

高温气冷堆核电站主氦风机驱动电机绝缘系统 评定技术研究

汪双灿, 黄慧洁, 管兆杰

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 设计了一套在 0.1 MPa 氦气和空气环境下测试绝缘系统电气绝缘性能的试验装置, 完成了 0.1 MPa 气压下氦气和空气中主氦风机驱动电机绝缘系统模型的局部放电起始电压(PDIV)、起晕电压、匝间冲击、绝缘电阻和工频击穿电压对比试验。试验结果表明: 在 0.1 MPa 气压下, 绝缘系统在氦气环境下的部分绝缘性能较空气中大幅下降, 氦气环境下绝缘系统的 PDIV 值约为空气中的 50%, 起晕电压值约为空气中的 20%~25%, 闪络(击穿)电压约为空气中的 50%。

关键词: 主氦风机驱动电机; 绝缘系统; 局部放电起始电压; 起晕电压

中图分类号: TM305.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)03-0108-04

Assessment Technology Research of Insulation Systems of Helium Circulator Drive Motor for High-Temperature Gas-cooled Reactor Nuclear Power Plant

WANG Shuangcan, HUANG Huijie, GUAN Zhaojie

[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) ., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: A test apparatus that testing for the electrical insulation properties of the insulation systems under 0.1 MPa helium and air environment respectively was designed. Partial discharge inception voltage (PDIV), corona inception voltage, inter-turn impact, insulation resistance and power frequency breakdown voltage of insulation system model for helium circulator drive motor under 0.1 MPa helium and air environment respectively were tested. Test showed that some insulating properties of the insulation system in helium environment dropped significantly compared with that in the air environment at 0.1 MPa pressure, PDIV of insulation system in helium environment is about 50% of that in the air environment, corona inception voltage of insulation system in helium environment is about 20% to 25% of that in the air environment, flashover breakdown voltage of insulation system in helium environment is about 50% of that in the air environment.

Key words: helium circulator drive motor; insulation systems; partial discharge inception voltage (PDIV); corona inception voltage

0 引言

高温气冷堆核电技术安全性能好、综合效益高、用途广泛,是具有广阔应用前景的第四代核电技术。由于氦气具有传热性能好、化学惰性等优点,目前设计的高温气冷堆均选用氦气作为一回路冷却剂^[1]。因此,高温气冷堆中的很多电气设备都在氦气环境下运行,主氦风机驱动电机就是

关键设备之一。已有研究表明,在一定温度下,均匀电场中气体间隙的击穿电压 U 只与间隙气压 p 和距离 d 的乘积有关,即 $U=f(pd)$,称为巴申定律。氦气的击穿特性服从巴申定律,在一定的 pd 乘积时,气体的击穿电压存在最小值。同等情况下氦气的绝缘性能远差于空气,常温常压下,前者击穿电压约为后者的 1/5。相同极板间距时,常压空气的击穿电压值相当于 3 MPa 氦气的击穿

作者简介: 汪双灿(1989—),男,工程师,研究方向为绝缘材料和绝缘系统的检测及相关技术。

电压值,而 7 MPa 氮气下击穿电压值大约是 3 MPa 的 2 倍^[2]。因此空气中的绝缘结构设计可能不适用于氮气氛围,需对氮气环境下绝缘结构的可靠性进行评定。

目前,关于氮气绝缘性能的研究大多集中于氮气或液氮的击穿试验理论分析,针对氮气环境下电气设备绝缘结构绝缘性能的试验数据很少,因此,有必要对氮气环境下绝缘结构的电气绝缘性能做进一步的试验研究。

本文针对试验方案专门设计了一套试验装置,完成了 0.1 MPa 气压下氮气和空气中主氮风机驱动电机绝缘系统模型的局部放电起始电压(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)、起晕电压、匝间冲击、绝缘电阻和工频击穿电压对比试验。

1 绝缘系统试样

1.1 试样结构

主氮风机驱动电机的额定电压为 6.6 kV,模型线圈嵌入模板中制成图 1 所示的绝缘系统模型。模板按照 GB/T 17948.1—2000 附录 A 中结构尺寸制作,由底板、模拟槽以及紧固件组成^[3]。绝缘结构模型的主绝缘、匝间绝缘、浸渍漆及辅助绝缘材料及制造工艺均与实际产品保持一致。考虑到 0.1 MPa 下氮气的绝缘性能较差,为了增加爬电距离,制作样品时将所有线圈的引线加长 30 cm。



图 1 主氮风机驱动电机绝缘结构模型

1.2 试样数量

制备 5 组试样,每组 3 支线圈。其中 2 组在氮气环境下测试,3 组在空气中测试。

2 试验装置

2.1 真空箱

真空箱结构和外观分别如图 2、图 3 所示。真空箱内部采用绝缘板和绝缘涂层进行绝缘处理,内置真空传感器。试验时,绝缘结构样品放入

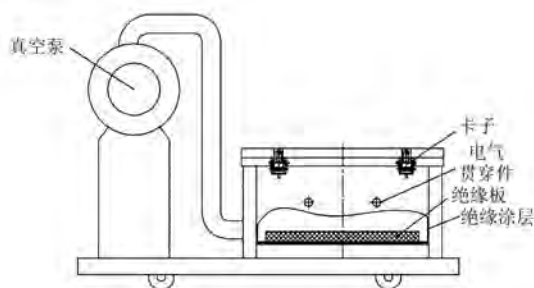


图 2 电气绝缘试验用真空箱结构图



图 3 真空箱

真空箱中,用真空泵抽至真空度低于 10 Pa 后,关闭阀门,停止抽真空,充入高纯氮气(99.99%)至 0.1 MPa 气压,通过电气贯穿件连接样品和外部测试仪器,进行氮气环境下的电气绝缘试验。

2.2 工频耐电压试验仪

使用 2 台工频耐电压试验仪,最大量程分别为 25 kV 和 120 kV,电压精度 $\pm 5\%$,分别用于起晕电压和工频击穿电压试验。

2.3 匝间冲击试验仪

最大量程 50 kV,第一次冲击电压峰值视在波前时间为 $0.2^{+0.3}_{-0.1} \mu s$,试验时电压施加于同一线圈样品两引出线之间,每个线圈冲击 5 次^[4],冲击电压波形如图 4 所示。每次试验可对两个模型线圈的匝间冲击电压波形进行对比,波形一致则测试通过。

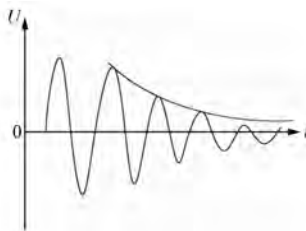


图 4 匝间冲击试验仪输出波形

2.4 工频局部放电测试系统

测试系统原理如图 5 所示。整个系统由屏蔽

房、高压电源、绝缘结构、耦合电容、滤波器和局部放电检测仪等组成,最大量程为 30 kV, 升压速率设定在 25 V/s, 背景噪声 ≤ 2 pC。测试时, 采用校正脉冲发生器对放电量进行校正, 高压端从线圈引线接入, 模板接地, 测试绝缘结构的对地局部放电起始电压(PDIV)。

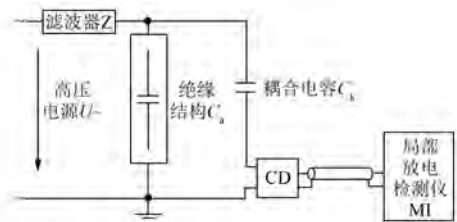


图 5 工频局部放电原理图

2.5 兆欧表

采用上海第六电表厂有限公司的 ZC11D-10 2 500 V 兆欧表进行绝缘电阻测试, 最大量程 2500 M Ω 。

3 试验数据与分析

3.1 工频局部放电试验

将模型线圈放入真空箱内, 工频局部放电测试系统通过电气贯穿件接入, 分别测试模型线圈在氦气和空气下的对地 PDIV, 测试在 0.1 MPa 气压下进行, 氦气下测试了 6 根线圈, 空气下测试了 9 根线圈。

图 6 表示了空气和氦气下绝缘结构 PDIV 的测试结果, 可以看出, 在 0.1 MPa 气压下, 主氮风机驱动电机绝缘结构在氦气中的 PDIV 值均小于空气下的 PDIV 值, 氦气和空气下绝缘结构 PDIV 的平均值分别为 0.77 kV 和 1.67 kV, 相差 2.2 倍。

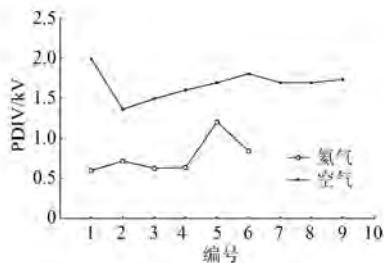


图 6 0.1 MPa 氦气和空气中模型线圈 PDIV 值

3.2 起晕电压

试验中观察到的电晕点均在线圈端口弯弧处, 端口处曲率半径相对较小, 容易形成较强的局

部电场, 导致气体在该区域发生持续的强烈激发和电离, 并形成肉眼可见的电晕^[5]。模型线圈在空气和氦气下起晕电压的测试结果如图 7 所示。在 0.1 MPa 气压下, 模型线圈在氦气和空气中起晕电压的平均值分别为 2.33 kV 和 9.69 kV, 空气中的起晕电压大约是氦气下的 4~5 倍。

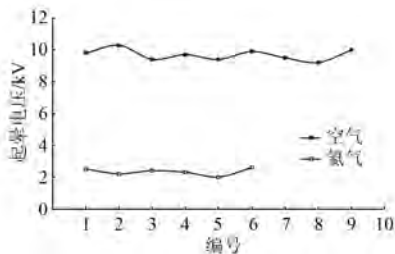


图 7 0.1 MPa 氦气和空气中模型线圈起晕电压值

可以用彭宁效应来解释这一现象。有研究表明, 对于含空气杂质的氦气介质, 当空气含量为 0.2% 时, 彭宁电离作用最强; 在空气含量低于 0.2% 时, 彭宁电离占主导地位, 空气含量增大到 1% 时, 彭宁电离极弱^[6]。试验所用氦气纯度达不到理想的 100%, 氦气箱抽真空后也会有微量的空气残留, 导致试验时绝缘系统处于微量空气和氦气的混合气体中, 容易在相对低的电场下发生彭宁电离, 导致电晕在较低的电压下出现。

3.3 匝间冲击

在空气和氦气环境下, 以 $0.65 \times (4U_N + 5 \text{ kV})$ 的冲击电压对模型线圈冲击 5 次, $U_N = 6.6 \text{ kV}$, 冲击电压为 20.4 kV, 如表 1 所示。由表 1 可见, 匝间冲击试验全部通过, 表明模型线圈在 0.1 MPa 氦气和空气下的匝间绝缘差异不大。

表 1 匝间冲击试验

编号	空气中	氦气中
1	通过	通过
2	通过	通过
3	通过	通过
4	通过	通过
5	通过	通过
6	通过	通过
7	通过	—
8	通过	—
9	通过	—

3.4 绝缘电阻

绝缘电阻测试数据见表 2, 表明模型线圈在 0.1 MPa 氮气和空气下的绝缘电阻比较正常。

表 2 绝缘电阻

编号	空气中/ $M\Omega$	氮气中绝缘电阻/ $M\Omega$
1	>2 500	>2 500
2	>2 500	>2 500
3	>2 500	>2 500
4	>2 500	>2 500
5	>2 500	>2 500
6	>2 500	>2 500
7	>2 500	—
8	>2 500	—
9	>2 500	—

3.5 工频电压击穿试验

试验过程发现氮气环境下线圈高压引线端与接地模板之间的闪络现象非常强烈。经过验证, 发现模型线圈在 0.1 MPa 的空气和氮气中经过击穿试验后并没有真正击穿。说明试验过程中是由于高压引线端与接地模板发生闪络(击穿)导致瞬间短路引起击穿报警。从图 8 可以看出, 氮气的绝缘性能差于空气, 在相同的爬电距离下, 氮气下线圈的闪络(击穿)电压值大约为空气中的 50%。

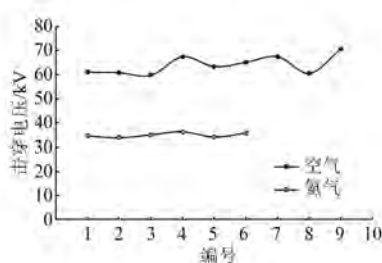


图 8 0.1 MPa 氮气和空气中模型线圈击穿电压值

4 讨论

(1) 0.1 MPa 气压下, 氮气环境下绝缘系统的 PDIV 值约为空气中的 50%, 绝缘系统在氮气环境下的部分绝缘性能较空气中大幅下降。氮气的渗透性远高于空气, 可能是由于在试验过程中氮气渗透进入绝缘系统的孔隙与微量的空气混合, 在较低的电压下发生彭宁电离作用, 产生局部放电。该结论仍需要进一步的试验验证。

(2) 起晕电压值为空气中的 20% ~ 25%, 观察发现起晕现象均发生在各个线圈的弯部。究其原因, 试验时绝缘系统处于微量空气和氮气的混合气体环境中, 在较低的电场下容易发生彭宁电离作用, 弯部电场是最不均匀的地方, 超过放电阈值后其附近气体即形成自持放电, 导致电晕在较低的电压下出现。因此, 对于在氮气环境下使用的绝缘系统应该强化电机整体的防晕结构, 提升起晕电压值; 对于相关的验证试验, 有可能通过低成本、空气下的试验结果, 推出相应氮气条件下所需的结论。

(3) 相同条件下, 氮气环境中绝缘系统表面闪络(击穿)电压值低于空气, 约为空气中的 50%。因此, 为保证在氮气条件下设备的可靠性, 设计氮气条件下的绝缘距离时应留有足够的安全裕度。

(4) 对比发现, 0.1 MPa 空气和氮气环境下, 线圈的匝间绝缘和对地绝缘电阻基本相同, PDIV、起晕电压和闪络(击穿)电压下降较大。在绝缘性能验证过程中可以对性能下降较大的试验项目进行针对性的验证。

5 结语

通过对绝缘系统在 0.1 MPa 空气和氮气环境下的一系列验证, 得到了很多有价值的数据和结论。例如相对空气环境, 绝缘系统在氮气环境下的 PDIV、起晕电压和闪络(击穿)电压性能总体呈下降趋势的, 但是也有部分性能影响不大。氮气环境下的绝缘系统评定应该关注以下几点:

(1) 本文开发的评定方法可以有效地评定氮气下绝缘系统的绝缘性能, 也可在此基础上进行拓展, 对后续的评定试验具有较好的参考意义。

(2) 通过测试绝缘系统在 0.1 MPa 空气下的 PDIV、起晕电压和闪络(击穿)电压的数据可以参考本文结论预估其在氮气下的大致数据, 可节约试验成本、降低试验难度。

(3) 对于在氮气环境下使用的绝缘系统应该强化其整体的防晕结构, 提升绝缘系统的起晕电压或抗电晕能力。

(4) 随着电压的升高, 氮气环境下更易发生电气击穿或放电, 因此, 氮气环境下使用的绝缘系

(下转第 116 页)

估计的位置角与实际初始位置角 34.5° 误差为 0.55° 。

再以图 5(a) A 相转子在 26.5° 为例来验证。根据 A 相转子在 26.5° 位置的三相脉冲电流峰值数据比较可知, A 相脉冲电流峰值为 0.418 A , B 相脉冲电流峰值为 1.285 A , C 相脉冲电流峰值为 0.583 A , 此时转子当前分区为第 IV 区域, 选择式 (4) 估算 A 相初始位置角 θ_{est} :

$$\theta_{\text{est}} = 22.5^\circ + 7.5^\circ \frac{i_{\text{B_peak}} - i_{\text{C_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} = 25.32^\circ$$

估计值 θ_{est} 与实际初始位置角相差 1.18° , 用同样的方法可以得到其他位置初始角度估计误差, 如表 1 所示。由表 1 可知, 该算法估计出的初始位置角误差在 2° 之内, 具有较高的精度。

表 1 初始位置角估计误差

A 相实际位置角/ $^\circ$	A 相估计位置角/ $^\circ$	估计误差/ $^\circ$
24.5	24.00	0.5
26.5	25.32	1.18
28.5	26.94	1.56
30.5	31.78	1.28
32.5	34.36	1.86
34.5	35.05	0.55
36.5	36.61	0.11
38.5	38.38	0.12
40.5	39.95	0.55
42.5	40.63	1.87
44.5	43.22	1.28

4 结 语

针对脉冲电流注入方法需要预设电流阈值问题, 本文在脉冲注入的理论基础上, 提出了一种脉

(上接第 111 页)

统需要更大的绝缘距离, 在设计氦气条件下的绝缘距离时应留有足够的安全裕度以保证绝缘系统的可靠性。

(5) 应用于氦气环境下的绝缘系统的电气绝缘性能必须通过评定, 在以后的评定过程中可以增加不同气压、氦气纯度等评定条件, 在积累足够数据的基础上逐渐形成该类绝缘系统的设计要求及评定规范。

【参考文献】

- [1] 尹清辽, 孙玉良. 从气冷反应堆发展历史看核能技术路线的战略选择[J]. 工程研究, 2007, 3(1):

冲电流峰值包络线线性三角形的初始位置角估计方法, 通过电感分区估计转子初始位置分区, 再通过初始分区选择对应的线性三角形数学模式, 由模型计算出当前转子具体的初始位置角度。该方法不需要复杂运算和额外的硬件电路。最后在一台 1.5 kW SRM 控制平台上, 通过试验验证了该方法的可行性和正确性。

【参考文献】

- [1] 李景男, 王旭东, 周永琴. 基于两相脉冲激励的开关磁阻电动机无位置传感器转子位置检测[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(1): 6-9.
 [2] 罗德荣, 李亚雄, 李孟秋, 等. 基于单阈值的开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 94-100.
 [3] 邵杰, 邓智泉, 胡荣光. 基于改进脉冲注入开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 147-153.
 [4] 李珍国, 王红斌, 王江浩, 等. 基于电流波形检测法的开关磁阻电动机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 97-104.
 [5] 毛宇阳, 邓智泉, 蔡骏, 等. 基于电流斜率差值法的开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 电工技术学报, 2011, 21(9): 87-93.
 [6] 蔡骏, 邓智泉. 基于全周期电感法的开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 145-153.
 [7] 周竟成, 王晓琳, 邓智泉, 等. 开关磁阻电机的电感分区式无位置传感器技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 35-40.

收稿日期: 2017-08-29

242-254.

- [2] 岳珊, 刘兴男, 时振刚. 高压氦气平行极板击穿电压实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 1-7.
 [3] 旋转电机绝缘结构功能性评定散绕组试验规程热评定与分级: GB/T 17948.1—2000[S].
 [4] 交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平: GB/T 22715—2008[S].
 [5] 李伟明, 姚洋. 高压电动机电晕的原因及解决措施[J]. 工业设计, 2012(3): 63.
 [6] 郝艳捧, 阳林, 王晓蕾. 含空气杂质大气压氦气介质阻挡放电中彭宁电离作用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 23-26.

收稿日期: 2017-08-29