

文章编号 : 0253 - 987X(2001)04-0338-05

SF₆/ N₂ 混合气体的放电特性

陈庆国, 肖登明, 邱毓昌

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了探讨 SF₆/ N₂ 混合气体代替纯 SF₆ 气体作为气体绝缘开关装置 (GIS) 绝缘介质的可行性, 阐述了 SF₆/ N₂ 混合气体放电的基本参数, 给出了 Wieland 插值的适用条件, 并对 SF₆/ N₂ 混合气体在不同混合比、电压波形及气压下的放电特性进行了试验研究. 研究表明: SF₆/ N₂ 的电晕稳化作用比纯 SF₆ 中的要强, 当气压较高时, 混合气体在高频率快速暂态过电压作用下的击穿电压比低频率作用下的要低, 而且均匀场中混合气体的击穿电压与气压基本呈线性关系. 所以, 在不改变现有 GIS 结构及尺寸的情况下, 可增加混合气体的压强来保证 GIS 的绝缘强度.

关键词: SF₆/ N₂; 相对耐电强度; 击穿; GIS

中图分类号: TM213 **文献标识码:** A

Discharge Characteristics of SF₆/ N₂ Gas Mixtures

Chen Qingguo, Xiao Dengming, Qiu Yuchang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: To study the feasibility of the SF₆/ N₂ gas mixture as the insulating dielectric in GIS to replace SF₆ gas, the discharge parameters are discussed, and the condition for the Wieland approximation to be applicable is provided. The discharge characteristics of SF₆/ N₂ for different mixture ratios with different gas pressures under different applied voltage waveforms are studied. The results show that the corona stabilization in SF₆/ N₂ mixtures is higher than that in SF₆, and the breakdown voltage under higher frequency VFTO are lower than that under lower frequency. The results also show the nearly linear relationship between the breakdown voltage and gas mixture pressure, so an increase of SF₆/ N₂ pressure without changing the GIS dimension and structure can ensure its insulation strength.

Key words: SF₆/ N₂; relative dielectric strength; breakdown; GIS

将 SF₆ 混合气体作为绝缘介质的研究早在 70 年代起就开始了. 当时考虑用混合气体代替纯 SF₆ 气体的主要原因为: 混合气体对电场不均匀性不像纯 SF₆ 气体那样敏感^[1]; 可以解决高寒地区 SF₆ 的液化问题; 可以降低气体绝缘设备的成本.

但是, 由于在均匀场中的 SF₆ 混合气体的耐电强度没有相同气压下的纯 SF₆ 气体高, 所以在一般场合仍然用纯 SF₆ 作为气体绝缘介质.

本世纪 90 年代以来, SF₆ 气体的温室效应引起了各国环保专家的重视. 尽管气体绝缘开关装置

收稿日期: 2000-09-18. 作者简介: 陈庆国(1970~), 男, 博士生; 邱毓昌(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 高等学校重点实验室访问学者基金资助项目.

(GIS)的年气体泄漏率小于 1%,但由于 SF₆ 化学稳定性高,在大气中的寿命长达 3 200 a,因此 1997 年的京都会议将 SF₆ 列为全球 6 种温室气体之一。为此,国外一些电力公司与制造商开展了混合气体的研究,以期利用低含量 SF₆ 混合气体 (SF₆ < 30 %)来代替纯 SF₆ 气体。目前来看,比较有应用前景的是 SF₆/N₂ 混合气体^[2]。以往的研究结果表明,上述混合气体在放电时并没有新的毒性物生成,且对电极表面缺陷的敏感程度小^[3],因而极具良好的应用前景。

本文主要从理论分析与实验研究两方面,对 SF₆ 混合气体的绝缘特性进行了研究,并探讨了在不改变现有 GIS 结构及尺寸的基础上,用混合气体代替纯 SF₆ 气体的可能性。

1 混合气体放电参数的描述

气体放电参数主要有^[4]电子碰撞电离截面 Q_i、电子附着截面 Q_a、电子碰撞电离系数、电子附着系数及临界场强 (E/N)。参数、Q_i及 Q_a是电子速度或电子能量的函数,可写成如下关系式

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{W_0} Q_i f(v) dv = \frac{(2/m_e)^{1/2}}{W} Q_i \int_0^d f(v) dv \quad (1)$$

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{W_0} Q_a f(v) dv = \frac{(2/m_e)^{1/2}}{W} Q_a \int_0^d f(v) dv \quad (2)$$

式中:m_e为电子质量;f(v)、f(v)分别为电子速度分布函数和电子能量分布函数;W为气体中的电子平均漂移速度。

对 SF₆ 及其混合气体,当其有效电离系数 () 在接近自持放电条件时,可用下式表示

$$\frac{1}{N} = C \left[\frac{E}{N} - \left(\frac{E}{N} \right)_0 \right] \quad (3)$$

式中:(E/N)₀ 为当 = 时的 E/N 值。对混合气体, Wieland 提出了一种近似插值算式^[4]

$$M = \frac{(SF_6)_A + (1 - (SF_6))_B}{B + (SF_6)(A - B)} \quad (4)$$

$$M = \frac{(SF_6)_A + (1 - (SF_6))_B}{B + (SF_6)(A - B)} \quad (5)$$

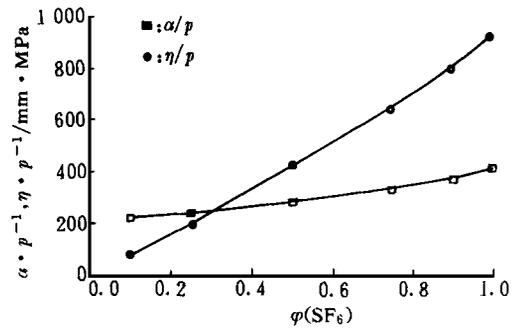
式中:A、B、M分别表示气体 A、B 及混合气体 M 的电子碰撞电离系数;A、B、M分别表示上述气体的电子附着系数。

将式(4)、式(5)代入式(3),可得混合气体的耐

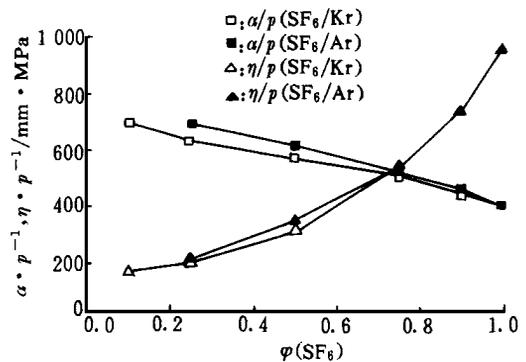
电强度表达式为

$$\left(\frac{E}{N} \right)_{OM} = \frac{(SF_6) C_A}{(SF_6) C_A + (1 - (SF_6)) C_B} \left(\frac{E}{N} \right)_{OA} + \frac{(1 - (SF_6)) C_B}{(SF_6) C_A + (1 - (SF_6)) C_B} \left(\frac{E}{N} \right)_{OB} \quad (6)$$

式(4)和式(5)的应用条件为 A、B 两种气体的电子能量分布相同。当构成混合气体各组分的电子能量分布不同时,上述的插值算式不再适用。为验证这一结论,本文分别对 SF₆/N₂ (SF₆ 与 N₂ 的电子能量分布相同^[5])、SF₆/Ar、SF₆/Kr (SF₆ 与 Ar 和 Kr 的电子能量分布不同^[5]) 混合气体的和进行了测量^[6,7],其结果如图 1 所示 (E/p = 67.7 V · (m · Pa)⁻¹)。由图 1a 可看出,在电离室中测得的 SF₆/N₂ 混合气体的 α/p 和 η/p 随 SF₆ 含量的变化非常接近直线函数。图 1b 中 α/p 和 η/p 随 SF₆ 含量的变化呈非线性函数。这一结果验证了本文所给出 Wieland 插值应用条件。



(a) SF₆/N₂



(b) SF₆/Kr 和 SF₆/Ar

图 1 混合气体的 α/p、η/p 与 (SF₆) 的关系

2 SF₆ 含量对 SF₆/N₂ 耐电强度的影响

在均匀或稍不均匀场中, SF₆/N₂ 的击穿强度与

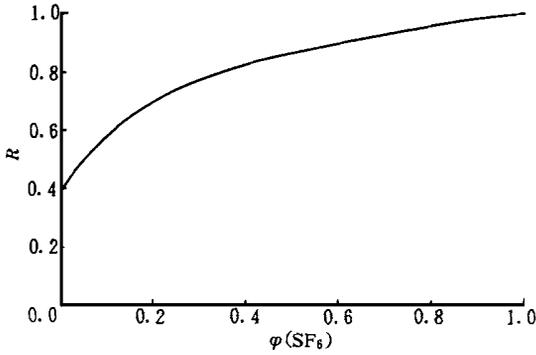


图 2 SF₆ 混合气体的相对耐电强度

(SF₆) 的关系如图 2 所示. 可看出该混合气体的相对耐电强度 R 随 (SF_6) 的增加而迅速提高, 然后渐趋饱和, 这与利用式 (4)、式 (5) 所得的理论计算结果相符. 根据图 2 所示的实验结果, 可得出 SF₆/N₂ 的相对耐电强度 R 与 (SF_6) 的关系为^[3]

$$R_{SF_6/N_2} = (SF_6)^{0.18} \quad ((SF_6) > 0.1) \quad (7)$$

在 SF₆ 耐电强度已知的情况下, 可利用式 (7) 对 SF₆/N₂ 混合气体的耐电强度进行较有效的估计.

3 不同电场分布下 SF₆/N₂ 的击穿强度

3.1 均匀或稍不均匀场下的实验结果

在均匀或稍不均匀场中, SF₆ 及其混合气体的耐电强度在一定气压范围内基本上随气压的升高而线性上升. 图 3 示出了 SF₆ 和 SF₆/N₂ ($(SF_6) = 1\%$) 混合气体在直流电压作用下的击穿电压 V_b 随气压 P 的变化曲线.

3.2 极不均匀场下的实验结果

虽然 GIS 在设计时采用均匀或稍不均匀场结构, 但在运行中, 难免会由于导电微粒等原因而导致电场集中. 图 4 给出了极不均匀场作用下 SF₆ 及 SF₆/N₂ 混合气体在直流 (DC) 和雷电冲击电压 (LI) 作用下, 击穿电压随气压变化的实验结果.

由图 4 可看出, 当压强 $P = 0.22$ MPa 时 (气体绝缘变压器的工作气压), 极不均匀场中 SF₆/N₂ 混合气体 (体积比为 0.8/0.2) 在直流电压作用下的击穿电压比纯 SF₆ 气体高 43%, 在冲击电压作用下高出 25%. 出现此现象的原因为电晕稳化作用加强的结果. 这也再次证明, 向 SF₆ 气体中加入 N₂ 可降低 SF₆ 对电场不均匀性的敏感程度.

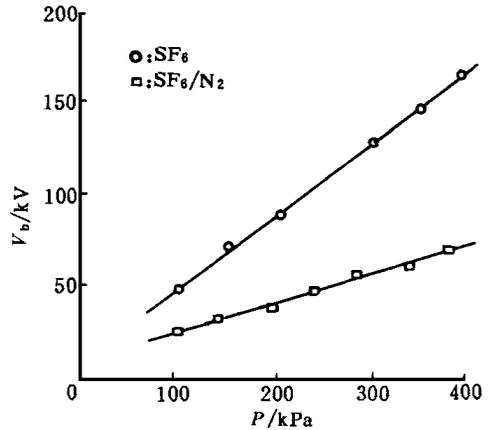


图 3 均匀或稍不均匀场中 SF₆/N₂ 混合气体的击穿特性

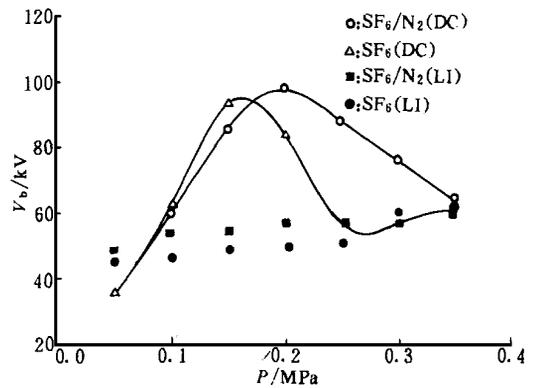


图 4 极不均匀场中 SF₆ 及 SF₆/N₂ 混合气体的击穿特性

4 不同电压波形下 SF₆/N₂ 的放电特性

4.1 雷电冲击下的放电特性

当压强 $P = 0.1$ MPa 时, 稍不均匀场中 SF₆/N₂ 混合气体在负极性雷电冲击作用下的放电特性如图 5 所示.

由图 5 可看出, LI 作用下, 的击穿电压随 (SF_6) 的增加而增加, 最终趋于饱和. 实验还表明, 在直流及工频电压作用下, SF₆/N₂ 的击穿电压随 (SF_6) 的变化趋势与图 5 所示雷电冲击下的基本相同.

4.2 快速振荡冲击下的放电特性

GIS 中的开关操作会在 GIS 中产生波头极陡并伴有高频振荡的快速暂态过电压 (VFTO), 因而实

际运行中这种快速暂态过电压是不可避免的,为此有必要对 SF₆/N₂ 混合气体在 VF_{TO} 作用下的放电特性进行研究^[8]. 图 6 给出了在极不均匀场中 VF_{TO} 作用下的混合气体在不同 (SF₆) 时的放电特性.

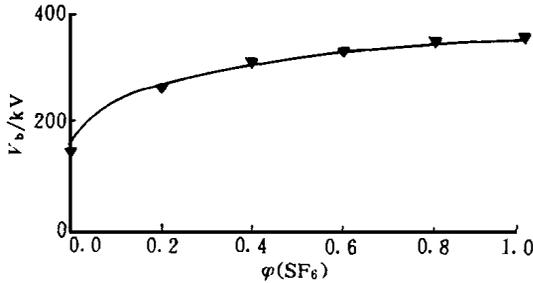


图5 负极性雷电冲击作用下 SF₆/N₂ 混合气体的放电特性

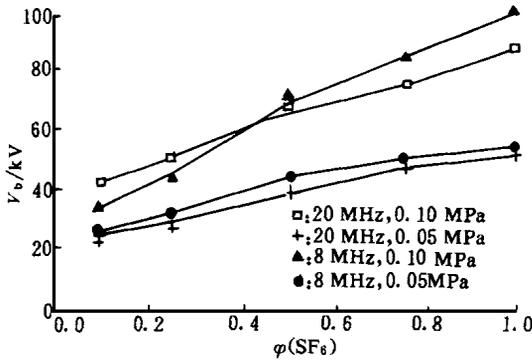


图6 快速振荡冲击作用下 SF₆/N₂ 混合气体的放电特性

由图 6 可看出, VF_{TO} 作用下混合气体的击穿电压随 (SF₆) 的增加而升高, 当 (SF₆) 超过一定值时, 较高频率 VF_{TO} 下的击穿电压比较低频率 VF_{TO} 下的要低, 而实际中 VF_{TO} 的频率很高, 由此可得出, 在具有相同稳态击穿电压下, 混合气体在 VF_{TO} 作用下的绝缘特性并不比纯 SF₆ 的差.

5 气压对 SF₆/N₂ 放电特性的影响

在工频、直流及雷电冲击电压作用下, 在均匀场或稍不均匀场中, SF₆/N₂ 混合气体的耐电强度在一定范围内基本上与气压呈线性关系. 但是, 在极不均匀场中, 直流及工频电压作用下的 SF₆/N₂ 混合气体也会像纯 SF₆ 气体一样出现驼峰(如图 4 所示),

而在冲击及快速暂态电压作用下, 混合气体的击穿电压与气压基本上呈现线性关系(如图 4 及图 7 所示).

由于 GIS 在设计时常采用均匀场或稍不均匀场结构, 所以用 SF₆/N₂ 作为绝缘介质代替纯 SF₆ 气体时, 击穿电压与气压可认为呈线性关系. 由此, 再根据式(7)可估算出在不改变现有 GIS 绝缘结构及尺寸的情况下, 用一定混合比的 SF₆/N₂ 代替纯 SF₆ 所应采用的气压值. 如采用体积比为 30/70 的 SF₆/N₂ 时, 需将 GIS 的充气压力从 0.4 MPa 提高到 0.5 MPa.

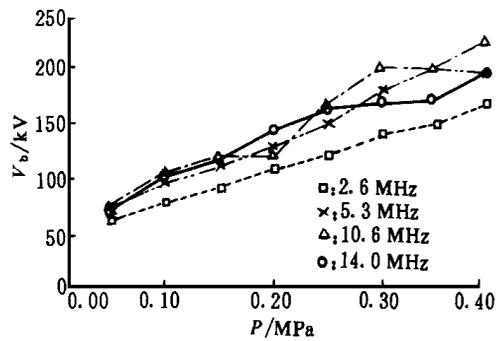


图7 快速暂态电压下 SF₆/N₂ 混合气体的击穿电压与气压的关系

6 结论

本文从理论和实验两方面对 SF₆/N₂ 混合气体的绝缘特性进行了探讨和研究, 研究结果表明:

- (1) 在均匀场中, 只有混合气体各自组分的电子能量分布相同, 才能用 Wieland 插值计算其电子碰撞电离系数及电子附着系数;
- (2) 在极不均匀场下, 混合气体中的电晕稳化作用比纯 SF₆ 气体中的要强;
- (3) 在气压较高时, 混合气体在较高频率 VF_{TO} 作用下的击穿电压比较低频率 VF_{TO} 作用下的要低, 且频率越高击穿电压降低得越多;
- (4) 均匀场中混合气体的击穿电压与气体的压强基本呈线性关系, 所以在不改变现有 GIS 结构及尺寸的情况下, 可增加混合气体的压强来保证 GIS 的绝缘强度.

参考文献:

[1] Qiu Y, Chalmers I D. Effect of electrode surface roughness on breakdown in SF₆-N₂ and SF₆-CO₂ gas mixtures [J]. J Phys D: Appl Phys, 1993, 26(11): 1 928 ~ 1 932.

- [2] Qiu Y, Kuffel E. Comparison of SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ gas mixtures as alternatives to SF₆ gas [J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 892 ~ 895.
- [3] 邱毓昌,冯允平,张鸣超. SF₆/N₂ 混合气体绝缘介质的研究[J]. 西安交通大学学报, 1993, 27(1): 1 ~ 6.
- [4] 邱毓昌. 用插值法计算混合气体放电参数的适用条件及判据[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(4): 48 ~ 54.
- [5] 刘子瑞,邱毓昌,李彦明. 一种计算汤逊放电参数的 Boltzmann 方程分析方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 52 ~ 56.
- [6] Qiu Y, Xiao D M. Ionization and attachment coefficients measured in SF₆/Ar and SF₆/Kr gas mixtures[J]. J Phys D: Appl Phys, 1994, 27(12): 2 663 ~ 2 665.
- [7] 肖登明,李彦明,邱毓昌. 汤逊脉冲法测量 SF₆/N₂ 的预放电参数[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(2): 7 ~ 13.
- [8] Pfeiffer W, Zimmer V, Zipl P. Insulating characteristics of SF₆ and SF₆/N₂ mixtures for very fast transient voltage (VFT) [A]. IEEE Int Symp Elec Insul [C]. Toronto, 1990. 240 ~ 243.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 337 页)

表 2 遗传神经网络的识别结果对比

样本	(C ₂ H ₂) × 10 ⁶				(CO) × 10 ⁶			
	网络 1 [#]		网络 2 [#]		网络 1 [#]		网络 3 [#]	
	计算值	期望值	计算值	期望值	计算值	期望值	计算值	期望值
1	8.86	9.0	9.00	9.0	455.37	450.0	449.35	450.0
2	9.61	10.0	9.99	10.0	493.20	500.0	500.50	500.0
3	8.96	9.0	8.99	9.0	444.16	450.0	449.71	450.0
4	9.13	10.0	10.00	10.0	496.67	500.0	500.35	500.0
5	9.97	9.0	8.99	9.0	461.61	450.0	450.13	450.0
6	9.70	10.0	10.00	10.0	488.09	500.0	500.42	500.0
7	10.56	11.0	10.96	11.0	514.73	550.0	545.78	550.0

网络 2[#] 测试结果的最大误差发生在 7 号样本处, (CO) 的最大误差为 0.04×10^{-6} (相应的期望输出为 11.0×10^{-6}), 最大相对误差为 0.3%, 与网络 1[#] 的测试结果相比, 误差减小了 2 个数量级. 表 2 中, 在正常范围内, 网络 3[#] 是通过识别 (CO) 临界值 550.0×10^{-6} 附近的学习样本库而获得的, 其测试结果显示, 7 号测试样本的最大误差为 4.2×10^{-6} , 最大相对误差为 0.8%, 与网络 1[#] 的测试结果相比, 误差减小了 1 个数量级. 上述结果表明, 当处于临界值附近时, 调用经专用学习样本集训练好的网络进行识别, 就可以大大提高网络对该种气体临界值的识别准确度.

4 结 论

(1) 基于遗传算法的神经网络技术, 是利用遗传算法来优化神经网络的权系数, 提高神经网络的性

能, 很好地解决了单个传感器对混合气体发生交叉敏感的问题, 可以准确识别混合气体中的各组分.

(2) 采用多重网络识别法, 不仅可以对分布范围较广的被测对象进行识别, 而且可以准确地识别出各种故障特征气体的临界值, 从而提高了该技术的实用性.

参考文献:

- [1] 李孝安, 张晓绩. 神经网络与神经计算机导论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- [2] Goldberg D. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning [M]. Massachusetts: Addison Wesley Pub, 1989.
- [3] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [4] 吴浩扬. 基于遗传算法的电子鼻数据融合研究 [D]. 西安: 西安交通大学电子与信息工程学院, 1999.

(编辑 杜秀杰)