

水轮发电机轴绝缘监测方法及效果分析

朱梅生¹, 李志超¹, 卢继平²

(1. 长江电力股份公司三峡电厂, 湖北 宜昌 443002; 2. 重庆大学, 重庆 400030)

摘要: 当绝缘薄弱时, 低值的轴电压也可能对发电机部件造成一定的危害。结合现场测量数据对轴电压的性质作了分析, 列举出对发电机造成损坏的各种情形。在其检测手段上, 分别对轴绝缘检测法和轴电流测量法的原理进行了分析, 对三峡电站的应用效果作了评估, 比较了两种方法的特点优劣, 提出了应用注意事项和优化手段。

关键词: 轴绝缘; 轴电压; 轴电流; 测量; 效果分析

Monitor method and effect analysis of shaft isolation of turbine generator

ZHU Mei-sheng¹, LI Zhi-chao¹, LU Ji-ping²

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Small shaft voltage can still injure generator parts under weak isolation situation. This paper studies characteristic of shaft voltage and lists several cases that can damage generator. The operation principles are analyzed referring to the shaft isolation detection method and the shaft-current measurement method. Application effects are evaluated in Three Gorges Power Station. A comparison is made between two supervision methods, and matters needing attention and optimization measures are given.

Key words: shaft isolation; shaft voltage; shaft current; measurement; effects analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)04-0126-04

1 轴电压的性质与轴绝缘监视的必要性

由于定、转子之间的气隙不均匀以及定子铁芯的局部磁阻较大、磁路不对称等原因, 导致发电机的定子磁场存在不平衡, 这会使得水轮发电机的转子上产生与轴相交的交变磁通和轴向的感应电势, 即轴电压^[1]。对于水轮发电机, 由于机组转速不高, 且通过设计制造和安装单位对机组安装质量的控制, 机组正常运行时该感应电势对地不会太高, 发电机上端轴电压一般不超过 10 V, 三峡电站机组的轴电压也大致处于这一水平。

图 1 为某型水轮发电机的轴电压现场实录波形, 该型机因定子磁路设计上的问题, 轴电压偏高, 峰值甚至达数十伏。

轴电压谐波特征明显, 但起主要作用的是基波与三次谐波^[2]。以三峡某机型为例, 通过 FFT 分析, (如图 2) 当机端电压为额定时, 三次谐波占整个电压比例的一半以上。清华大学与福建省电力系统研究和生产单位合作, 也获取了有价值的轴电压频谱数据^[3], 结论与三峡机型的特征是吻合的。

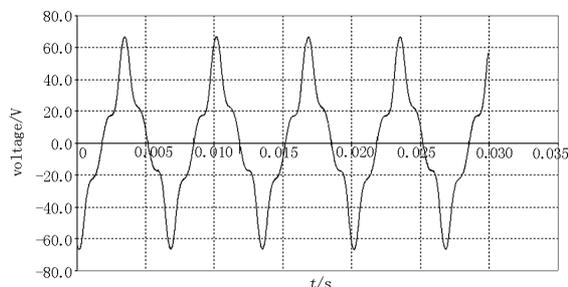


图 1 额定电压下发电机轴电压波形

Fig.1 Generator shaft voltage waveform under rated voltage

尽管轴电势有效值不大, 但在发电机内部各种交变的脉冲磁场的作用下, 其峰值可能很高。对水轮发电机而言, 由于转子大轴电阻很小, 且一般轴承与大轴间只有不到 1 mm 的油膜间隙, 如轴领与大轴间绝缘破坏, 轴电压将沿轴承和底板形成闭合回路产生轴电流。视瓦面油膜破坏情况, 轻则使润滑油劣化进一步恶化轴瓦的运行环境, 轴承震动增大, 重则对轴瓦放电甚至击穿, 对轴瓦造成电气侵蚀, 灼伤瓦面和镜板。除了对瓦面和镜板造成潜在损坏外, 如果轴电流足够大, 还会磁化大轴。已知发生过的故障轴电流最大值可达数百安培。有案

例^[4]表明, 某 200 MW 汽轮发电机发生轴承油膜被轴电压击穿而受破坏, 导致较大轴电流。经过近 4 个月的检修再次起动并列时, 由于轴向剩磁太大, 转轴成为单极直流发电机, 感应电动势产生的轴电流很快使轴瓦冒烟, 被迫再次停机进行严格退磁, 才使剩磁降低。

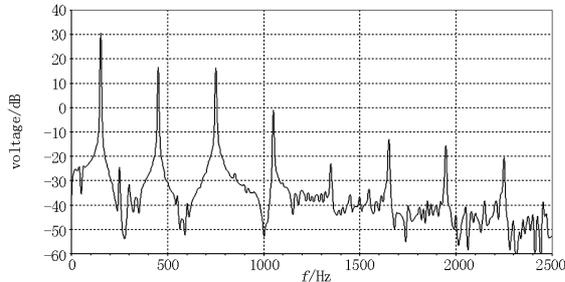


图 2 发电机轴电压 FFT 分析

Fig.2 FFT analysis of generator shaft voltage

正常的轴电压对设备本身并不产生直接危害, 只有在轴绝缘破坏后才产生后果。因此, 轴绝缘的监测的必要性逐渐成为广泛共识。从某种意义上讲, 轴瓦的破坏程度取决于轴电流的幅值和作用时间; 从运行角度来讲, 运行人员需要随时或提前知道轴电流的变化或轴承绝缘的损坏程度。根据这两种取向, 一次设备制造厂家就提出各种对轴绝缘进行监测的方法。

2 轴绝缘监测方法

为了防止轴电流对润滑油和轴瓦的损害, 三峡电站机组主要采用两种防范手段。一是从结构上入手, 在转子下端对大轴碳刷接地, 在上端轴与上端轴领间加酚醛玻璃板绝缘, 以防止轴电流形成回路, 同时限制大轴对地电位; 二是采用轴绝缘监测手段对轴绝缘进行监测, 以保证在轴电流达到轴瓦的破坏电流值以前, 通知运行人员, 采取必要的措施。

三峡机组的生产厂家分别采用了两类不同的轴绝缘监测方案。一类监测方案是加装轴 CT, 通过监测轴电流监视上端轴绝缘情况; 另一类监测方案是采用两块 SINEAX V604 通用可编程变送器利用姆欧法对上端轴轴领、轴领与大轴间的铜箔及大轴间的绝缘进行分段监视, 可参见图 4。

2.1 轴 CT 电流测量法

通过轴 CT 对通过大轴的交流电流的大小进行监测的方法是国内机组制造厂商普遍采用的一种方法。

轴电流监测装置能够通过轴 CT 将发电机大轴上产生的轴电流检测出来, 并根据不同的轴电流值

发出相应的信号, 从而有效地防止轴电流的破坏, 保护轴承及轴领。同时, 轴电流保护装置还可将测量值转换为电流或电压信号送监控记录。

轴电流保护装置由轴电流互感器和轴电流信号装置组成。其结构如图 3 所示。轴电流监测装置主要监测轴电流中的基波分量与三次谐波分量。轴电流互感器在设计上一方面考虑安装拆卸方便性, 设计成两瓣或者四瓣结构, 另一方面考虑监测的灵敏性, 铁芯采用特殊硅钢片卷绕, 可以检测出 1 A 以下的轴电流。

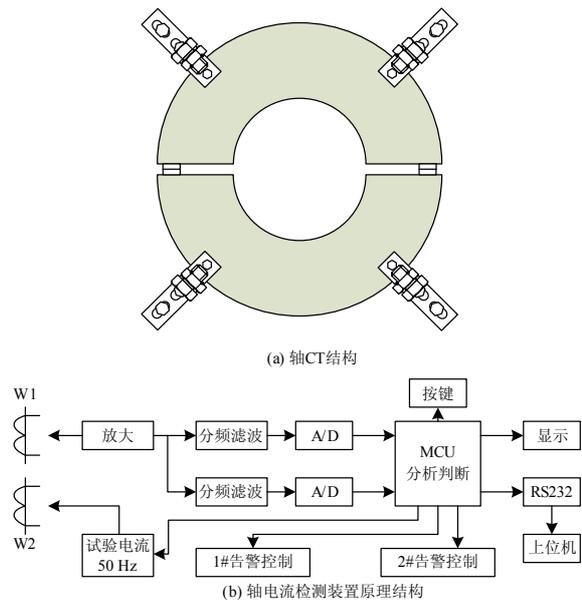


图 3 轴电流保护装置结构示意图

Fig.3 Diagram of shaft-current protection device

轴 CT 正常输出信号较小。为了降低电磁干扰对测量的影响, 采取在 CT 输出端并电阻的方法, 将电流信号转为电压信号引至测量装置, 但该电压信号仅为几十毫伏, 测试不太方便。为了试验方便, 除了工作绕组外, 轴 CT 一般还绕有试验绕组, 以便解决试验信号弱小而存在的检验困难问题。安装测试绕组后, 可通过专门的试验模块, 对轴电流保护进行校验。但在正常运行时, 应注意断开试验绕组, 以防止试验绕组内的感应电流对工作绕组的影响。有些轴电流保护厂家不提供试验绕组电源回路, 估计也有这方面的考虑。

轴电流保护的整定值应以轴瓦所能承受的轴电流作为保护装置整定的依据。据有关资料介绍^[5], 当轴电流密度不超过 0.2 A/cm^2 时, 可以认为不会导致损坏轴瓦。当然, 这是一个相对值, 机械材料不同, 影响也会因材料而异。如果条件允许, 宜对机组正常运行的轴电流进行实际测量后, 再按以上轴

电流密度进行校核，以取得一个合理的整定值。

在实际运行过程中，由于轴 CT 安装于发电机上端轴段，有关资料^[6]表明机组起励电流对轴电流监测装置是有影响的。因此应对轴电流保护设置一定延时，避过瞬时的脉冲电流，并对峰值进行记录分析，这样，既能保证设备的正常运行，又可发现故障隐患，及早处理。

2.2 轴绝缘电阻测量法

三峡 ALSTOM 发电机生产厂商尤为重视轴绝缘的有效监视，从制造结构上在轴领与大轴绝缘层中加装金属铜箔，将轴领绝缘分为两段，并将铜箔用导线引出到大轴表面的金属环上，采用两块 SINEAX V604 通用可编程变送器利用姆欧法对两段分别监视绝缘电阻。通过直接测量轴绝缘电阻来检测轴绝缘情况。当其中的一段绝缘损坏后发信，发电机可以继续运行，两端绝缘都异常后跳闸。图 4 是 ALSTOM 发电机厂商采用欧姆表法进行绝缘测试的连接示意图。

SINEAX V604 通用可编程变送器通过注入幅值为 60 至 380 μA 自适应的恒定电流信号，测量端口电压来计算回路绝缘情况。装置具备多个信号指示灯。当绿灯闪动表明测量传感器开路，表示被测回路绝缘良好。如果测量电阻低于测量整定值，则指示灯变为常亮，指示被测回路绝缘下降。

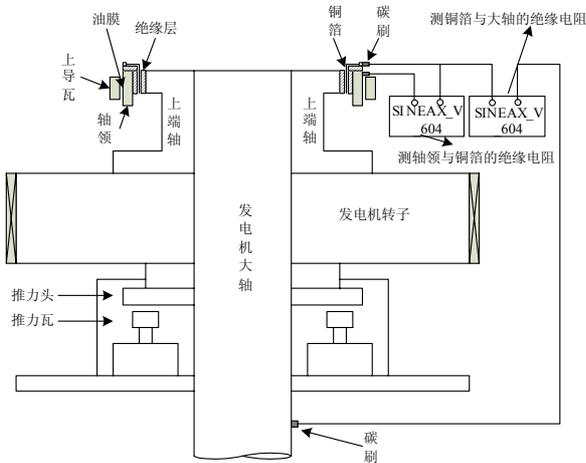


图 4 测量绝缘回路示意图

Fig.4 Diagram of isolation measurement circuit

这种方法还可以实现一些额外的功能试验。比如，在上导轴上进行油膜电阻的测试。尽管结果不完全可信，但当轴有轻微的擦伤或者有热块恶化时，仍然能指示出一定的金属间的联系。如果运行着的电机具有较高的阻值时，表明轴绝缘情况良好。另外，当需了解在高压润滑系统建立油膜、决定启动

系统多快能完成油膜建立或在停机时油膜能支持多久的情況时，也可以使用这种测试。

3 轴绝缘监测装置运行情况分析

采用轴 CT 测量大轴电流的方式，是间接测量方式。由于其安装环境的限制，机组内部强磁场、强电场以及可控硅静止励磁装置产生的脉冲等诸多因素都会影响轴电流的测量。加上轴 CT 的变比较大，其 CT 二次电流多为毫安级，抗干扰能力差，致使轴 CT 测量装置在机组正常运行时，可能就已超过整定值而误发信号。分析认为，引起误差大的主要原因在于：①空间磁场分布不均匀；②轴电流互感器安装平整度、水平度、精密度等方面。

总体上说，由于轴电流测量信噪比低，测量值很难真实反映大轴绝缘情况。由于运行经验不足，在整定上还有待进一步优化，也可以考虑减小 CT 变比来提高信噪比的尝试。

采用 SINEAX V604 注入式轴绝缘电阻监测的方式是一种直接测量方式。对于轴电压不高，且磁路设计良好的轴绝缘，监视效果较好。三峡左岸 ALSTOM 机组轴绝缘装置运行情况良好，在机组运行期间，曾监测到轴领根部由大量碳刷粉末堆积导致的轴绝缘下降，并正确告警。对于磁路和磁场状况不理想的机组而言，轴电压可能较高、所含高次谐波较大时，需对测量回路采用滤波措施。可以在测量回路上并接滤波电容，消除对装置测量的影响。

大轴接地碳刷接地不良将影响轴绝缘监测装置测量。由于三峡机组推力轴承与推力头间无绝缘，仅靠位于推导下端的大轴接地碳刷平衡与大地间的地位差。大轴接地碳刷的好坏，势必间接关系推导轴承的运行安全。因此定期检查大轴接地碳刷的接触是十分有必要的。在进行大轴接地碳刷定期检查或更换工作时应注意检查碳刷在刷握内活动自如，弹簧应压在碳刷中心位置，压力正常，检查发电机碳刷运行正常。

4 结语

本文介绍了三峡机组采用的两种发电机轴绝缘监测方法。

轴绝缘电阻测量方法适用于有中间绝缘体、且有引出线结构的发电机。因为其要注入方波信号，该方波如果直接加在没有绝缘层的发电机上，可能会出现负面的后果。轴绝缘测量法在三峡机组运行中，曾经正确报警，检查发现轴领根部有大量碳刷碳粉堆积，验证了此方法的有效性。

轴 CT 的测量方法理论上它的好处，如果测

量可靠, 甚至可以对趋势进行预测。

目前, 国内还有其它一些方法, 比如在上导瓦外侧与油槽壁绝缘材料中安装引出线等形式, 设计原理大同小异, 而效果仍有待观察。

参考文献

- [1] 奥托·豪斯. 轴电压和轴承电流及其产生原因对电机的影响和补救措施[A]. 电机译文集[C]. 1996.
Otto Huss. Cause and Effect to Machine of Shaft Voltage and Shaft Current and Rescue Measure[A]. in: Machine Translation Collection[C]. 1996.
- [2] 徐海潮. 发电机轴电流检测器[J]. 电测与仪表, 1997, 34(3): 18-19, 24.
XU Hai-chao. Generator Shaft-current Detector[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1997, 34(3): 18-19, 24.
- [3] 刘正超, 李福祺. 发电机气隙距离、磁场强度和轴电压的在线监测[J]. 大机电技术, 2003(2): 6-9.
LIU Zheng-chao, LI Fu-qi. On-line Monitoring of Generator Gap Distance, Magnetic Field Strength and Shaft Voltage[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(2): 6-9.
- [4] 田葳, 李树科. 发电机轴电流的危害及防范措施[J].

电机技术, 2004(4): 28-29.

TIAN Wei, LI Shu-ke. Injure and Defence Measures of Generator Shaft-current[J]. Electrical Machinery Technology, 2004(4): 28-29.

- [5] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(2版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Theory and Application of Power Main Equipment Protection, 2nd ed[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [6] 陈显芳. 轴电流及其监测装置[J]. 东方电机, 1997(1): 72-79.
CHEN Xian-fang. Shaft-current and Measurement Device[J]. Dongfang Electrical Machine, 1997(1): 72-79.

收稿日期: 2009-03-16; 修回日期: 2009-05-24

作者简介:

朱梅生(1973-), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护生产管理工作; E-mail:nftsm@hotmail.com

李志超(1972-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护维护管理工作;

卢继平(1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化的教学与研究工作。

(上接第 123 页 continued from page 123)

- [2] 张健, 郭创新, 顾立新, 等. 基于 TASE.2 协议的数据通信转发在上海电网的实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 70-73.
ZHANG Jian, GUO Chuang-xin, GU Li-xin, et al. Implementation of Data Exchange Based on TASE.2 Protocol in Shanghai Electric Power Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 70-73.
- [3] 孙宏斌, 李鹏, 李矛. 南方电网在线分布式建模设计[J]. 南方电网技术研究, 2007, 3(2): 1-6.

SUN Hong-bin, LI Peng, LI Mao. Design of Online Distributed Modeling System for China Southren Power Grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2007, 3(2): 1-6.

收稿日期: 2009-03-12; 修回日期: 2009-04-01

作者简介:

陈飞(1982-)男, 助理工程师, 从事电网调度自动化工作; E-mail: chenfei@yepg.com

丁士明(1969-)男, 高级工程师, 从事电网调度自动化工作。

(上接第 125 页 continued from page 125)

仅利用一个逻辑与门和过励磁内部逻辑 START 输出就解决了 RET670 过励磁保护无法启动失灵保护的严重缺陷, 并克服了单纯提高 TrPulse 跳闸脉宽整定时间有可能造成误启动失灵保护的安全隐患。因此建议保护厂家尽快修改 RET670 保护逻辑, 以满足 500 kV 保护标准化设计规范要求, 避免过励磁保护无法启动失灵保护的严重安全隐患的发生。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 张举. 微型机继电保护原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

收稿日期: 2009-03-04; 修回日期: 2009-07-20

作者简介:

赵晓明(1976-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护试验和研究工作; E-mail: zjsbd@sina.com

余志慧(1976-), 女, 高级工程师, 从事电力系统运行管理工作。