

空气绝缘电气设备气体放电分解产物检测研究

姜飞宇,张荣嵘,王淑颖,高松涛

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

摘要:讨论了分光光度法检测空气中NO、NO₂和O₃的可行性,制作了标准工作曲线;在实际应用试验中,利用臭氧发生器和NO、NO₂标准气体配制了多浓度气体,并对其进行检测,误差在可接受范围内;进一步利用介电强度测定仪模拟间隙放电试验,在20 kV、30 kV放电条件下得到多组准确定量结果。通过分析发现:随着电压升高,放电能量上升,O₃含量也随之上升,而NO_x中NO的浓度上升较大,NO₂浓度变化不大,符合理论推算结果;空气放电产生的NO、NO₂和O₃能够在空气中稳定存在一定时间,具备对空气绝缘放电分解产物进行定量分析的条件。上述方法现场采集便捷,可以用于空气绝缘GIS、电流互感器、10 kV开关柜等电气设备现场诊断试验。

关键词:分光光度法;氮氧化物;臭氧;空气绝缘;气体放电分解产物

中图分类号:TM 855 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2024)06-0012-05

0 引言

前些年,SF₆因其卓越的绝缘和灭弧特性在高压领域中,尤其是GIS和AIS等高压开关产品中被广泛采用^[1]。但随着碳减排及控制温室气体效应的法规被实施,环保型电力设备逐渐在电力系统中推广^[2]。空气因其低全球变暖潜能(GWP)、低臭氧破坏潜力(ODP)、低毒或无毒性、不燃性、高绝缘和灭弧能力,以及优良的散热性,被国际上广泛认可^[3]。尽管在相同气压下,空气的绝缘性能仍低于SF₆气体^[4]。部分电气设备制造商已开始采用洁净空气(79.5%氮气+20.5%氧气)作为新一代GIS高压开关产品的绝缘介质,取代SF₆气体。

空气作为一种自然的绝缘介质,被广泛应用于电力设备中,如开关柜和变压器,以维持设备的绝缘性能^[5-6]。在电力设备长期运行的过程中,由于绝缘缺陷,经常会出现局部放电和局部过热的问题,这些问题会导致绝缘气体分解^[7-8]。研究发现,当电力设备出现放电故障时,空气中的绝缘介质将分解产生具有特征性的产物,这些分解产物的类型和含量能够指示放电故障的严重性。在故障状态下,设备内部的空气与微量水分、氧气及固体绝缘物质反应,生成包括臭氧(O₃)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)在内的多种

气态衍生物。因此,检测这些气体分解产物对于确保电力系统的安全稳定运行至关重要^[9]。

确定空气中臭氧(O₃)含量的技术包括化学和物理方法。碘量法是一种典型的化学分析方法,但当O₃浓度低于1 g/m³时,其测量误差较大,难以满足监测空气绝缘放电分解产物的检出限要求;物理检测方法如紫外吸收光谱法和紫外差分光谱法等,具有低至ppb级的最小检测浓度、体积小、能够进行连续监测等优点,但设备成本较高^[10-11]。在电气设备的放电检测领域,紫外吸收光谱技术被用来测定O₃含量,以此评估内部是否发生局部放电,但其实际效果尚不明确^[12];靛蓝二磺酸分光光度法是一种物理化学方法,已在环境空气中的O₃检测上得到广泛应用,当样品体积为30 L时,其检出限能达到0.010 mg/m³^[13]。

测量空气中NO和NO₂的浓度的方法包括气相色谱法、化学发光法和物理化学检测方法。气相色谱法在检测NO_x时的灵敏度较低,其检出限通常超过几个mg/m³;相比之下,化学发光法依赖于NO_x的光化学性质,不仅反应速度快,而且具有高灵敏度(最小检测浓度可低于0.1 mg/m³)和良好的选择性,常用于NO_x的自动监测。然而,该方法受到气体中水分含量的影响;物理化学检测方法中,盐酸萘乙二胺分光光度法在最小检测浓度方面表现出色,可达到0.003 mg/m³^[14],

收稿日期:2024-07-26

作者简介:姜飞宇(1980),男,大学本科,高级工程师,研究方向为电气设备绝缘检测。

特别适用于电气设备中空气绝缘放电过程中 NO_x 分解产物的高灵敏度检测^[15]。

1 原理

用盐酸萘乙二胺分光光度法检测空气中 NO_x 的过程涉及两个步骤。首先,空气中的 NO_2 在串联的第一个吸收瓶中,被盐酸萘乙二胺吸收液吸收并反应,形成粉红色偶氮染料,此时,空气中的 NO 不直接与吸收液反应,而是通过一个氧化管,在其中被酸性高锰酸钾溶液氧化成 NO_2 ,再在第二个吸收瓶中被相同的吸收液吸收,并转化为粉红色的偶氮染料。这种偶氮染料在540 nm波长处的吸光度与 NO_2 含量成正比。通过分别测定两个吸收瓶中的吸光度,可以计算出各自的 NO_2 和 NO 的质量浓度,两者相加得到的总量即为 NO_x 的质量浓度(以 NO_2 计算)^[15]。主要自然气体与 SF_6 的绝缘性能的比较如表1所示。

表1 主要自然气体和 SF_6 的绝缘性能比较

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

用靛蓝二磺酸钠分光光度法测定空气中的臭氧(O_3)浓度。其原理基于在磷酸盐缓冲溶液的作用下,空气中的 O_3 与吸收液中的靛蓝二磺酸钠发生等摩尔反应,使得溶液颜色从蓝色转变为无色,并形成靛红二磺酸钠。通过在610 nm波长处测量吸光度,依据蓝色消退的程度,来定量分析空气中 O_3 的含量。

2 空气绝缘气体中氮氧化物检测

2.1 仪器设备

仪器设备有可见光分光光度计(1 cm比色皿,可检测540 nm处吸光度)、气体采样器(流量在0.1-1.0 L/min)、吸收瓶(可装10 mL吸收液的多孔玻板吸收瓶)和氧化瓶(可装50 mL酸性高锰酸钾溶液的洗气瓶)。

2.2 溶液配制

1) 配制硫酸溶液 $C(1/2\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ mol/L}$ 。取15 mL浓硫酸($\rho=1.84 \text{ g/mL}$),缓缓加到500 mL水中,搅拌均匀,冷却备用。

2) 配制浓度为25 g/L的酸性高锰酸钾溶液。将25 g高锰酸钾溶于500 mL水中,后转移至1 000 mL容量瓶中,加入约500 mL硫酸溶液定容后,转移至棕色试剂瓶备用。

3) 配制浓度为1.00 g/L的N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐溶液作为显色液。将0.5 g的N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐溶于水中定容至500 mL,转移至棕色试剂瓶,密封冷藏保存。

4) 亚硝酸盐标准溶液。标样所,批号为103414,浓度为100 mg/L。

2.3 标准工作曲线

准确移取亚硝酸盐标准液2.5 mL于100 mL容量瓶中,并用纯水定容至刻度线,配制成2.5 $\mu\text{g/mL}$ 的亚硝酸钠标准液。使用10 mL具塞比色管,按表2所示,依次加入2.5 $\mu\text{g/mL}$ 亚硝酸钠标准液、纯水、1.00 g/L显色液,配制质量浓度(NO_2^-)为0 $\mu\text{g/mL}$,0.10 $\mu\text{g/mL}$,0.20 $\mu\text{g/mL}$,0.30 $\mu\text{g/mL}$,0.40 $\mu\text{g/mL}$,0.50 $\mu\text{g/mL}$ 的标准工作液6支。

表2 NO_2^- 标准工作液吸光度

编号	0	1	2	3	4	5
NO_2^- 标准液/mL	0.00	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00
水/mL	2.00	1.60	1.20	0.80	0.40	0.00
显色液/mL	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
NO_2^- 工作液浓度/ $(\mu\text{g/mL})$	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
吸光度/A	0.009	0.105	0.202	0.294	0.397	0.489
吸光度/(A-A ₀)	0	0.096	0.193	0.285	0.388	0.480

将工作液于暗处放置20 min以上,用10 mm比色皿在波长540 nm处,以水为参比测量吸光度,得到 NO_2^- 工作液浓度($\mu\text{g/mL}$)对应的吸光度A,扣除0号管的吸光度后得到去空白吸光度 A_0 ,用最小二乘法计算标准曲线的回归方程, $y=0.9616x$, $R^2=0.9998$,x为工作液浓度,y为去空白吸光度 $A-A_0$,如图1所示。

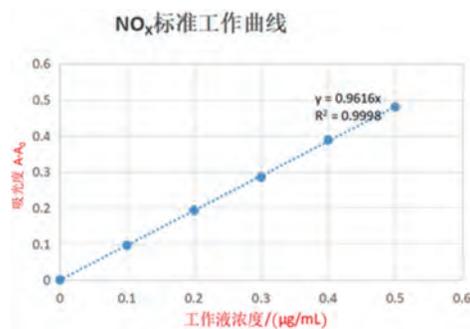


图1 NO_2^- 标准工作曲线图

2.4 样品采集方法

2.4.1 吸收液配制

将80 mL显色液加入100 mL棕色容量瓶,并用

纯水定容至刻度线。使用时,取 10 mL 吸收液至吸收瓶。

2.4.2 采集装置

如图 2 所示,将一支装有 20 mL 酸性高锰酸钾溶液的氧化瓶串联在两支装有 10 mL 吸收液的多孔玻板吸收瓶之间,将一支吸收瓶的出气口连接至硅胶干燥瓶,再连接至气体采样器,依据试验需要,设置采集流量和采集时间。

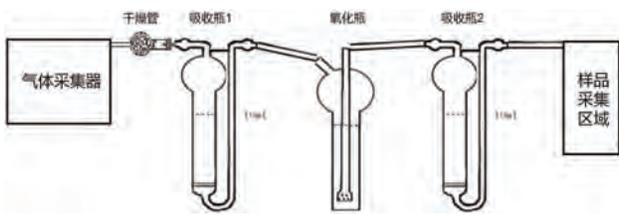


图 2 NO_x 样品采集示意图

2.5 样品检测

2.5.1 质控样检测

取实验室内未经采样的空白吸收液,用 10 mm 比色皿,在波长 540 nm 处,以水为参比测定吸光度。在显色规定条件下,实验室空白吸光度 A₀ 波动范围不超过 ±15%;取 2.00 mL NO_x 质控样(水剂),加入 8.00 mL 显色液,于暗处放置 20 min 以上,用 10 mm 比色皿在波长 540 nm 处,以水为参比测量吸光度,共进行 4 次平行试验;减去空白吸光度,代入标准曲线进行计算,得到质控样 4 次平行试验实际浓度,计算其平均值,结果如表 3 所示,质控编号为 206154,实际浓度值 0.378±0.024 (0.354-0.402) mg/L,所测 4 次平行试验值及平均值在实际浓度范围内。

表 3 质控样浓度检测

样品	吸光度 A	去空白吸光度 A-A ₀	曲线计算值	实际浓度/(mg/L)
空白样	0.009	\	\	\
质控样第 1 次	0.085	0.076	0.079	0.40
质控样第 2 次	0.086	0.077	0.080	0.40
质控样第 3 次	0.081	0.072	0.075	0.37
质控样第 4 次	0.085	0.076	0.079	0.40
质控样平均值	\	\	\	0.39

2.5.2 标准气体检测

大连大特标气的 NO 浓度为 39.86 μL/L, NO₂ 浓度为 39.84 μL/L,将标准气体以不同的流速与空气混合,然后通过图 2 所示的采集装置,以 0.1 L/min 的流速采样 1 min。采样完成后,将吸收液转移至 10 mL 比色管,用水补充至标线,混匀后放置 20 min 以上。用 10 mm 比色皿在波长 540 nm 处,以水为参比测量吸光度,结果如表 4 所示,相对偏差均在 5% 以内。

表 4 标准气体浓度检测

样品	流速/(L/min)	采集时间/min	采集体积/L	配气浓度/(μL/L)	吸光度 A	检测浓度/(μL/L)	相对偏差%
NO	0.02	1	0.1	7.97	0.145	7.83	-1.76
NO ₂	0.02	1	0.1	7.97	0.099	7.61	-4.52
NO	0.04	1	0.1	15.94	0.204	16.5	3.51
NO ₂	0.04	1	0.1	15.94	0.298	16.63	4.33
NO	0.06	1	0.1	23.91	0.443	24.97	4.43
NO ₂	0.06	1	0.1	23.91	0.297	24.37	1.92

3 空气绝缘气体中臭氧检测

3.1 仪器设备

仪器设备有可见分光光度计(2 cm 比色皿,可检测 610 nm 处吸光度)、气体采样器(流量在 0.1-1.0 L/min)、吸收瓶(可装 10 mL 吸收液的多孔玻板吸收瓶)、恒温水浴锅和水银温度计。

3.2 试剂配制

1) 配制溴酸钾标准溶液 C(1/6 KBrO₃)=0.10 mol/L。量取 1.391 8 g 溴酸钾,置于烧杯中,加入少量水溶解,移入 500 mL 容量瓶中,并用水定容至刻度线。

2) 配制溴酸钾-溴化钾标准溶液 C(1/6 KBrO₃)=0.010 mol/L。量取 20.0 mL 溴酸钾标准溶液于 100 mL 烧杯中,加入 1.0 g 溴化钾,溶解后转移至 200 mL 容量瓶,用水定容至刻度线。

3) 配制 C(KH₂PO₄-Na₂HPO₄)=0.05 mol/L 磷酸盐缓冲溶液。称取 6.8 g 磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、7.1 g 无水磷酸氢二钠(Na₂HPO₄),溶于水并稀释至 1 000 mL。

4) 制备 IDS 标准液的步骤为:称量 0.25 g 靛蓝二磺酸钠并溶解于水中,再转移到 500 mL 的棕色容量瓶中。加水至刻度线,并将其在室温下暗处放置 24 h 以完成标定。

3.3 标准曲线

首先,将标定过的 IDS 标准液以磷酸盐缓冲溶液稀释,制备出每毫升含 1.05 μg 臭氧的 IDS 标准工作溶液;准备六支 10 mL 的比色管,并根据表 5 的指导,制备不同浓度的标准溶液;使用 20 mm 的比色皿,并以纯水作为参比,在 610 nm 的波长下进行吸光度测量,测量结果记录如表 5 所示。

表 5 IDS 标准工作液吸光度

编号	0	1	2	3	4	5
IDS 标准溶液/mL	10.00	8.00	6.00	4.00	2.00	0.00
磷酸盐缓冲溶液/mL	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.0
臭氧质量浓度/(μg/mL)	0.00	0.21	0.42	0.63	0.84	0.105
吸光度 A	0.759	0.614	0.469	0.317	0.165	0.007
吸光度之差 A ₀ -A	0.000	0.145	0.290	0.442	0.594	0.752

以0号管的吸光度 A_0 分别与1至5号管吸光度 A 的差值差值为纵坐标,臭氧工作液浓度为横坐标,用最小二乘法计算校准曲线的回归方程 $y=0.7088x$, $R^2=0.9996$,如图3所示。

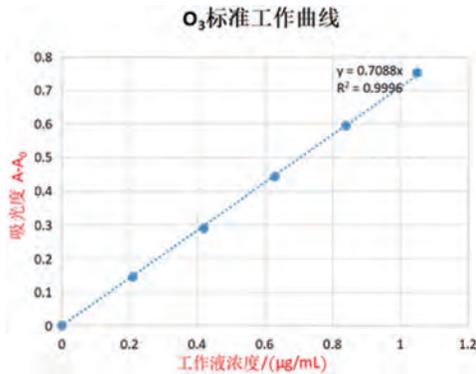


图3 O₃标准工作曲线图

3.4 样品采集方法

3.4.1 吸收液

依据待测的臭氧浓度,使用磷酸盐缓冲溶液对IDS标准液进行稀释,制得每毫升含有2.5 μg臭氧的IDS吸收液。

3.4.2 采集装置

如图4所示,取一支装有25.0 mL吸收液的吸收管,出气口连接至硅胶干燥瓶,再连接至气体采样器,依据试验需要,设置采集流量和采集时间。

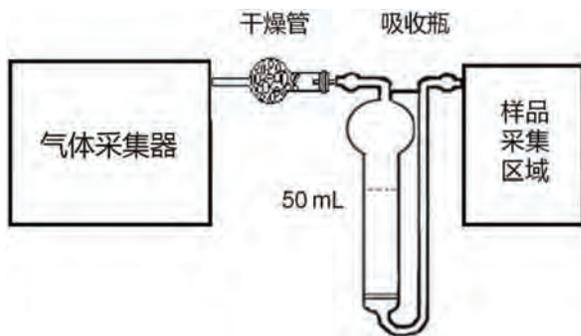


图4 O₃样品采集示意图

3.5 样品检测

用臭氧发生器和配气装置,制备已知浓度的臭氧后,将采样器接入配气装置,以0.5 L/min的速度采样10 min;之后,将吸收管中的25 mL样品溶液全部移入25 mL容量瓶。用20 mm比色皿,以水作参比,在波长610 nm处测量吸光度。

计算臭氧浓度:

$$\rho_1 = C_{\text{样}} \times V_1 / V_2 \quad (1)$$

$$\text{相对偏差} = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2 \times 100\% \quad (2)$$

从表6中可以看出,该臭氧的检测浓度与实际的配制浓度相对偏差在4%左右,说明该方法能够在实际工作中准确检测气体中臭氧的含量。

表6 样品臭氧浓度

样品编号	样品吸光度 A_0-A	样品浓度 /($\mu\text{g/mL}$)	臭氧检测浓度 /(mg/m^3)	臭氧配制浓度 /(mg/m^3)	相对偏差 /%
样品1	0.343	0.484	2.42	2.50	-3.2
平行1	0.336	0.474	2.37	2.50	-5.2
样品2	0.478	0.674	3.37	3.50	-3.7
平行2	0.486	0.686	3.43	3.50	-2.0

4 放电试验

4.1 仪器和装置

本次研究所用到试验仪器有GJZ-80B型介电强度测定仪、氮氧化物采集装置及检测仪器和臭氧采集装置及检测仪器。

4.2 球形电极空气间隙放电放电检测

4.2.1 未放电时环境空气中氮氧化物和臭氧含量

未放电时对环境空气中的氮氧化物和臭氧含量进行检测,排除环境对放电试验结果的影响,采集方法参照2.4和3.4节,检测步骤参照2.5和3.5节。

根据表7的试验数据,计算 NO_x 和 O_3 的浓度:

$$C_{\text{未放电}}(\text{NO}) = (A_2 - A_0) V \times V_m / (b \times V_0 \times K \times f \times M_{\text{NO}_2}) = 0.005 (\mu\text{L/L}) \quad (3)$$

$$C_{\text{未放电}}(\text{NO}_2) = (A_1 - A_0) V \times V_m / (b \times V_0 \times f \times M_{\text{NO}_2}) = 0.008 (\mu\text{L/L}) \quad (4)$$

$$C_{\text{未放电}}(\text{O}_3) = (A_0 - A_1) V / b \times V_0 = 0.016 (\mu\text{L/L}) \quad (5)$$

表7 未放电下周围环境中 NO_x 及 O_3 浓度

样品	采样流速 /(L/min)	采样时间 /min	采样体积 /L	吸光度	吸光度 差值	气体浓度 /($\mu\text{L/L}$)
NO_x (空白)	\	\	\	0.009	\	\
NO(未放电)	0.5	10	5	0.012	0.003	0.005
NO_2 (未放电)	0.5	10	5	0.016	0.007	0.008
O_3 (空白)	\	\	\	0.871	\	\
O_3 (未放电)	0.5	10	5	0.866	0.005	0.016

4.2.2 空气间隙(12 mm)放电试验

将两个球形电极的间隙调整为12 mm,此时击穿电压为 20 ± 1 kV。升压放电20次,每次放电时间间隔30 s,空气间隙击穿后仪器自动降压至0。采集过程分为两种:一种是在20次放电过程中持续采集;另一种是先放电20次后再采集气体10 min,采样流速设置为0.5 L/min,采集时间设置为10 min,根据式(3)~(5)计算得到 NO_x 和 O_3 浓度(见表8)。

在间隙放电 NO_x、O₃ 含量计算中,应扣除环境空气中本身存在的 NO_x 和 O₃ 含量,用 C' 表示,实际的放电产物结果:

$$C'_{20kV \text{ 放电实际}}(\text{NO}) = C_{20kV \text{ 放电检测}}(\text{NO}) - C_{\text{未放电}}(\text{NO}) \quad (6)$$

$$C'_{20kV \text{ 放电实际}}(\text{NO}_2) = C_{20kV \text{ 放电检测}}(\text{NO}_2) - C_{\text{未放电}}(\text{NO}_2) \quad (7)$$

$$C'_{20kV \text{ 放电实际}}(\text{O}_3) = C_{20kV \text{ 放电检测}}(\text{O}_3) - C_{\text{未放电}}(\text{O}_3) \quad (8)$$

表 8 20 kV 放电 20 次 NO_x 和 O₃ 浓度

样品	采样流速 (L/min)	采样时 间/min	采样体 积/L	吸光度	吸光度 差值	检测浓 度/μL	实际浓度 (μL/L)
NO(20 kV 放电后)	0.5	10	5	0.017	0.008	0.008	0.003
NO ₂ (20 kV 放电后)	0.5	10	5	0.025	0.016	0.017	0.010
O ₃ (20 kV 放电后)	0.5	10	5	0.859	0.014	0.046	0.030
NO(20 kV 放电中)	0.5	10	5	0.016	0.007	0.007	0.002
NO ₂ (20 kV 放电中)	0.5	10	5	0.023	0.014	0.014	0.008
O ₃ (20 kV 放电中)	0.5	10	5	0.857	0.012	0.039	0.023

从试验结果可以看出,在 20 kV 电压、间隙 12 mm 的环境下,放电 20 次中检测 NO_x、O₃ 的浓度,与放电 20 次后检测结果相近。表明空气放电产生的 NO、NO₂ 和 O₃,能够在空气中稳定存在一定时间,具备对空气绝缘放电分解产物进行定量分析的条件。

4.2.3 空气间隙(18 mm)放电试验

将两个球形电极的间隙调整为 18 mm,击穿电压为 30±2 kV。升压放电 20 次,每次放电时间间隔分别为 30 s、45 s;空气间隙击穿后,仪器自动降压至 0。采集过程中,气体流速分别设置为 0.5 L/min 和 0.3 L/min,时间分别设置为 10 min 和 15 min。根据式(3)—(5)计算得到 NO_x 和 O₃ 浓度(见表 9)。

在间隙放电 NO_x、O₃ 含量计算中,应扣除环境空气中本身存在的 NO_x 和 O₃ 含量,用 C' 表示,实际的放电产物结果如下:

$$C'_{30kV \text{ 放电实际}}(\text{NO}) = C_{30kV \text{ 放电检测}}(\text{NO}) - C_{\text{未放电}}(\text{NO}) \quad (9)$$

$$C'_{30kV \text{ 放电实际}}(\text{NO}_2) = C_{30kV \text{ 放电检测}}(\text{NO}_2) - C_{\text{未放电}}(\text{NO}_2) \quad (10)$$

$$C'_{30kV \text{ 放电实际}}(\text{O}_3) = C_{30kV \text{ 放电检测}}(\text{O}_3) - C_{\text{未放电}}(\text{O}_3) \quad (11)$$

表 9 30 kV 放电 20 次 NO_x 和 O₃ 浓度

样品	采样流速 (L/min)	采样时 间/min	采样体 积/L	吸光度	吸光度 差值	检测浓 度/μL	实际浓度 (μL/L)
NO(30 kV 放电 1)	0.5	10	5	0.04	0.031	0.052	0.047
NO ₂ (30 kV 放电 1)	0.5	10	5	0.025	0.016	0.018	0.010
O ₃ (30 kV 放电 1)	0.5	10	5	0.834	0.037	0.121	0.105
NO(30 kV 放电 2)	0.3	15	4.5	0.036	0.027	0.051	0.046
NO ₂ (30 kV 放电 2)	0.3	15	4.5	0.022	0.013	0.017	0.009
O ₃ (30 kV 放电 2)	0.3	15	4.5	0.837	0.034	0.124	0.108

从试验结果可以看出,在 30 kV 电压、间隙 18 mm 的条件下,改变采样流速、采样时间和采样体积后,测得的氮氧化物浓度几乎相同,说明在一定范围内,改变气体采集条件不会对试验结果产生负面影响。

5 结语

1) 利用分光光度法对空气放电产生 NO、NO₂ 和 O₃ 进行检测,重复性、相对偏差符合试验需求;检出限可以达到 ppb 级,能够敏锐定量电气设备放电产生的分解产物;空气放电产生的气体分解产物能够在空气中稳定存在一定时间,具备对空气绝缘放电分解产物进行定量分析的条件,该方法采样便捷快速,可以用于空气绝缘 GIS、电流互感器、10 kV 开关柜等电气设备现场诊断试验。

2) 该次试验中,在 20 kV 电压下空气间隙放电,NO₂ 的浓度略高于 NO,随着电压调整至 30 kV,放电能量上升,NO 的浓度达到 NO₂ 的 5 倍,而 NO₂ 浓度与 20 kV 时相近,实验结果印证了上述推论。

参考文献:

- [1] 李德军,沈威,KUSCHEL M,等.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[J].高压电器,2019,55(2):21-30.
- [2] 鞠关权,李德军,刘志民,等.环保型高压开关设备洁净空气质量检测[J].高压电器,2023,59(9):184-192.
- [3] SEEGER M, SMEETS R, YAN J, et al. Recent development and interrupting performance with SF₆ alternative gases[R]. [S.l.]: Electra, 2017.
- [4] CIGRE WG D1.51. Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated system[R]. [S.l.]: CIGRE, 2018.
- [5] Chu Jifeng, Li Weijuan, Yang Xu, et al. Identification of gas mixtures via sensor array combining with neural networks[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 329: 129090.
- [6] 林涛,韩冬,钟海峰,等.工频交流电晕放电下 SF₆ 气体分解物形成的影响因素[J].电工技术学报,2014,29(2):219-225.
- [7] 李进,赵仁勇,杜伯学,等.电工环氧绝缘件缺陷无损检测方法研究进展[J].电工技术学报,2021,36(21):4598-4607.
- [8] Zhang Xiaoxing, Li Yi, Tian Shuangshuang, et al. Decomposition mechanism of the C5-PFK/CO₂ gas mixture as an alternative gas for SF₆[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 336: 38-46.
- [9] 王琼苑,褚继峰,李秋霖,等.基于微型气体传感阵列的空气绝缘设备放电故障识别[J].电工技术学报,2023,38(23):6495-6502.

(下转第 24 页)

模型,如图7所示。 S_1 断路器模拟C相串抗单相金属性接地故障,令 S_1 断路器0.1 s闭合, S_2 断路器及 R_d 模拟B、C串抗在进线侧发生相间短路,令 S_2 断路器4.314 s闭合, R_d 为 $1\ \Omega$,令314断路器4.474 s断开,模拟差动保护动作切除314断路器。

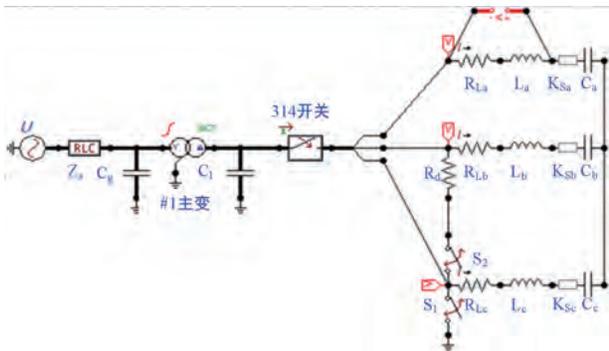


图7 单相接地及相间短路故障仿真

仿真计算B、C相间短路的电流,如图8所示,其波形特征与录波文件(见图3)一致。

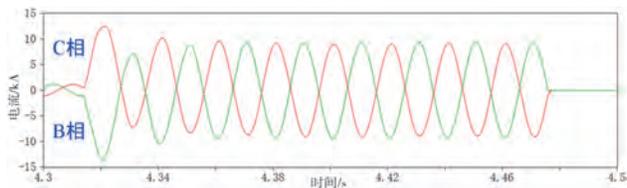


图8 B、C相间短路电流

4 结语

文中针对一起干式空心电抗器匝间短路故障,开展检查试验及录波分析,确定了故障过程为C相电抗器匝间短路导致温度急剧上升,内部绕组熔融下滴引发单相接地,并逐步发展至B、C相间短路故障;基于ATP软件搭建电抗器投切及匝间短路模型,仿真分析确定了故障原因并复现了故障发展过程。

参考文献:

- [1] 李浩,晏年平,贾志东.干式空心电抗器包封受潮对绝缘的影响研究[J].高压电器,2020,56(5):55-61.
- [2] 祝令瑜,杜一鸣,高璐,等.不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J].高电压技术,2022,48(8):3201-3209.
- [3] 王瑞科,郭香福.干式空心电抗器匝间绝缘故障对总体特性的影响及检测方法[J].变压器,2000(9):32-35.
- [4] 甘源,白锐,张琪.基于场路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):144-149.
- [5] 王硕,张轶珠,王昕.干式空心电抗器匝间短路故障投切过电压有限元分析[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(6):63-70.

(上接第16页)

- [10] 胡焯红.电晕放电臭氧的产生机理与监测研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [11] 刘源.差分吸收光谱法测量臭氧浓度的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [12] 张伟,吕泽承,樊宇璐,等.基于紫外吸收光谱检测开关柜局部放电的方法[J].绝缘材料,2017,50(3):57-61.

- [13] 环境保护部.环境空气臭氧的测定靛蓝二磺酸钠分光光度法:HJ 504-2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009:1-6.
- [14] 张月琴,汪燮抑,杨海鹰.气体中氮氧化物分析方法进展[J].现代科学仪器,2009,3:109-111.
- [15] 环境保护部.环境空气氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)的测定盐酸萘乙二胺分光光度法:HJ 479-2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.