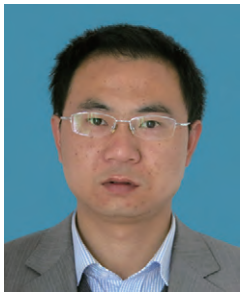


紫外成像法在高压电机定子绕组耐压试验中的应用研究

某发电厂大修期间,在对发电机和高压电动机进行定子绕组的耐压试验中,利用日盲紫外成像仪对电机定子绕组进行了放电检测,并与传统预防性试验方法数据进行了对比分析。研究表明绝缘状态良好的发电机,在直流和交流耐压试验中紫外成像仪均未观测到放电现象,同时其预防性试验数据也符合规程要求;而定子绕组存在老化的电动机,在直流耐压试验中,在低于额定工作电压时,即可观测到较明显的放电,光斑面积随电压的增加而明显增大,泄漏电流与电压关系曲线表现出明显的非线性并超出规程电流值。试验研究表明紫外成像法的评估结论与传统方法具有一致性,相关结论对今后利用紫外成像法评估高压电机定子绕组绝缘具有一定的借鉴意义。

王胜辉 谢志新 詹振宇/华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室 廖一帆/南方电网科学研究院



王胜辉/讲师

关键词/Keywords

高压电机·
日盲紫外成像·
定子绕组·
耐压试验·

高压电机包括发电机和电动机,是发电厂最重要的高压电气设备之一,两者虽然功能不同,但在绝缘结构上类似,发电机和电动机的绝缘结构主要包括槽绝缘、匝间绝缘和端部防晕^[1-2]。高压电机的额定工作电压一般在6~30 kV,其工作电压虽然不高,但工作环境极其恶劣,绝缘结构需要承受电、热、机械振动和环境等因素的联合作用,会导致绝缘结构产生各种老化和劣化现象,如裂解、绝缘结构疲劳、磨损、绝缘污染和吸潮等^[1-6]。据统计,发电机损坏事故中有50%是由定子绕组绝缘损坏引起的^[7-8],可见定子绕组的绝缘是电机绝缘的薄弱环节之一。

特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室开放基金资助(NEL201508),中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZD19)。

为及早发现电机的绝缘缺陷,需定期对电机进行预防性试验,常规的试验项目包括:测量绝缘电阻、吸收比或极化指数及泄漏电流,进行直流及交流耐压试验^[9]。绝缘老化或存在缺陷的电机在耐压试验中一般会形成放电现象,传统放电检测方法有:超声波法^[9]、脉冲电流法^[10]和超高频法等^[11-12],但上述方法不易定位放电位置,且容易受到干扰。日盲紫外成像是近几年兴起的一种非接触、可视化的放电检测方法^[13],在电气设备放电检测中得到了较为广泛的应用^[13-15],借助紫外成像仪可准确定位放电位置并直观地显示出放电的大致轮廓图像,为评估电机的定子绕组缺陷提供了一种新的方法和手段。但紫外成像法应用于电机绕组放电检测的相关文献资料很少^[16-18],相关问题还有待于进一步研究。

利用紫外成像法检测电机放电和评估其绝缘状态,需首先提取相关的放电量化参数。根据放电紫外图像中的光斑区域大小随放电强弱而变化的特点,本文采用数字图像处理算法提取了紫外图像中的放电光斑区域并定义了“光斑面积”参数^[19]。在此基础上,在某火力发电厂大修期间,本文在对发电机和高压电动机进行耐压试验测试期间,采用紫外成像法对定子绕组的端部和内壁放电情况进行了检测,并与传统的耐压试验参数进行了对比,分析了传统测试方法与紫外成像之间的关系,并对放电成因进行了分析。相关的研究结论对今后利用紫外成像法评估高压电机的定子绝缘

状态具有一定的借鉴意义。

发电机耐压试验

试验发电机的额定电压为20 kV，额定功率为300 MW，额定容量为353 MV·A，试验现场如图1所示。



图1 试验现场的发电机

试验时的环境温度为20℃，主要加压设备有GXZ-450谐振试验变压器，配套的控制台及接触调压器。为了能观测到发电机的内部放电，试验是在停机并打开发电机的端盖、抽出转子绕组的情况下进行的。试验时分别给定子绕组施加直流和交流电压，然后利用紫外成像仪检测加压过程中的放电现象。

1. 发电机直流耐压试验

对发电机定子绕组进行直流耐压试验，能够有效地发现其端部缺陷，在进行直流耐压的同时测量泄漏电流可以比测量绝缘电阻更有效地发现一些尚未完全贯通的集中性缺陷，试验时的接线如图2所示。

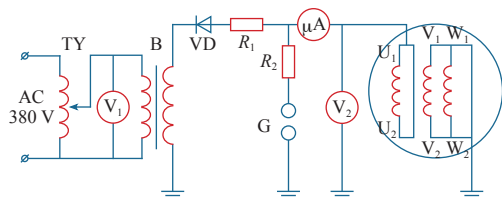


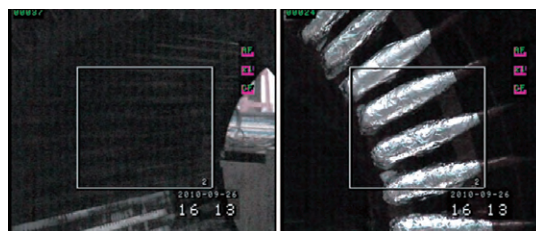
图2 直流耐压试验的接线图

在图2中，TY为调压器；B为升压变压器；VD为整流硅堆； R_1 和 R_2 为保护电阻；由于发电机绕组对地电容较大，故不需在直流高压的输出端另加稳压电容； V_2 为静电电压表。U、V和W分别

为发电机的三相绕组，测试时被试相绕组短接后接高压，非被试相绕组短接后接地。

耐压试验前，用2 500 V兆欧表测试三相绕组间的绝缘电阻均为5 GΩ，该值与历史记录电阻值一致，计算可得不平衡系数为1，该值小于2，符合发电机规程规定。按照《华北电网有限公司交接和预防性试验标准》，试验电压按每级0.5倍的发电机定子额定电压分阶段升压（该发电机的额定电压为20 kV，试验最高电压为 $2.5 \times 20 \text{ kV} = 50 \text{ kV}$ ），每阶段停留1 min，期间利用紫外成像仪观测定子的端部和内壁上的放电情况，并读取泄漏电流值。

在逐步升压直至最高电压的整个过程中，未听到异常放电声，紫外成像仪在发电机定子绕组的内壁和端部也都几乎没有观测到放电现象，电压为50 kV时相应的紫外图像如图3所示。由于整个加压过程中，绕组端部以及内壁都未观测到放电现象，从紫外检测的结果判断该发电机定子绕组绝缘良好。根据试验测量数据可得到该发电机三相绕组间的泄漏电流与电压的关系曲线如图4所示。



(a) 绕组内壁紫外图像 (b) 绕组端部紫外图像

图3 发电机直流耐压试验紫外图像

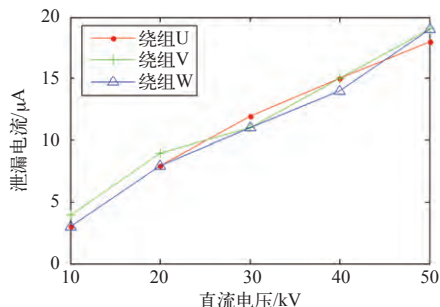


图4 泄漏电流与电压关系曲线

分析图4中的曲线可知，三相电流与电压之间近似为线性关系，且最大泄漏电流为19 μA，小于

规程值20 μA 的要求,三相电流差异很小,根据试验规程判断该发电机的绝缘状态良好。

2. 发电机工频交流耐压试验

工频交流耐压试验的主要优点是试验电压与工作电压时的波形、频率一致,使绝缘内部的电压分布及击穿性能符合发电机的工作状态。工频交流耐压试验是发现发电机主绝缘在槽部和槽口处缺陷的有效方法。按照试验规程,对大修前或局部更换定子绕组并修好后,运行20年以下者,施加的电压最高为 $1.5 U_N$,因此本试验的最高电压为30 kV,由于发电机的电容较大,试验时采用串联谐振法产生工频高压。同样,在整个加压过程中紫外成像仪未观测到放电现象,相关的电流数据如下表所示。分析下表中的数据可知,其各相电流与电压之间同样近似满足线性关系,三相电流的差异很小,结合直流耐压试验结果可知该发电机的绝缘状态良好,与紫外成像法的评估结论一致。

表 工频耐压试验电流数据

电压/kV	10	20	30
A相电流/A	1.40	2.80	4.22
B相电流/A	1.40	2.89	4.31
C相电流/A	1.40	2.88	4.27

电动机耐压试验

在对发电厂的6 kV电动机进行耐压试验过程中,发现其中某型号的增压风机电动机存在较明显的放电现象。该电动机的额定电压6 kV,额定功率为245 kW,12极,星—星接线,对该电动机进行现场试验的照片如图5所示。



图5 现场增压风机试验照片

耐压试验前,首先利用2 500 V兆欧表测试三相绕组对地绝缘,其绝缘电阻均为4 600 $\text{M}\Omega$ 。对定子绕组对地施加直流高压进行直流耐压试验,紫外成像仪的观测距离为5 m。试验发现当电压增加到2 kV时,在定子绕组端部开始观测到零星的放电,但此时基本听不到放电声音,但定子绕组的内壁上无放电。随着电压增加,绕组端部放电光斑区域增加,当电压增加到5.5 kV时开始在定子绕组的内壁上也观测到了零星的放电点,而绕组端部的放电则明显增强,可听到“吱吱”的放电声,电压加到6 kV后放电声音和光斑面积进一步增加。图6和图7分别为不同电压下绕组端部放电和内壁上放电的紫外图像。

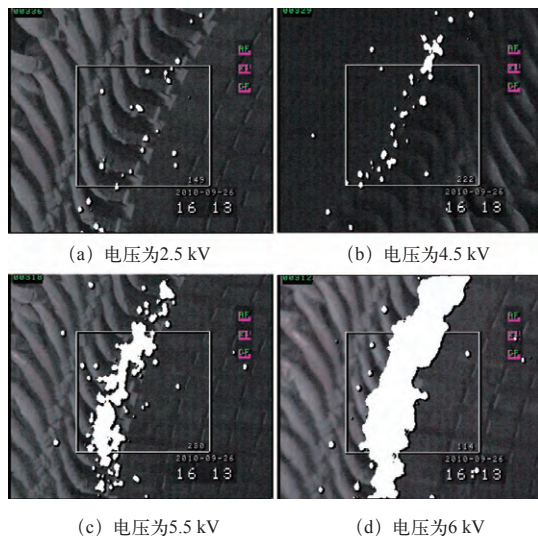


图6 直流电压下定子绕组端部放电紫外图像

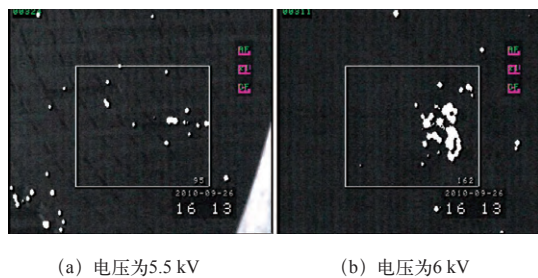


图7 直流下定子绕组内壁放电紫外图像

对图6中的光斑面积进行分析,可以得到其光斑面积与电压的关系曲线如图8所示。

由图8可知,随着电压增加,其光斑面积也相应增加,电压小于4.5 kV时,光斑面积增加相对比较缓慢,当电压超过4.5 kV,随着电压增加,整个

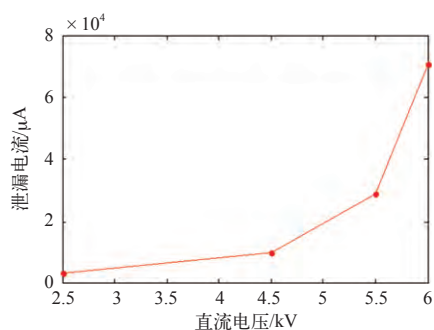


图8 光斑面积与电压的关系曲线

绕组的端部爆发了全面电晕，光斑面积迅速增加。

由于该电动机2 kV左右即开始出现了放电，而其额定的工作相电压为3.46 kV，也即在低于额定工作电压以下即开始出现了放电，且起晕电压还较低，应该属于不正常的放电。为进一步测试其绝缘性能，对该电动机的相间绝缘还进行了直流耐压试验，其中的A相对其他两相泄漏电流与电压关系曲线如图9所示。

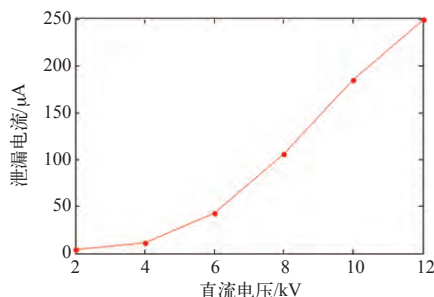


图9 泄漏电流与电压关系曲线

观测该电动机的定子绕组，发现其表面颜色较深，端部存在较明显的气隙，定子绕组内壁的电晕放电处还可见局部烧损的痕迹，相应的图片如图10所示。



(a) 电动机定子绕组端部图像



(b) 电动机定子绕组内壁图像

图10 电动机绕组的图像

分析其放电原因应该是属于绝缘材料老化所致，该电动机在现场运行时间已经达到了12年，定子绕组在长期的电场、热和机械振动等老化因子的作用下逐步形成了一些小的气隙，由于气隙的介电常数较低，因而容易产生电场集中现象，在较低的电压下即可出现放电。

结束语

本文将紫外成像法应用于电机定子绕组耐压试验中的放电检测，研究结论如下。

1) 绝缘状态良好的高压电机设备，绝缘电阻高、直流泄漏电流和交流下的电流值都很小，电流与电压之间近似为线性关系，紫外成像法也未检测到绕组端部和内壁上的放电现象。

2) 定子绕组老化的电机，其泄漏电流值远高于绝缘状态良好的电机，电流与电压曲线具有非线性特性，曲线表现出明显的拐点；电机的起晕电压低，绕组端部和内壁上可形成明显的放电，光斑面积随电压而急剧增加，也具有明显的非线性特性。

3) 于上述试验可知，利用紫外成像法检测高压电机的放电并对绝缘状态进行评估具有其可行性，其检测结果与传统的预防性试验评估结果具有一致性。

但由于紫外成像法在高压电机定子绕组的放电检测中应用时间短，可参考的资料很少，今后有必要积累更多的现场经验和进行更深入的实验室研究，目前可将其作为现场检测的一种辅助测试手段。

参考文献

- [1] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 王远. 发电机定子绕组局部放电超声波检测系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [3] 吴广宁. 电气设备状态监测的理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [5] Fenton R E, Gott B E B, Maughan C V. Preventative maintenance of turbine-generator stator windings [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7 (1): 216-222.
- [6] 彭翔, 贾志东, 王黎明, 等. 大型发电机定子槽楔松动研究及检测 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (30): 9-14.
- [7] 张毅刚, 郁惟镡, 黄成军. 发电机局部放电在线监测研究的现状与展望 [J]. 高电压技术, 2002, 28 (2): 32-35.
- [8] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [9] Hao Yanpeng, Wang Guoli, Jia Zhidong. Application of ultrasonic pulse-echo method to insulation condition diagnosis for large generators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12 (1): 104-113.
- [10] Huang Chenjun, Yu Weiyong. Development of PD on-line monitoring system for large turbine generators [C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, 2002: 23-26.
- [11] 万伟江, 王伟, 李成榕, 等. 超高频法在发电机局部放电检测中的应用 [J]. 高电压技术, 30 (9): 38-40.
- [12] El-Kishky H, Nindra B S, Abdel-Salam M. Experience with development and evaluation of corona-suppression system for HV rotating machines [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9 (4): 569-576.
- [13] Linders M, Elstein S, Linders P, et al. Daylight corona discharge imager [C]. High Voltage Engineering Symposium, London, 1999.
- [14] 张海峰, 庞其昌, 李洪, 等. 基于UV光谱技术的高电压晕放电检测 [J]. 光子学报, 2006, 35 (8): 1162-1166.
- [15] 肖孟, 文曾. 一种新型的绝缘子带电检测方法——紫外成像法 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (6): 42-44.
- [16] 李福兴. 大型发电机定子绝缘诊断和剩余寿命预测 [J]. 华东电力, 2004, 32 (2): 54-56.
- [17] Wang Youyuan, He Yingchun, Li Yinwei. Influence of air pressure on corona at the end of the generator stator bar [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38 (8): 1871-1876.
- [18] 戴日俊. 基于紫外光信号的发电厂高压电气设备放电检测方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [19] 王胜辉, 李楠, 廖鹏. 放电日盲紫外成像检测图像参数提取方法研究 [J]. 华北电力大学学报, 2013, 40 (6): 40-45.

(收稿日期: 2015-08-23) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告