

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.022

气隙缺陷局部放电下空气分解组分特性研究

卓 然¹, 关 伟², 陈林聪³, 裘吟君³, 张晓星^{4,5}, 胡雄雄⁴

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510080; 2. 国网国际发展有限公司, 北京 100031; 3. 海南电力技术研究院, 海南 海口 570125; 4. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 5. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 为探索一种新的开关柜局部放电(PD)检测方法——气体分析法, 笔者对不同PD强度下空气分解组分特性进行了相应的模拟实验研究。利用构建的气隙绝缘缺陷模型在研制的PD分解实验平台上对空气进行24 h PD分解实验, 并研究了气体分解组分、体积分数、产气速率与放电量的关联特性。实验结果表明, 因气隙绝缘缺陷产生的PD导致空气分解为CO、NO、NO₂、O₃等组分, 且各组分的体积分数增长特性有明显差异。CO和NO₂气体的体积分数随工频周期内平均放电量 Q_p 的增加均呈现“线性—饱和”的增长趋势, NO₂先于CO出现饱和且饱和度要低于CO。在较低PD强度下CO的产气速率与 Q_p 表现近似线性的关联性。

关键词: 气隙绝缘缺陷; PD; 分解组分; 放电量; 气体分析法

Study on the Characteristics of Air Decomposition Components Under PD of Air-gap Insulation Defect

ZHUO Ran¹, GUAN Wei², CHEN Lincong³, QIU Yinjun³, ZHANG Xiaoxing^{4,5}, HU Xiongxiang⁴

(1. Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China; 2. State Grid International Development Co., Ltd., Beijing 100031, China; 3. Hainan Electric Power Research Institute, Hainan Haikou 570125, China; 4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore a new detection method of partial discharge(PD)for switchgear, gas analysis method, the simulation experiments about the characteristics of air decomposition components under different PD intensities are carried out in this paper. The model of air-gap insulation defect is employed to conduct the decomposition experiments caused by PD with duration of 24 h on the decomposition experimental platform, and the correlation characteristics of the gas composition, concentration, gas production rate with discharge quantity are studied. The experimental results show that the air decomposition components are CO, NO, NO₂ and O₃ under PD caused by the air-gap insulation defect, and the concentration of each component varies from each other. The concentration of CO and NO₂ increases with the increase of the average discharge quantity Q_p during a power frequency period. The growth trend of “linear-saturation” is presented. And the NO₂ appeared to saturate before CO do and its degree of saturation is lower than that of CO. The correlation between the gas production rate of CO and the Q_p is approximately linear under low PD intensities.

Key words: air-gap insulation defect; PD; decomposition components; discharge quantity; gas analysis method

0 引言

随着中国电力系统规模的不断扩大, 对系统运行的安全性和可靠性的要求也不断提高。作为电力系统中常见的设备, 开关柜设备在输配电过程中起

着控制或保护等作用, 保证电力系统的稳定工作; 同时当系统出现故障时通过开关柜设备可以断开相互连接的设备, 有效地保护电力操作人员和电力设备的安全^[1]。因此, 保证开关柜的安全运行对实现配电安全和提高配电质量有着重要的意义。由于开关柜在制造、运输、安装和运行的过程中可能会存

在积灰、脏污、毛刺、气隙、接触不良以及潮湿等现象^[2],这些都会导致开关柜运行过程中产生局部放电(partial discharge, PD),可能会引发相间短路,甚至爆炸^[3]。其中,开关柜内部部件之间接触不紧密易形成气隙绝缘缺陷,2008年7月30日安徽某供电公司110 kV变电站发生35 kV线路B相接地,随后引发该变电站出线开关柜发生爆炸,经查实,套管的引下线铝排和触头盒内壁之间存在5~7 mm的窄气隙,这是导致事故发生的直接原因^[4]。文献表明当线路B相接地后,开关柜C相电压升高,窄气隙分得更高的电压,气隙内产生PD;随后先导通道的形成及其进一步发展,最终导致了绝缘层的击穿。

当气体绝缘设备发生PD时,常伴随电流脉冲、电磁辐射、光辐射、超声波产生,并引起气体分解产生一些新的产物,同时会引起局部过热^[5]。因此,根据PD产生的不同物理化学过程,检测PD的方法主要有特高频(UHF)法^[6]、脉冲电流法^[7]、超声波法^[8]、暂态对地电压(TEV)法^[9]、气体分析法^[10]等。

近年来,利用气体分析法检测GIS设备内PD下SF₆气体的分解组分,来对设备的故障类型及其严重程度进行表征已成为研究热点^[11-14],而利用该方法对开关柜PD的研究鲜有报导。尽管开关柜相对GIS的密闭性较弱,但是对于室内开关柜内气体流动性较差。当开关柜发生PD时,开关柜内空气将会发生分解,产生O₃、NO、NO₂、NO₃、N₂O₅、CO等分解产物;同时开关柜内固体绝缘材料受损后会发生裂化分解产生CO、CO₂等气体^[15]。这些产物大多数对人体和环境有危害,其中酸性气体与空气中的水汽反应生成的酸会腐蚀金属部件表面以及加速固体绝缘材料裂化,进一步降低开关柜内的绝缘性能。因此,文中借鉴气体分析法检测GIS PD的思想来探索一种新的开关柜PD检测方法。

笔者在研制的空气PD分解试验装置上,构建了气隙绝缘缺陷物理模型来模拟开关柜中常见的气隙绝缘缺陷,在模型上施加实验电压,选取4个电压梯度进行空气24 h PD分解实验,并利用烟气分析仪和紫外吸收光谱来检测PD空气的分解组分,同时采用脉冲电流法检测放电量,探索分解组分的体积分数随电压和放电时间变化的增长特性以及组分体积分数、产气速率与放电量的关联特性,为后续研究真实开关柜PD空气分解规律提供指导作用。

1 PD下空气分解机制

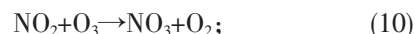
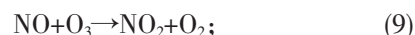
在开关柜中,空气发生分解主要有以下3个原因:电子碰撞、热效应和光效应。在放电气室中因光

效应较弱,因此其影响可以忽略。因绝缘缺陷引发的PD大都为低能放电,放电区域内的温度变化较小,因此热效应的影响相对较小,可认为电子碰撞游离过程在空气分解过程中占主导地位,即常温下空气在PD陡脉冲强电场下的电子碰撞分解。

在电场的作用下,空气中的O₂和N₂与高能带电粒子发生剧烈碰撞,分别电离出O原子和N原子^[16]。同时空气中的CO₂也会在高能电子的作用下分解生成CO^[17]。



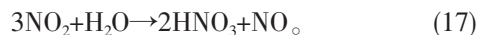
在放电区域内生成的O、N原子迅速扩散到其他区域,由于生成的单个O原子化学反应活性高,进一步与气室中的O₂反应生成强氧化性的O₃。同时N原子被氧化性强的O₂和O₃氧化,生成NO,而NO很不稳定,极易被O₂和O₃氧化生成NO₂。NO和O₃因其化学性质活泼易被反应消耗。反应方程为^[18-21]:



当放电区域存在有机材料或固体绝缘材料时,这些材料在高能电子的作用下激发出C原子,与O原子结合生成CO和CO₂,反应方程为:



此外,生成的NO₂极易与空气中的水蒸气发生反应生成酸性极强的硝酸,会腐蚀开关柜金属部件表面以及加速绝缘材料的裂化。



根据上述反应,PD下空气分解的主要气体组分有O₃、CO、CO₂、NO、NO₂等。因空气中一般含有300~400 μL/L的CO₂,所以CO₂不能作为空气PD分解组分的检测对象。尽管O₃和NO在空气中的不稳定性,但因其有毒,同时其体积分数与缺陷PD特性有着一定的关系,有必要对其进行检测。因此文中通过检测空气分解组分中的CO、NO、NO₂和O₃来研

究空气 PD 特性。

2 实验装置

2.1 气体分解实验系统

为了模拟开关柜 PD 实验, 文中构建了气隙绝缘缺陷模型展开相关实验研究。气体分解实验系统主要由无晕交流高压实验电源、保护电阻、电容分压器、空气放电气室、气隙绝缘缺陷模型、耦合电容、检测阻抗、示波器、烟气分析仪和紫外吸收光谱检测系统等组成。其中空气放电气室采用自制的有机玻璃罐体, 体积约为 10 L。气体分解实验在常温常压下进行。实验连接见图 1。

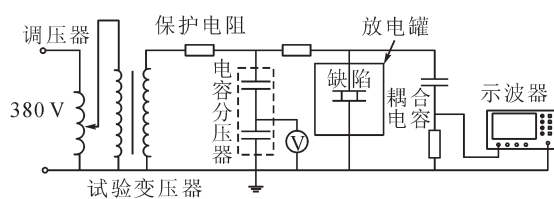


图 1 空气放电分解实验连接图

Fig. 1 Air discharge decomposition experiments connection diagram

2.2 气隙绝缘缺陷模型

气隙绝缘缺陷是指开关柜内部部件之间因接触不紧密形成的缺陷, 如环氧树脂在固化过程中收缩、金属电极和环氧树脂热膨胀系数不同导致的内部空隙以及装配误差导致导体的机械运动产生的气隙缺陷, 这些气隙通常是在制造过程中形成且难以检测到^[2]。文中针对绝缘子气隙缺陷这一典型缺陷进行空气的 PD 分解研究。

文中构建的气隙绝缘缺陷物理模型见图 2。电极材料均为不锈钢, 圆柱形绝缘子的上下表面均通过抛光处理, 两极板直径均为 60 mm, 厚度均为 10 mm, 圆柱形环氧树脂直径为 45 mm, 高为 25 mm。高压电极与绝缘子上表面之间利用环氧树脂胶保留高度约 2 mm 的气隙。接地电极与绝缘子下表面之间利用环氧树脂胶紧密粘连, 确保粘连处没有缝隙或气泡存在。尽管设计的缺陷模型与开关柜中实际气隙缺陷有一定差距, 但是在一定程度上贴近了真实缺陷。

2.3 气体分解组分检测系统

该实验主要对 CO、NO、NO₂ 及 O₃ 的体积分数进行检测, 采用如图 3 所示的气体分解组分循环检测系统, 检测系统包括两个部分, 即烟气分析仪和紫外吸收光谱检测系统。

采用的烟气分析仪可以检测放电气室中 CO、NO 和 NO₂ 的体积分数, 控制待测气体的进气流速

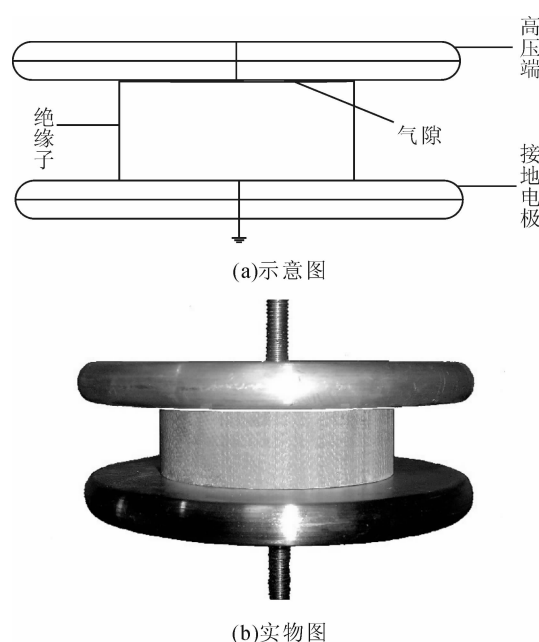


图 2 气隙绝缘缺陷模型

Fig. 2 Schematic of air-gap insulation defect

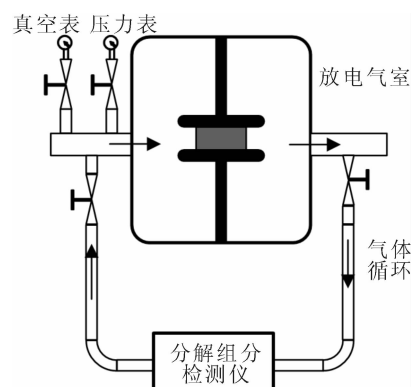


图 3 气体分解组分循环检测系统

Fig. 3 Circulation detection system for decomposition components

在 0.2 m/s 左右, 检测精度可达到 1 μ L/L。检测组分体积分数时将放电气室的出气口与烟气分析仪的进气口连接, 烟气分析仪的出气口与放电气室的进气口连接, 保证测量过程中气室内的气体形成循环, 避免有毒气体被排出, 实现对分解组分实时检测。

采用的紫外吸收光谱检测系统可以检测放电气室中 O₃ 的体积分数。O₃ 可吸收短波紫外区(200~300 nm 波段)的紫外光, 并且在波长为 253.7 nm 处具有最大吸收峰值。紫外吸收光谱法具有检测灵敏度高、检测速度快, 能够实现实时在线监测。

3 空气 PD 分解实验

3.1 实验步骤

空气分解实验的步骤如下:

1) 在放电气室中放入构建的气隙绝缘缺陷模

型,并用无水乙醇清洗放电罐内壁和缺陷模型,清除上次实验所残留的反应物,避免残留物影响实验结果。

2)用真空泵和尽量短的橡胶管(长度将影响抽气时间)对放电罐抽取至真空,并注入空气反复冲洗罐体以保证上一次气室内气体充分排出,最后一次抽真空后注入空气,稳定数小时,并保持实验环境温度在 20 ℃ 左右。

3)对缺陷模型采用逐步加压法,确定 PD 起始电压和击穿电压,并选取 4 个电压分别进行实验。

4)在每组实验电压下分别进行 24 h 气体分解实验,每隔 4 h 采集放电气室样气,用烟气分析仪和紫外吸收检测系统进行组分分析,同时利用回路无感电阻检测 PD 放电量和幅值。

3.2 PD 放电量的标定与测量

为了测量 PD 过程中的放电量,实验前需对试品的视在放电量进行标定^[23]。根据 IEC 60270—2000 标准检测到的 PD 脉冲电压信号与试品的视在放电量有着正比例的关系,文中采用脉冲电流法对试品的视在放电量进行标定,采用的 PD 放电量校准电路示意图见图 4。经过拟合得到所构建的试品的电压—放电量关系见图 5,其中 R^2 为拟合相关系数。

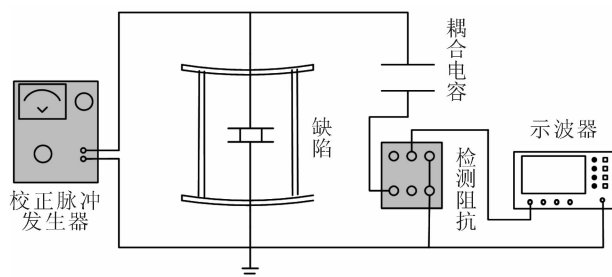


图 4 放电量校准电路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of discharge calibration circuit

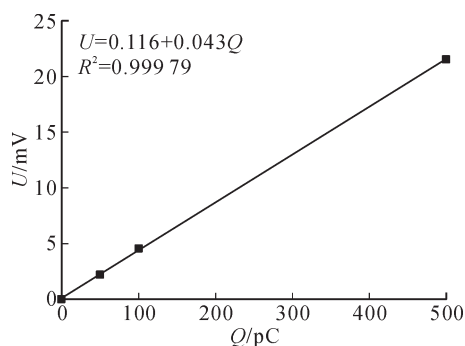


图 5 气隙缺陷放电量校准曲线

Fig. 5 Calibration curve of discharge with air-gap insulation defect

将气隙缺陷模型放入放电气室中,采用逐步升压法测得起始放电电压为 9 kV,击穿电压为 16 kV。

为研究不同 PD 强度下的空气组分分解特性,选取 11、12、13、14 kV 4 个电压梯度来进行实验。实验过程中,测量一个工频周期内单次放电量的最大值 Q_{MAX} 、放电量的平均值 Q_{AVG} 以及放电次数 N 来反映不同电压下的 PD 强度。见表 1。

表 1 不同电压下 PD 特征值

Table 1 PD characteristic under different voltages				
实验组	11 kV	12 kV	13 kV	14 kV
Q_{MAX}/pC	909	1 141	1 428	1 662
Q_{AVG}/pC	693	702	778	816
N	10	23	39	56

4 实验结果与分析

4.1 分解组分体积分数变化特性

4.1.1 CO 的体积分数变化特性

在不同电压等级下 CO 的体积分数随时间的变化趋势见图 6。随着放电时间增加,CO 的体积分数不断增加,且随着电压等级升高,即 PD 强度增大,CO 的体积分数也逐渐升高。在电压等级较低(11、12、13 kV)时,CO 气体的体积分数变化呈线性增长的趋势;当电压达到 14 kV 时,CO 气体的体积分数变化先呈线性增长,后期斜率稍微下降。低电压等级下 CO 气体的体积分数呈线型增加可从两个方面来解释:一方面空气中含有一定量的 CO_2 ,根据反应式(3),在高能电子的作用下, CO_2 分解生成 CO;另一方面是由于绝缘子气隙缺陷所采用的材料为环氧树脂,含有大量的 C 元素,在电场作用下,高能电子碰撞绝缘材料表面,不断激发绝缘材料释放 C 元素,与 O 原子结合生成 CO。在电压达到 14 kV 时,CO 的体积分数增加的速度减慢,原因是电压的等级增加,PD 的强度增加,使得空气中的 O 原子与 O_2 结合生成更多的 O_3 , O_3 的体积分数增加使得更多的 CO 被氧化,导致 CO 产气速度有所减慢。在 24 h 的放电过程中,由于 C 元素充足,放电时间短,CO 的体积分数并未出现饱和,但在后期斜率出现稍微的下降,说明 CO 的产气速率开始减缓,可以猜测 CO 的体积分数不会一直线性增长,会随着放电时间的增加出现饱和现象,即 CO 的体积分数与放电时间呈“线性—饱和”趋势增长。

4.1.2 NO 的体积分数变化特性

在 24 h 的 PD 空气分解实验中没有检测到 NO,但是在电压继续上升,达到击穿电压,多次击穿后检测到 NO,表明在 PD 过程中 NO 积累的量很少甚至没有。其原因是 PD 的能量相对击穿时较低,NO 产气率较慢且 PD 过程中有 O_3 生成,生成的 NO

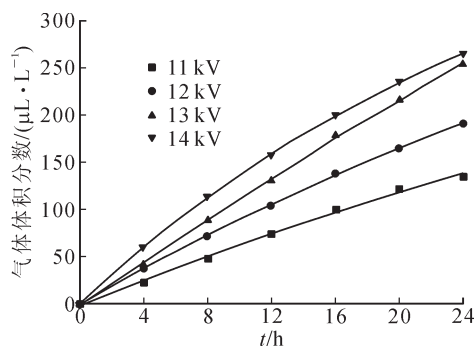


图6 不同电压下 CO 体积分数随时间的变化

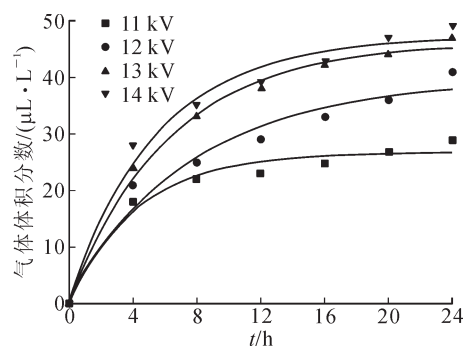
Fig. 6 The changes of CO concentration with time under different voltages

迅速被氧化, 这导致了在 PD 过程中检测不到 NO。而在击穿状态下, 时间较短, NO 产气较快, NO 不能被全部氧化, 这就导致了在击穿状态下检测到了 NO。进一步可以通过检测 NO 来反映 PD 的严重程度, 一旦检测到 NO 可说明 PD 很严重, 临近击穿。

4.1.3 NO₂ 的体积分数变化特性

在不同电压等级下 NO₂ 的体积分数随时间的变化趋势见图 7。随着放电时间增加, NO₂ 的体积分数不断增加, 且随着电压等级升高, 即 PD 强度增大, NO₂ 的体积分数也逐渐升高, 这与 CO 的体积分数变化情况不同的是 NO₂ 的体积分数在前 12 h 增长较快, 在后期却呈现饱和的增长趋势。NO₂ 的体积分数最高达到 50 μL/L, 相比于 CO 的体积分数, NO₂ 的产气量相对较少。出现这一现象的原因是在放电前 12 h 内生成 NO₂ 的速度较快, 其中包括生成的 NO 被氧化成 NO₂, 这也解释了为何检测不到 NO。尽管生成的 NO₂ 会与空气中的水汽反应而消耗, 但因其消耗的速率相对其生成的速率慢, 导致了其体积分数在前期增长较快。而在后 12 h 内 NO₂ 很快出现饱和是因为随着放电时间的增加, 积累的 NO₂ 达到一定程度, 抑制了其生成, 使得其生成速率减小, 生成量逐渐减少; 又因 NO₂ 的消耗速度加快, 导致了 NO₂ 生成的速率与消耗的速率达到动态平衡, 使得积累的 NO₂ 的体积分数趋于饱和。

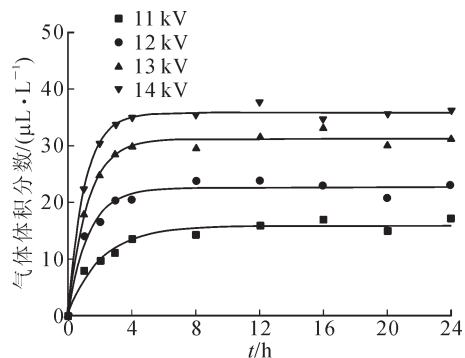
在电压等级较低(11 kV 和 12 kV)时, 随着放电时间的增加, 两个电压等级下 NO₂ 的体积分数差相差较大, 而在电压等级较高(13 kV 和 14 kV)时, 两个电压等级下 NO₂ 的体积分数差值变化很小, 表明绝缘子气隙缺陷在较低电压等级下增大电压对 NO₂ 的生成有明显的促进作用, 而在电压等级较高时增大电压对 NO₂ 的生成没有明显的促进作用, 尽管体积分数增加了, 但是增加的幅值不大。分析其可能的原因是在低电压等级下, 增大电压, 即增大 PD 强

图7 不同电压下 NO₂ 体积分数随时间的变化Fig. 7 The changes of NO₂ concentration with time under different voltages

度, 促进了 NO₂ 的生成, 放电强度占主要因素; 而在高电压等级下, 增大 PD 强度也促进了 O₃ 的产生, 加速了 NO₂ 的消耗, 促使 NO₂ 转换成其他氮氧化物 NO_x, 使得积累的 NO₂ 的量较少, 放电强度的影响减弱。

4.1.4 O₃ 的体积分数变化特性

在不同电压等级下 O₃ 的体积分数随时间的变化趋势见图 8。在放电 4 h 后 O₃ 体积分数达到饱和, 表现为不同时间下体积分数在一定水平附近波动。改变放电前 4 h 内 O₃ 检测时间为 1 h 检测一次, 发现在前 4 h 内, 随着时间的增加, O₃ 体积分数逐渐增大。且随着电压等级升高, 即 PD 强度增大, O₃ 体积分数有所增加, 但 4 h 后均达到饱和, 表明增大放电强度并未改变 O₃ 的增长趋势。O₃ 因其强氧化性氧化其他物质而消耗, 也因其不稳定性而分解消耗。增大放电强度促进了 O₃ 的生成也促进了其消耗, 从而出现了 O₃ 体积分数在一定水平附近振荡。

图8 不同电压下 O₃ 体积分数随时间的变化Fig. 8 The changes of O₃ concentration with time under different voltages

4.2 组分体积分数与放电量的关联特性

文中对空气在 PD 下分解组分中的 CO、NO、NO₂ 和 O₃ 进行了检测, 因组分体积分数随放电时间

变化特性存在差异,有必要研究组分体积分数与放电量的关联特性。由于在放电过程中检测不到 NO 以及 O₃ 的体积分数过早达到饱和,不适宜与放电量进行关联。CO 和 NO₂ 的体积分数与电压的增加有着一定的联系。下面以 CO 和 NO₂ 的体积分数与放电量进行关联。

空气分解主要是由 PD 的累积效应导致的,仅通过单次放电量与分解组分关联不能全面准确地解释 PD 强度与分解组分之间的内在联系。文中结合一个工频周期内单次放电量平均值和放电次数,采用一个工频周期的平均放电量 Q_p 来表征不同电压等级下的 PD 强度^[24],即将平均放电量 Q_p 与分解组分进行关联,来获得分解组分的体积分数与放电量的关联特性,平均放电量 Q_p 的计算式为

$$Q_p = Q_{AVG} \times N. \quad (18)$$

式(18)中: Q_{AVG} 为一个工频周期内单次放电量平均值; N 为一个工频周期内的放电次数。

在相同的放电时间下,CO 的体积分数与 Q_p 的关联曲线见图 9。相同放电时间下,随着 Q_p 的增大,CO 的体积分数也随着增大且增长趋势越来越平缓;随着放电时间的增加,随 Q_p 的变化呈“线性—饱和”的增长关系,其中“线性增长”与“饱和增长”之间的近似转折时间点可以认为是 8 h 左右。分析其原因,文中模拟的 PD 主要是因为气隙两端所加电压产生的电场强度超过了气隙自身的耐受强度,从而所引发短时间内的气隙击穿,此时 PD 的大小较为稳定,从而单次放电量及重复性也较为稳定,进而导致了统计的 Q_p 与一个工频周期内参与反应的电子数目呈现“线性—饱和”关系^[25]。因 PD 引起参与空气分解反应的电子数目呈“线性—饱和”的增长关系,因此在一定时间内气隙缺陷下空气分解组分 CO 的体积分数随 Q_p 的变化呈“线性—饱和”的增长趋势。

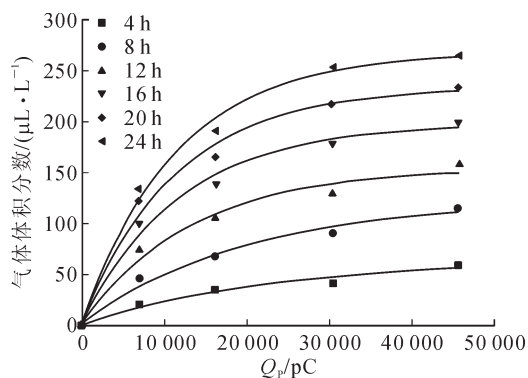


图 9 CO 的体积分数随放电量的关联曲线

Fig. 9 Correlation curves of CO concentration with discharge quantity

在相同的放电时间下,NO₂ 的体积分数与 Q_p 的关联曲线见图 10。随着 Q_p 的增加,NO₂ 的体积分数先快速增长,后饱和增长,表明 Q_p 较小时,增大放电量,促进 NO₂ 的生成,放电量占主要因素;当 Q_p 增大到一定程度,放电量的影响减弱,NO₂ 被消耗的速度加快,最后消耗与生成达到一个平衡,使得放电量增大呈现饱和增长的趋势。

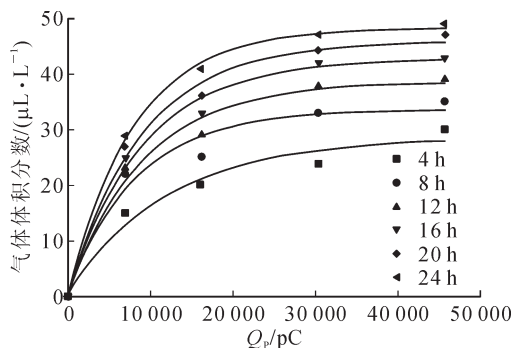


图 10 NO₂ 的体积分数随放电量的关联曲线

Fig. 10 Correlation curves of NO₂ concentration with discharge quantity

4.3 产气速率与放电量的关联特性

根据前面所述,CO 和 NO₂ 的体积分数随着放电时间的增加逐步稳定增加,但在不同的 PD 强度下各自的斜率变化趋势各不相同,这表明可以进一步根据 CO、NO₂ 产气速率与放电量之间关系来表征 PD 强度。可引入绝对产气速率^[26]来表征气隙缺陷在各个时段下的产气速率为

$$v_m = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t}. \quad (19)$$

式(19)中: v_m 为绝对产气速率; V_i 为第 i 次测得某种气体的体积分数; V_{i-1} 为第 $i-1$ 次测得某种气体的体积分数; Δt 为两次检测的时间间隔。文中以 4 h 为两次检测气体的时间间隔,并持续放电 24 h。

为使产气速率具有统计性,文中采用气体的产气速率的均方根值 v_n 来表征气隙缺陷在不同时间下的产气率值^[27], v_n 为

$$v_n = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^3 v_{mj}^2}{3}}. \quad (20)$$

式(20)中, v_{mj} 为第 j 个时间段内的某种气体的绝对产气速率。考虑到放电 12 h 前后气体体积分数增长特性的变化,分别计算前后 12 h 的 v_{n1} 、 v_{n2} (每 4 h 检测一次)。根据式(20)可计算出分解组分的产气均方速率,绘制出其与放电量的关联特性曲线,见图 11、12。

从图 11 中可以看出,CO 在放电前 12 h 和后

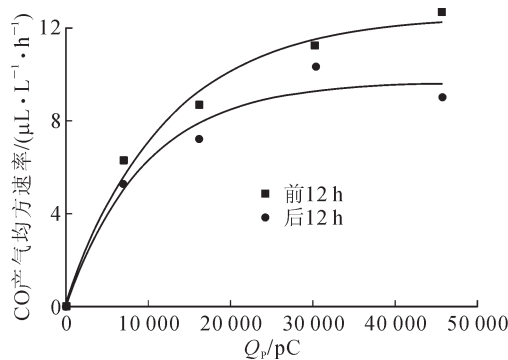
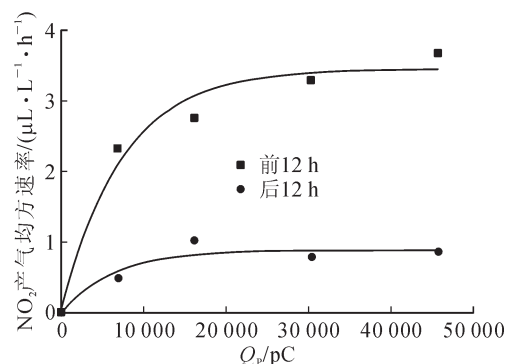


图 11 CO 气体产气速率与放电量的关联特性

Fig. 11 Correlation characteristics between CO production rate and discharge quantity

图 12 NO₂ 产气速率与放电量的关联特性Fig. 12 Correlation characteristics between NO₂ production rate and discharge quantity

12 h 的产气速率随 Q_p 的变化均呈现先快速增大后饱和增大的趋势,且前后的速率相差不大,表明放电量的增加促进 CO 的生成,但随着放电时间的增加,CO 被消耗的速度增大,由于气隙下的 PD 较稳定,使得产气速率最后趋于稳定。在较低 PD 下 CO 的产气速率与 Q_p 表现了近似线性的关联性。因此可根据气体产气速率来判断 Q_p 大小,从而判断 PD 程度。

从图 12 中可以看出,NO₂ 在放电前 12 h 和后 12 h 的产气速率变化趋势与 CO 类似,不同的是 NO₂ 的产气速率在 12 h 前后相差较大。前 12 h 的产气速率明显高于后 12 h,表明随着放电时间的增加,NO₂ 的产气速率会降低,分解组分体积分数的饱和致使绝对产气率降低,在放电前期组分产气速率与放电量有着一定的关联性,但整体关联性较差,可作为放电前期辅助检测 Q_p 的依据。在放电后 12 h 内,NO₂ 的产气均方速率稳定在 1 μL/L/h 附近,可近似认为气体体积分数达到饱和,增加幅度很小。

5 结论

1)利用构建的气隙缺陷模型在实验室模拟开关

柜中的 PD 使空气发生分解,根据理论分析,选取分解组分中的 CO、NO、NO₂ 和 O₃ 进行研究。实验结果显示这些组分体积分数的增长特性有明显差异。

2)在相同电压下,CO 的体积分数随放电时间的增加而近似线性增加,NO₂ 的体积分数却随放电时间的增加而呈饱和增长的趋势;O₃ 的体积分数在放电 4 h 后达到饱和;NO 却检测不到,只有在多次击穿后才检测到 NO。在相同放电时间下,CO 和 NO₂ 的体积分数随平均放电量 Q_p 的增加呈“线性—饱和”增长趋势,其中 NO₂ 先于 CO 出现饱和且饱和度要低于 CO。

3)在较低 PD 强度下 CO 的产气速率与 Q_p 表现了近似线性的关联性,可根据气体产气速率来判断 Q_p 大小;在放电前期对于 NO₂ 的产气速率与 Q_p 有着一定的关联性,整体关联性较差,可作为放电前期辅助检测 Q_p 的依据。

参考文献:

- [1] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,47(7):90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7):90-93.
- [2] 陈希. 开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
CHEN Xi. Detection and research on the switchboard's internal insulation fault[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [3] 王培义,朱伯涛. 开关柜局部放电超声波在线检测技术的应用[J]. 河北电力技术,2010,29(6):26.
WANG Peiyi, ZHU Baitao. Application of partial discharge ultrasonic on-line detection technology for switchgear[J]. Hebei Electric Power, 2010, 29(6):26.
- [4] 王海冰,杜永平,曾奕. 一起小型化开关柜爆炸事故的分析及处理[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2010,15(3):6-10.
WANG Haibing, DU Yongping, ZENG Yi. The analysis and disposal of an explosion fault of miniaturized switch cabinet[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2010, 15(3):6-10.
- [5] 刘强. 开关柜结构对局部放电磁波传播特性及时延算法的影响分析[D]. 重庆:重庆大学,2013.
LIU Qiang. Analysis on the electromagnetic wave propagation characteristics of partial discharge and switchgear structure influence on the time delay algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 王有元,刘强,陆国俊,等. 开关柜结构对超高频电磁波传播特性的影响分析[J]. 电工技术学报,2013,28(11):

- 293-300.
- WANG Youyuan, LIU Qiang, LU Guojun, et al. Propagation characteristics of ultra-high frequency electromagnetic wave influenced by the switchgear structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 293-300.
- [7] 王流火, 吕 鸿, 吴 吉, 等. 开关柜局部放电检测技术的应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 62-67.
- WANG Lihuo, LYU Hong, WU Ji, et al. Application study on detection technology of switchgear partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 62-67.
- [8] 陈巧勇, 李宏雯, 余 睿, 等. 暂态地电压和超声波在开关柜检测中的应用[J]. 浙江电力, 2012, 31(4): 47-50.
- CHEN Qiaoyong, LI Hongwen, YU Rui, et al. Application of transient earth voltage and ultrasonic detection technologies in switchgear test[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(4): 47-50.
- [9] 任 明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
- REN Ming, PENG Huadong, CHEN Xiaoqing, et al. Comprehensive detection of partial discharge in switchgear using TEV[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [10] 唐 炬, 胡 瑶, 裴吟君, 等. 2种局部放电类型下 SF₆ 分解组分检测及特性分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1): 55-61.
- TANG Ju, HU Yao, QIU Yinjun, et al. Measurement and analysis of SF₆ decomposition products under two types of partial discharges[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(1): 55-61.
- [11] 张晓星, 姚 尧, 唐 炬, 等. SF₆ 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-669.
- ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 664-669.
- [12] ZHANG X X, REN J B, TANG J, et al. Kernel statistical uncorrelated optimum discriminant vectors algorithm for GIS PD recognition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 206-213.
- [13] ZHANG Xiaoxing, LIU Wangting, TANG Ju, et al. Study on PD detection in SF₆ using multi-wall carbon nanotube films sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 833-838.
- [14] ZHANG Xiaoxing, CHEN Qinchuan, HU Weihua, et al. A DFT study of SF₆ decomposed gas adsorption on an anatase (101) surface[J]. Applied Surface Science, 2013, 286(12): 47-53.
- [15] LEVINE J S, ROGOWSKI R S, GREGORY G L, et al. Simultaneous measurements of NO_x, NO, and O₃ production in a laboratory discharge-atmospheric implications[J]. Geophysical Research Letters, 1981, 8(4): 357-360.
- [16] VINOGRADOV I P, WIESEMANN K. Classical absorption and emission spectroscopy of barrier discharges in N₂/NO and O₂/NO mixtures[J]. Plasma Sources Science and Technology, 1997, 6(3): 307-316.
- [17] SEKIGUCHI H, KANZAWA A, HONDA T. Thermal quenching effects on plasma synthesis of NO and plasma decomposition of CO₂[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1989, 9(2): 257-275.
- [18] 杨 旗. 空气电弧放电合成医用一氧化氮的等离子体化学动力学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- YANG Qi. Research on chemical kinetics of plasma of medical nitric oxide produced by pulsed arc discharge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [19] STEFANOVIC I, BIBINOV N K, DERYUGIN A A, et al. Kinetics of ozone and nitric oxides in dielectric barrier discharges in O₂/NO_x and N₂/O₂/NO mixtures[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2001, 10(3): 406.
- [20] SUN J Z, STIRNER T, WANG D Z. A kinetic study of ozone and nitric oxides in dielectric barrier discharges for O₂/NO mixtures[J]. Plasma Science and Technology, 2002, 4(2): 1227-1238.
- [21] 吴春笃, 郑丽菡, 储金字. 空气放电产生臭氧的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 50-52.
- WU Chundu, ZHENG Lihan, CHU Jinyu. Research on ozone generation by discharge in air[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 50-52.
- [22] 孟庆红. 不同绝缘缺陷局部放电下 SF₆ 分解特性与特征组分检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- MENG Qinghong. Research on SF₆ gas decomposition characteristics and characteristic components under partial discharge of different insulation defects[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [23] 张晓星, 唐俊忠, 唐 炬, 等. GIS 中典型局放缺陷的 UHF 信号与放电量的相关分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 59-65.
- ZHANG Xiaoxing, TANG Junzhong, TANG Ju, et al. Relationship between UHF signals and discharge magnitude from typical partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 59-65.
- [24] 唐 炬, 李 涛, 胡 忠, 等. 两种常见局部放电缺陷模型的 SF₆ 气体分解组份对比分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 487-492.
- TANG Ju, LI Tao, HU Zhong, et al. Analysis of SF₆ gaseous decomposition components under two kinds of PD defects[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 487-492.
- [25] 唐 炬, 任晓龙, 张晓星, 等. 气隙缺陷下不同局部放电

- ing resistance of traction substation in high soil resistivity areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 124-127.
- [17] 郭 磊.《变电站防雷及接地装置状态评价导则》的执行与思考[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 128-132.
- GUO Lei. Implementation and discussion on standard guide for condition evaluation of lightning protection and grounding devices for substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 128-132.
- [18] 周国军, 刘凤娇, 吴志科, 等. 喀斯特地貌综合防雷接地系统的设计与施工—以矮寨大桥为例[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 133-138.
- ZHOU Guojun, LIU Fengjiao, WU Zhike, et al. Design and construction of grounding system of comprehensive lightning protection under Karst Landform-Taking the Aizhai suspension bridge as an example[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 133-138.
- [19] 韩学民, 夏长征, 喻剑辉, 等. 杆塔接地体冲击电位分布特性的模拟试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2464-2470.
- HAN Xuemin, XIA Changzheng, YU Jianhui, et al. Simulation experiment on potential distribution for grounding electrode of transmission tower under impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2464-2470.
- [20] 刘渝根, 刘小二, 余晓东, 等. 人工改善土壤后接地网接地参数的计算和分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 16-19.
- LIU Yugen, LIU Xiao'er, YU Xiaodong, et al. Calculation and analysis of grounding parameters of grounding grid with artificial improvement soil surrounding the grounding grid's conductors[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 16-19.
- [21] DL/T 475—2006 接地装置特性参数测量导则[S]. 2006.
- DL/T 475—2006 Guide for measurement of grounding connection parameters[S]. 2006.
- [22] GB 26860—2011 电力安全工作规程发电厂和变电站电气部分[S]. 2011.
- GB 26860—2011 Safety code of electric power industry electric part of power plants and transformer substations[S]. 2011.
- [23] DL/T 621—1997 交流电气装置的接地[S]. 1997.
- DL/T 621—1997 Grounding for AC electrical installations [S]. 1997.
- [24] GB/T 13870. 1—2008 电流对人和家畜的效应 第 1 部分: 通用部分[S]. 2008.
- GB/T 13870. 1—2008 Effects of current on human beings and livestock-Part 1: General aspects[S]. 2008.
- 马御棠(1986—), 男, 工程师, 主要从事输电线路技术监督与服务、输电线路防雷与接地、变电站地网的测试工作。
-
- (上接第 146 页)
- 强度的 SF₆ 分解特性[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 40-45.
- TANG Ju, REN Xiaolong, ZHANG Xiaoxing, et al. Decomposition characteristics of SF₆ under different partial discharge strengths caused by defected insulation in air gap [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 40-45.
- [26] 唐 炬, 任晓龙, 谭志红, 等. 针—板缺陷模型下局部放电量与 SF₆ 分解组分的关联特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 527-534.
- TANG Ju, REN Xiaolong, TAN Zhihong, et al. Correlation character between partial discharge quantity and SF₆ decomposition components under needle-plate defect model [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 527-534.
- [27] 任晓龙. 不同绝缘缺陷下放电量与 SF₆ 分解组分关联特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- REN Xiaolong. Research on the correlation characteristics between partial discharge quantity and SF₆ decomposition components under different insulation defects[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- 卓 然(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事气体绝缘组合电器、开关、套管设备故障检测技术以及电力设备抗震技术研究, zhuoran@csg.cn。
- 关 伟(1970—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网发展规划、电网建设运行及项目储备管理等工作, jlwps.gw@126.com。
- 张晓星(1972—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断、状态评估、新型传感器技术的研究。