为绝缘介质的间隙工频击穿电压。

DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》及 GB 50150—2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》条文^[22—23]中指出,SF₆组合电器设备

年漏气率不大于 1.0%,控制在 0.5% 方才合格。通过式(6)按照最大泄漏量计算,得出纯 SF₆ 气体作为绝缘介质应用在 GIS 母线中应进行补气的临界击穿电压,由临界击穿电压与原始击穿电压的比值,最终发现泄漏后纯 SF₆ 气体 GIS 母线的绝缘性能只能达到之前的 98%。

以此为标准,当 SF₆ 混合气体绝缘强度下降 2%,绝缘性能只能达到初始的 98% 时,则须对 SF₆ 混合气体设备进行维护。绝缘性能通过击穿电压值来衡量,因此只需将实验中测量所获得的击穿电压乘以 98%,得到一个临界击穿电压,而这个临界电压分别对应混合比和气压值,最后绘制的绝缘性能临界状态如图 8 所示。

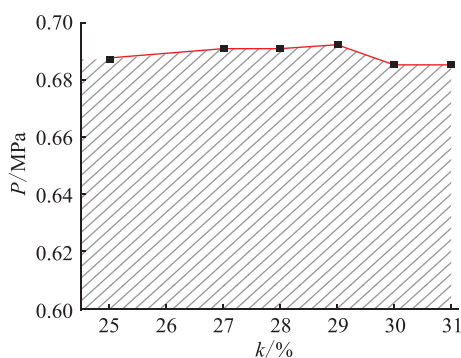


图 8 绝缘性能临界状态

Fig.8 Critical state of insulation performance

文中的研究以 220 kV GIS 母线为例,气室内的标准压强 P_0 为 0.700 0 MPa, SF₆ 混合比 k_0 为 30%。当现场检测设备内的气压值 P 和混合比 k 数值处于图 8 中阴影部分时,则须对设备进行补气操作,以防设备绝缘性能下降导致电力事故发生。具体补气方法如下。

(1) 计算补气的总压强:

$$P_i = P_0 - P \quad (7)$$

式中: P_0 为原配气压强; P_i 为补气压强。

(2) 根据道尔顿分压定律计算需要补充的 SF₆ 分压:

$$P_{i(SF_6)} = P_0 k_0 - P k \quad (8)$$

(3) 确定需要补充的 N₂ 的分压:

$$P_{i(N_2)} = P_i - P_{i(SF_6)} = P_0(1 - k_0) - P(1 - k) \quad (9)$$

根据计算所得的 SF₆ 和 N₂ 分压采用专用的充气装置对设备进行补气。

4 结论

(1) 在标准气压值不变的情况下,混合气体的击穿电压随着混合比的减少而降低。由此说明,保证设备内混合气体的气压值不变,增大混合比是提

高其绝缘性能的有效措施。

(2) 在保证混合比不变的条件下,混合气体的击穿电压随着气压值的增大而增大,其非线性程度也越来越大,因此同一混合比条件下,提高气压能显著改善 SF₆/N₂ 混合气体的绝缘性能。

(3) 当引入双变量,即混合比和压强 2 种因素同时作用时,击穿电压呈现出随着压强和混合比的提高,非线性程度增大的特点。同时确定了绝缘临界值,为后续研究 SF₆/N₂ 混合气体绝缘设备的运维规程和制定技术标准提供一定的技术支持和参考。

参考文献:

- [1] 邓云坤,马仪,陈先富,等. 六氟化硫替代气体研究进展综述[J]. 云南电力技术,2017,45(2):124-128.
DENG Yunkun, MA Yi, CHEN Xianfu, et al. Survey of the research progress on SF₆ alternatives[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(2):124-128.
- [2] 周联蕊,韩冬,赵明月,等. SF₆ 替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报,2020,35(23):4998-5014.
ZHOU Zhenrui, HAN Dong, ZHAO Mingyue, et al. Review on decomposition characteristics of SF₆ alternative gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23):4998-5014.
- [3] 赵谦,殷建荣,程成,等. 基于就地控制器的变电站 GIS 智能化研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(17):149-155.
ZHAO Qian, YIN Jianrong, CHENG Cheng, et al. Study on intelligent GIS based on on-site control unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17):149-155.
- [4] 王继业,朱欣焰,赵光,等. 基于深度神经网络和 GIS 数据的最优停电模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):58-63.
WANG Jiye, ZHU Xinyan, ZHAO Guang, et al. Research on optimal outage model based on deep artificial neural network and GIS data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16):58-63.
- [5] 王磊,刘衍,冯宇,等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(22):45-51.
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):45-51.
- [6] 李玉杰,李洪涛,宋思齐,等. 基于红外的 GIS 内部导体温度检测技术研究[J]. 电力工程技术,2019,38(2):142-146.
LI Yujie, LI Hongtao, SONG Siqi, et al. Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2):142-146.
- [7] 牛浩,邱悦. 气体绝缘组合电器 SF₆ 分解产物检测中典型影响因素研究[J]. 浙江电力,2018,37(8):59-64.
NIU Hao, QIU Yue. Study on Typical influencing factors of SF₆ decomposition product detection in GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(8):59-64.
- [8] 王绍安,何彦良,邵先军,等. H₂O 对尖端放电缺陷下 SF₆ 分

- 解产物含量的影响[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 87-92.
WANG Shaoan, HE Yanliang, SHAO Xianjun, et al. Effect of H₂O on the content of SF₆ decomposition products under point discharge[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 87-92.
- [9] 张晓星, 周君杰, 唐炬, 等. CF₃I/N₂混合气体局部放电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 287-293.
ZHANG Xiaoxing, ZHOU Junjie, TANG Ju, et al. Experimental study of partial discharge properties for CF₃I/N₂ mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 287-293.
- [10] 丁然, 赵科, 肖焱艳, 等. 高压下 O₂对 C₄F₇N/N₂混合气体绝缘性能和分解特性的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(3): 129-138.
DING Ran, ZHAO Ke, XIAO Hanyan, et al. Effect of O₂ on insulation performance and decomposition characteristic of C₄F₇N/N₂ gas mixture at high gas pressure[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 129-138.
- [11] 杨冬. SF₆、N₂及其混合气体绝缘特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006.
YANG Dong. Experimental research of electrical insulating characteristics about SF₆, N₂ and their mixtures[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2006.
- [12] 牛文军, 魏俊梅, 张铎, 等. 550 kV SF₆/N₂充气母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 77-80.
NIU Wenjun, WEI Junmei, ZHANG Duo, et al. Insulation performance of 550 kV SF₆/N₂ busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 77-80.
- [13] 李鑫涛, 林莘, 徐建源, 等. SF₆/N₂混合气体电击穿特性仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 42-52.
LI Xintao, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Simulations and experiments of dielectric breakdown characteristics in SF₆/N₂ gas mixtures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 42-52.
- [14] 李旭东, 周伟, 屠幼萍, 等. 0.1~0.25 MPa气压下二元混合气体 SF₆-N₂和 SF₆-CO₂的击穿特性[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 260-264.
LI Xudong, ZHOU Wei, TU Youping, et al. Breakdown characteristics of binary gas mixtures SF₆-N₂ and SF₆-CO₂ under 0.1~0.25 MPa atmosphere pressures[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 260-264.
- [15] 田雨, 张晗, 赵虎. SF₆/CF₄混合气体的饱和蒸气压与绝缘特性计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 765-771.
TIAN Yu, ZHANG Han, ZHAO Hu. Calculation of saturated vapor pressure and insulation characteristics on mixtures of SF₆ and CF₄[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 765-771.
- [16] 郭臻, 张乔根, 游浩洋, 等. 工频下电场不均匀度对 SF₆/N₂混合气体放电特性的影响与临界半径现象[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 780-787.
GUO Can, ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, et al. Influence of electric field non-uniformity on discharge characteristics and phenomenon of critical radius in SF₆/N₂ gas mixtures under power frequency voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 780-787.
- [17] KOCH H, HOPKINS M. Overview of gas insulated lines (GIL) [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. San Francisco, CA, USA. IEEE, 2005: 940-944.
- [18] DISSNER A, FINKELM, GRUND A, et al. Dielectric properties of N₂/SF₆ mixtures for use in GIS or GIL[C]. IET, 1999.
- [19] KOCH H, HILLERS T. Second generation gas-insulated line [J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(3): 111-116.
- [20] 张潮海, 韩冬, 李康, 等. SF₆替代气体技术及其在 GIL 中的应用与发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 689-698.
ZHANG Chaohai, HAN Dong, LI Kang, et al. SF₆ alternative techniques and their applications and prospective developments in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 689-698.
- [21] 朱娟, 沈梦甜, 余霞, 等. SF₆/N₂混合气体的工频击穿特性研究[J]. 湖南电力, 2019, 39(6): 20-22, 28.
ZHU Juan, SHEN Mengtian, YU Houxia, et al. Study on power-frequency breakdown characteristics of SF₆/N₂ mixed gas[J]. Hunan Electric Power, 2019, 39(6): 20-22, 28.
- [22] 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—1996[S]. 1996.
Rules of preventive tests for electric power equipment: DL/T 596—1996[S]. 1996.
- [23] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB 50150—2006[S]. 2006.
Standard for hand-over test of electric equipment electric equipment installation engineering: GB 50150—2006[S]. 2006.

作者简介:



周倩

周倩(1981),女,博士,高级工程师,从事电气绝缘、在线监测、电网规划、能源管理、公司规划等方面的研究工作(E-mail: 1029360275@qq.com);

柯锟(1995),男,硕士在读,研究方向为电气设备在线检测与故障诊断;

张晓星(1972),男,博士,教授,研究方向为气体绝缘设备在线监测与故障诊断、SF₆替代气体、SF₆降解技术、新型纳米传感器、新型固体绝缘材料等。

Air supply strategy of equipment based on SF₆ mixed gas insulation performance

ZHOU Qian^{1,2}, KE Kun¹, ZHANG Xiaoxing¹, TIAN Shuangshuang¹, HU Juntai³, WANG Bo³

(1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China; 3. State Grid Henan Power Company Pingdingshan Power Supply Company, Pingdingshan 467001, China)

Abstract: With the growth of power demand and the increase of environmental protection requirements, the use of SF₆ gas is gradually limited. SF₆ mixed gas reduces the amount of SF₆ gas to a certain extent and has been used in electrical equipment. The insulation change caused by SF₆ mixed gas leakage in 220 kV gas insulated switchgears (GIS) is studied. By changing a small amount of pressure and mixing ratio, the insulation performance change of the mixed gas is explored, and the influence law of pressure and mixing ratio factors on the breakdown voltage of power frequency is analyzed. The insulation strength curves of mixed gases in different proportions at each pressure are obtained, so as to obtain the air supplement strategy to ensure the safe and stable operation of the equipment. It is found that the breakdown voltage of mixed gas changes with the increase of pressure and mixing ratio, and the nonlinear degree increases, and the boundary values of mixing ratio and pressure for safe operation of equipment are obtained. The study can provide operation and maintenance procedures and technical standards for SF₆/N₂ mixed gas insulation equipment. At the same time, it lays the foundation for the development of mixed gas detection technical standards.

Keywords: gas insulated switchgears (GIS) operation and maintenance technology; SF₆/N₂ mixed gas; reackdown voltage; alternative gas; gas supplement strategy

(编辑 钱悦)

(上接第 135 页)

Technology of hybrid back-to-back soft open point

XU Tao¹, GE Xuefeng², DOU Jingming³, SHI Mingming², ZHANG Chenyu², MIAO Huiyu²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The soft open point (SOP) using the back to back power converter can flexibly, fast and accurately regulate the power flow among the adjacent feeders by implementing the multi-targets control including nodes voltages and network losses and also has the capability to isolate the fault and recover the power supply. However, the range of power restoration is strictly limited by the SOP capacity. A hybrid soft open point system with a partial scale back to back converter and a load switch parallel connected is proposed. The power flow and voltage distribution could be regulated by the back to back converter as usual. And the load switch could realize power recovery for all the customer interruption under the fault condition. Moreover, the back to back converter can flexibly regulate the power flow through the load switch and help realize the zero current turning off of the load switch, which can effectively extend the working life of the load switch and reduce the equipment cost. Furthermore, the performance of the proposed hybrid SOP is verified by the simulation results.

Keywords: hybrid soft open point; fault isolation; power recovery; parallel load switch; zero current turning-off operation

(编辑 陆海霞)