

水轮发电机定子线棒表面局部放电分解气体产生规律研究^{*}

张 萌

(河南牧业经济学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为使用气体检测法对水轮发电机进行状态监测,针对水轮发电机实际使用的定子线棒,搭建了定子线棒表面局部放电实验平台,研究了水轮发电机定子线棒表面局部放电下气体的产生规律。研究结果表明, O_3 适合作为定子线棒表面局部放电的特征气体。在同样放电条件下,半导体硅胶产生的臭氧浓度更大,具有更强的抗电晕性能,在定子槽中填充半导体硅胶有利于定子线棒的安全运行,并有利于使用气体监测法对水轮发电机进行在线监测。

关键词:水轮发电机;定子线棒;表面局部放电;气体检测法

中图分类号:TM215

文献标识码:A

文章编号:2096-7772(2023)06-0034-04

0 引言

随着水电能源开发力度的增大,作为水电站的核心设备的水轮发电机单机容量也在不断增加,其额定电压目前已达到23kV。这对发电机的设计、制造及运行维护带来了挑战。水轮发电机的工作可靠性很大程度上取决于定子线棒的绝缘情况,定子线棒绝缘损坏是水轮发电机故障的重要原因,而定子线棒绝缘损坏主要是电、热、机械和环境等方面的影响,其中主要原因是局部放电^[1]。水轮发电机工作环境湿度大,随着工作电压的提高,其局部放电现象越来越普遍。根据现场统计,定子线棒局部放电主要有三种形式,分别为线棒R弯部放电、槽内放电和线棒层间放电。电晕会使定子线棒放电部位空气电离,产生臭氧(O_3)以及氮氧化合物,氮氧化合物又会和空气中的氧气及水蒸气反应产生硝酸,臭氧和硝酸都有很强的腐蚀性,会腐蚀定子线棒表面材料,破坏线棒的主绝缘^[2]。电晕发生时会产生光、声、热、电、气体等,因此可以通过监测来实现对定子线棒电晕的在线检测。目前,发电机局部放电在线监测的主要方法有电测法、声测法、光学检测法等,但由于发电机工作环境噪声大,且局放位置难以确定,传感器的安装还会影响发电机内部电磁场的分布,这就制约了以上传统方法对局部放电的检测效

果^[3]。

定子线棒发生表面局部放电时会产生特征气体,因此使用气体传感器对定子线棒电晕特征气体进行检测,可以用来检测水轮发电机定子线棒电晕^[4]。目前,气体检测法在油中溶解气体分析和GIS在线监测中已经有了比较成熟的应用^[5-7]。相对于电测法和声测法,气体检测法不易受电磁信号、电磁振动等干扰;由于气体具有流动性,光测法检测不到位置的放电,可以使用气体检测法,且气体传感器可以和检测位置分离,实现非接触式、非侵入式检测^[8]。因此,使用气体检测法对水轮发电机定子线棒表面局部放电进行在线监测具有天然的优势。

现有的研究对发电机定子线棒表面局部放电分解气体的研究较少。L. Lepine、D. N. Nguyen 等人研究了水轮发电机定子槽部放电的臭氧产生浓度,提出可以通过臭氧浓度来反映水轮发电机故障,并认为可以通过不同位置臭氧浓度情况确定故障位置。使用气体检测法对水轮发电机定子线棒进行状态监测,需要研究定子线棒发生表面局部放电时的气体产生规律。

本文搭建了放电实验平台,使用高灵敏度的气体分析仪器,对水电站实际使用的新、旧定子线棒表

^{*} 收稿日期:2023-10-26

作者简介:张萌(1990—),女,河南郑州人,讲师,硕士,主要从事自动控制、电气工程等方向研究。

面局部放电分解气体产生规律进行研究。

1 定子线棒表面局部放电分解气体产生原理

水轮发电机定子线棒表面局部放电是空气背景下的放电,根据李康等人的研究,空气中放电产生的氮氧化物浓度远小于臭氧的浓度,且放电较弱时只能检测到臭氧的存在,所以本研究中不再对氮氧化物进行检测。同时,定子线棒表面局部放电会破坏线棒表面的 SiC 半导体层,使主绝缘材料分解,主绝缘材料中的 C 元素可能会与 O 元素结合生成 CO^[9]。

空气背景下放电产生的 CO 和 O₃ 的主要反应路径如表 1 所示,表中 R1、R2、R3、R4 是反应的最初驱动力。当电场足够强时,空气中会产生能量足够大的自由电子,这些自由电子与空气分子碰撞会使后者电离或分解为原子。从反应路径可以看出, O₃ 的产生和消耗在放电过程中同时存在。

表 1 空气放电衍生物主要化学反应^[11]

序号	反应	序号	反应
R1	$e + O_2 \rightarrow O + O + e$	R9	$N + O_3 \rightarrow NO + O_2$
R2	$e + O_3 \rightarrow O + O_2 + e$	R10	$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
R3	$e + O_2 \rightarrow O_2^* + e$	R11	$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2$
R4	$e + CO_2 \rightarrow CO + O + e$	R12	$OH + O_3 \rightarrow O_2 + HO_2$
R5	$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	R13	$O_3 + HO_2 \rightarrow 2O_2 + OH$
R6	$O + O_2 + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$	R14	$H + O_3 \rightarrow OH + O_2$
R7	$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	R15	$H + O_3 \rightarrow HO_2 + O$
R8	$O_2^* + O_2 \rightarrow O_3 + O$		

2 实验系统与实验方法

2.1 实验系统

搭建的定子线棒表面局部放电实验平台如图 1 所示,该平台主要由高压电源、放电气室、局放检测仪、臭氧监测仪、CO 分析仪和气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 等部分组成。其中,高压电源为额定电压 150kV 的试验变压器,放电气室体积为 16L,使用针板电极来模拟表面局部放电,电极为黄铜材。

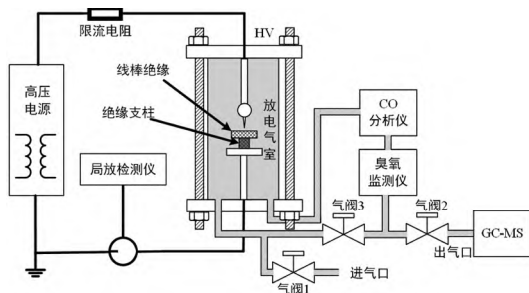


图 1 定子线棒放电实验平台

实验中采用臭氧监测仪、CO 气体分析仪和 GC-MS 对表面局部放电分解气体分析。臭氧监测仪型号为美国 2B 公司的 Model106L,其分辨率为 0.1ppbv。由于 GC-MS 的 CO 和 O₂ 的出峰时间重合,导致其无法有效对 CO 进行分析,研究中使用 CO 分析仪对实验中的 CO 浓度进行检测。CO 分析仪型号为 GXH-3011N,是根据不分光红外线 (NDIR) 原理、朗伯-比尔定律和气体对红外线有选择性吸收的原理设计而成。光学结构采用气体滤波相关技术及高灵敏度探测器,仪器对 CO 的检测范围为 0~500ppmv,灵敏度为 1ppmv。GC-MS 型号为 GCMS-QP2010SE,可以对其他气体产物进行定性与定量分析。

2.2 试样

实验中使用的试样为水轮发电机使用的定子线棒,一种为新线棒,另一种为使用 10 年的旧线棒,旧线棒部分表面覆盖有半导体硅胶。线棒主绝缘是以粉氧云母为基础、环氧树脂为胶粘剂、玻璃纤维补强的热固性 F 级环氧玻璃粉云母绝缘,厚度为 2mm。定子线棒主绝缘外表涂有 SiC 半导体涂层,以遏制局部放电。此外,为遏制定子槽部放电及固定线棒,在定子槽中线棒和铁心之间注入半导体胶。沿定子线棒轴向截取 40mm 长线棒,剖开后去除铜导体作为试样。

2.3 实验方案

每次放电实验前,拆开放电气室并使用无水乙醇擦拭电极及气室内壁,待无水乙醇挥发后,将线棒内表面朝下放置于板电极的绝缘支柱上,然后组装放电气室,进行定子线棒表面局部放电实验。为了使局部放电发生在定子线棒表面,使用直径 2cm、高 3cm 的绝缘支柱支撑线棒试样后放置于针板电极之间,针尖距离线棒表面设置为 0.5mm。

打开气阀 1 和气阀 2,关闭气阀 3,使气路处于开放式状态,以模拟水轮发电机工作过程中的场景,臭氧监测仪内置有气泵,可以将气路中气体流速维持为 1L/min,气体依次流过 CO 分析仪和臭氧监测仪后,使用进样针管将 500μL 气体注入 GC-MS 进行分析。分别对新定子线棒主绝缘、旧定子线棒主绝缘和半导体硅胶进行表面局部放电实验,对放电分解气体进行分析。

3 结果与讨论

3.1 新定子线棒表面局部放电实验结果及分析

将放电电压设置为 8.1kV,使用臭氧监测仪检

测到的 O_3 浓度随时间变化如图 2 所示,由图可知, O_3 浓度在放电初始阶段增大较快,在放电 35min 左右达到饱和。实验中 CO 分析仪未在气路中检测到 CO。放电后定子线棒表面出现明显的电腐蚀痕迹和碳化坑,如图 3 所示。

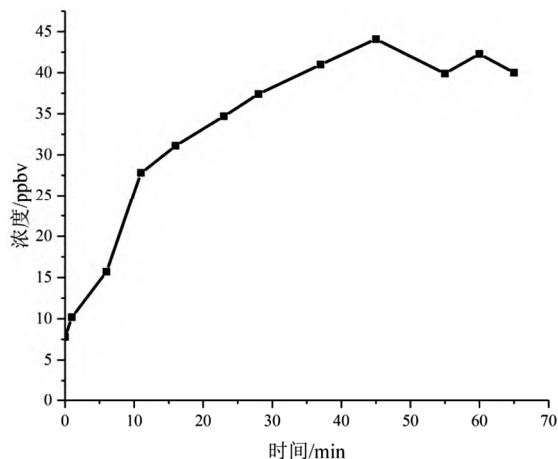


图 2 新定子线棒、试验电压 8.1kV 时 O_3 随时间变化曲线

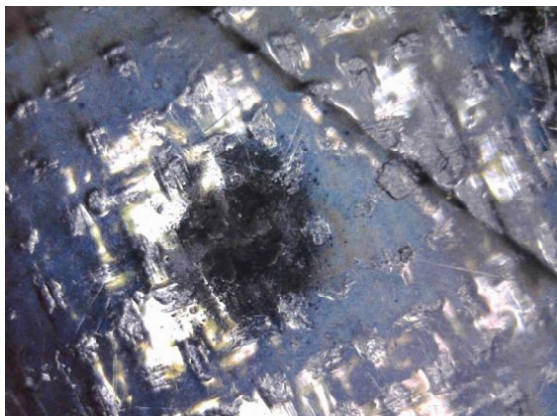


图 3 放电后定子线棒的表面

3.2 旧定子线棒表面局部放电实验结果及分析

将放电电压设置为 8.1kV,试样换为旧定子线棒。使用臭氧监测仪检测到的 O_3 浓度如图 4 所示,和图 2 对比可以看出,同样的放电电压下,旧定子线棒的 O_3 生成速率更高。

3.3 半导体硅胶表面局部放电实验结果及分析

将放电电压设置为 8.1kV,将旧定子线棒表面半导体硅胶置于针电极下。臭氧监测仪检测到的 O_3 浓度随时间变化如图 5 所示,由图 5 可知, O_3 浓度在放电开始后迅速增大,说明此时 O_3 的生成速率很高,放电 50min 后 O_3 浓度增速明显缓慢。实验后,半导体硅胶表面没有发现碳化坑和电腐蚀痕迹,说明半导体硅胶具有较强的抗电腐蚀能力。

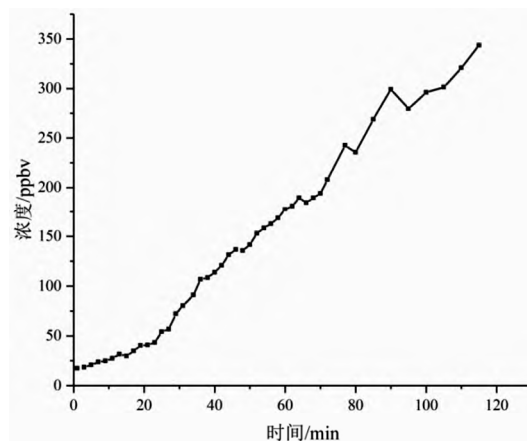


图 4 旧定子线棒、试验电压 8.1kV 时 O_3 随时间变化曲线

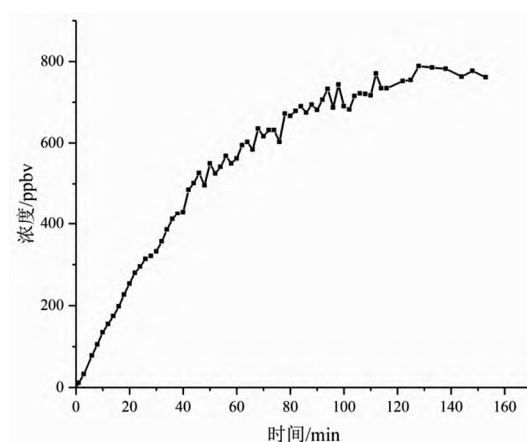


图 5 半导体硅胶、试验电压 8.1kV 时 O_3 随时间变化曲线

3.4 臭氧衰减测试

放电实验后,将电压撤去,同时关闭气阀 1 和气阀 2,打开气阀 3,气路处于封闭循环状态, O_3 浓度随时间的变化如图 6 所示;由图 6 可知,放电结束后 O_3 浓度迅速减小,所以对 O_3 进行监测,宜采用在线监测的方式。

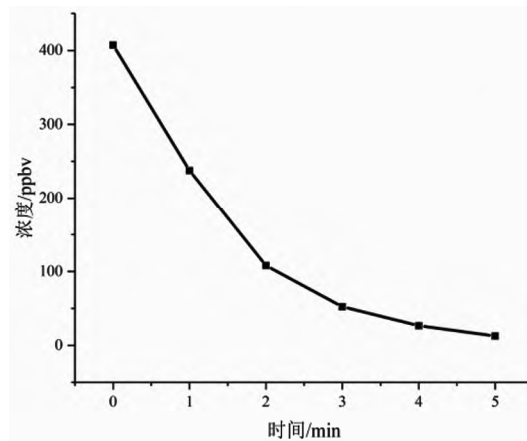


图 6 放电结束后 O_3 随时间的变化曲线

通过对新、旧定子线棒表面材料和半导体硅胶的表面局部放电实验, O_3 非常适合作为定子线棒局部放电特征气体,新定子线棒表面局部放电中 O_3 浓度增大速率最低,半导体硅胶表面局部放电中 O_3 浓度增大速率最高。实验结束后,新、旧定子线棒表面有明显的放电破坏痕迹,而半导体硅胶表面观察不到,说明半导体硅胶有较强抗局部放电能力。实验过程中,未检测到 CO 。

4 结论

搭建了定子线棒表面局部放电实验平台,使用气体监测仪器对局部放电下的分解气体进行了研究,得到的主要结论如下:

(1)新定子线棒和旧定子线棒主绝缘材料在局部放电作用下会发生明显劣化,相同的条件下,旧定子线棒表面局部放电时 O_3 的生成速率更高;(2)定子槽中填充的半导体硅胶有较强的抗电晕能力,且在放电发生时 O_3 的生成速率最高,易于对局部放电进行监测;(3) O_3 适合作为发电机定子线棒局部放电特征气体,但因其性质非常活泼,必须对其进行在线监测。

水轮发电机内部电磁干扰严重,且振动较强,使用气体检测法可以对水轮发电机实现非接触式在线

监测,具有明显的优势。本文的研究结论可以为基于气体检测法的水轮发电机在线监测提供一定的参考。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

- [1] 陈科元,马山刚,金福宝,等.大型水轮发电机定子线棒局部放电在线监测研究进展及展望[J].西北水电,2022(5):35-40.
- [2] 向天航,顾卫坤,吴小平,等.定子线棒层间电晕成因探究及处理[J].水电与抽水蓄能,2019,5(1):84-87.
- [3] 徐永干.发电机定子绕组局部放电在线监测关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [4] 牛勃,马飞越,丁培,等.臭氧浓度检测技术在开关柜局部放电检测中的应用[J].绝缘材料,2018,51(8):69-74.
- [5] 李康,马凤翔,朱会,等.基于光声光谱技术的 SF_6/N_2 故障分解气体检测中 SF_6 含量对检测灵敏度的影响[J].电工技术学报,2020,35(17):3773-3780.
- [6] 马凤翔,赵跃,李辰溪,等.基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统[J].量子电子学报,2023,40(4):597-605.
- [7] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等.电晕放电下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的分解特性[J].电工技术学报,2021,36(2):407-416.
- [8] 李康,郭润睿, HASSAN J,等.空气局部放电衍生物气体生成规律的研究[J].电工电能新技术,2017,36(8):1-7.
- [9] 张昕冉.开关柜绝缘缺陷气体特征检测研究[D].沈阳:沈阳工程学院,2021.

Study on the Production Law of Decomposed Gas by Partial Discharge on Stator Winding Surface of Hydro generator

ZHANG Meng

(Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to monitor the status of hydro generator by gas detection method, the gas generation rule under partial discharge of stator winding surface of hydro generator is studied. According to the stator rod used in hydro generator, the experimental platform of stator winding surface partial discharge is built. The law of gas generation under partial discharge on the stator winding surface is studied. The results show that O_3 is suitable as the characteristic gas of partial discharge on the stator winding surface. Under the same discharge conditions, the ozone concentration generated by semi-conductive silica gel is larger, and it has stronger resistance to electric corrosion. Filling the stator groove with semi-conductive silica gel is beneficial to the safe operation of stator winding and the on-line monitoring of hydro generator by gas monitoring method.

Key words: hydro generator; stator winding; surface partial discharge; gas detection method