

抽水蓄能机组发电机断路器回路电阻异常增大原因分析

徐 鹏¹, 秦华蔚², 郑树青³, 高 凯¹

(1. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437; 2. 华东天荒坪抽水蓄能有限责任公司, 安吉 313302;

3. 华东桐柏抽水蓄能发电有限责任公司, 天台 324000)

摘要: 针对抽水蓄能机组发电机断路器主回路电阻异常增大的现象, 笔者从带负荷后的主回路电阻测量、动态电阻测量以及灭弧室解体检查和触头污染物成份检测等方面, 分析得出产生该现象的原因是污染物附着在触头表面, 影响了触头间接触状态。运行过程中, 在较大的负荷电流作用下, 这种影响将会削弱。

关键词: 发电机断路器; 主回路电阻; 动态电阻; 触头污染物

中图分类号: TM56

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)03-0090-05

Analysis of Abnormal Increase of Circuit Breaker Resistance for Pumped Storage Generator Units

XU Peng¹, QIN Hua-wei², ZHENG Shu-qing³, GAO Kai¹

(1. East China Electric Power Test & Research Institute Company Limited, Shanghai 200437, China;

2. East China Tianhuangping Pumped Storage Power Co., Ltd., Anji 313302, China;

3. East China Tongbai Pumped Storage Power Company Limited, Tiantai 324000, China)

Abstract: This paper analyses the reason of abnormal increase of main circuit resistance of generator circuit breaker (GCB) used in pumped storage units. By the means of the main circuit resistance test after large load-current, the dynamic contact resistance measurement, the arc-chute decomposition and the contactor pollutant component analysis, the true reason of circuit resistance abnormal increase is brought forward, that is the pollutant on the contactor impacts on the contact condition of contactor. And the large load-current will weaken this kind of effect on operating.

Key words: generator circuit breaker; main circuit resistance; dynamic resistance; contactor pollutant

0 引言

目前国内大型抽水蓄能机组大部分采用在发电机出口装设断路器(发电机断路器, generator circuit breaker, GCB)的接线方式^[1]。与普通高压断路器相比^[2-4], 由于 GCB 额定电流大, 对电接触可靠性提出了很高的要求; 另一方面因抽水蓄能机组在电网中承担调峰填谷的任务, 启停频繁, GCB 操作次数也比高压断路器多得多, 而从机组的稳定性考虑, 在机组抽水停机时, 往往须要在机组负荷降到零以前拉开 GCB 停机, 这就使得 GCB 经常开断一定的负荷电流。频繁操作且经常开断电流会对 GCB 触头

造成机械磨损、电弧烧蚀^[5]、化学分解物腐蚀和污染^[6-9], 严重影响 GCB 触头性能。

华东某抽水蓄能电厂曾出现多台次 GCB 主回路电阻测试结果异常增长的现象, 笔者针对这种现象, 通过不同的测试和检查手段, 分析了产生这种现象的原因和影响, 提出了应采取的对策。

1 GCB 主回路电阻异常增长现象

华东地区某抽水蓄能电厂安装有 4 台 GCB, 2006 年投运后, 每半年结合机组检修对 GCB 进行主回路电阻测试, 历次测试结果见表 1, 从表 1 可看出, 4 台 GCB 都存在着主回路电阻异常增长的现象。为了保证电厂安全运行, 从 2007 年开始逐台安

排 GCB 的大修。但大修后,主回路电阻测试结果仍然有不规则的增长趋势,说明大修工作并没有彻底解决这一问题。

为了查找问题的原因,进一步明确这种现象对

表 1 GCB 主回路电阻测试结果

Tab. 1 Main circuit resistance of GCB $\mu\Omega$

时间	1 号 GCB			2 号 GCB			3 号 GCB			4 号 GCB		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
交接试验	2	3	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3
2006 年下半年	84	24	39	4	7	6	-	-	-	-	-	-
2007 年上半年	3	3	3	7	16	17	3	4	3	7	17	10
2007 年下半年	4	3	3	9	12	9	-	-	-	-	-	-
2008 年上半年	3	3	3	22	20	22	42	8	24	23	11	18
2008 年下半年	4	5	7	23	24	15	61	42	65	9	4	5

注:1 号 GCB 于 2007 年上半年试验前更换,其后数据为新 GCB 的测试结果;4 号 GCB 于 2008 年上半年试验后更换,其后的试验数据为新 GCB 的测试结果。测试时,施加电流为直流 100~600 A,不同电流下的测试结果基本一致。

设备安全运行的影响,笔者通过带负荷后主回路电阻测试^[10]、动态电阻测试以及灭弧室解体检查和触头污染物检测等方法 and 手段进行了分析研究。

2 带负荷后导电回路电阻测试

常规 GCB 主回路电阻测试前机组处于检修状态,GCB 处于分闸状态,测试时,先操动 GCB 合闸,然后使用回路电阻测试仪进行测试^[11],根据相关标准规定,测试电流应不小于 100 A,为提高测量精度,应尽可能提高测试电流,但受仪器容量限制,目前可用于现场使用的回路电阻仪最大能提供约 600 A 的直流测试电流,因此现场进行 GCB 主回路电阻测试时,一般使用 100~600 A 的直流测试电流,表 1 中的数据即为测试电流在 100~600 A 时的测试结果(电流在 100~600 A 之间变化时,测试结果无变化)。而 GCB 在运行时,主回路中通过较大的负荷电流,在交变电流的电、磁、热等作用下,触头接触表面的污染物,接触面压力等都与通电流前有所差异,使触头接触状况发生变化。常规的主回路电阻测试中,在停机时先拉开 GCB,到试验前再合闸进行测试,此时没有了较大的负荷电流的作用,GCB 触头接触状况与运行过程中可能存在差异。这将使得主回路电阻测试结果无法真实反映 GCB 运行期间触头接触状况^[12],而笔者关心的正是 GCB 运行时的触头接触状况。为了检查 GCB 运行时的触头接触状况,进行了 GCB 带负荷后、保持合闸状态下的主回路电阻测试。

选择某台 GCB 先进行常规主回路电阻测试后,再进行带负荷的主回路电阻测试。安排机组带满负荷发电约 40 min 后,降低机组负荷至零,然后拉开 GCB 上一级断路器停机,保持 GCB 处于合闸状态,进行主回路电阻测试;静置约 30 min 后,再次进行

主回路电阻测试;手动操作 GCB 分合闸后,再进行主回路电阻测试。测试结果见表 2。

表 2 GCB 带负荷后导电回路电阻测试结果

Tab. 2 Main circuit resistance of GCB after large load-current

测试状态	测试 电流/A	导电回路电阻/ $\mu\Omega$		
		A	B	C
常规停机测试	100~600	36~38	15	28
带负荷后,GCB 保持 合闸状态测试	100~400	5~6	4~5	4~5
GCB 保持合闸状态, 静置 30min 后	100~400	5~6	4~5	4~5
经过 1 次分合操作	100~500	36~37	11~12	24~25
再经过 2 次分合操作	100~500	36~37	11~12	24~25

检修时正常停机后,GCB 的主回路电阻测试值较大;而 GCB 通过较大的负荷电流后,保持合闸状态,主回路电阻测试值相对较小,已接近交接试验值(3~4 $\mu\Omega$),静置后,主回路电阻值也无变化。此时若再手动操动 GCB 分合闸,则 GCB 触头接触状态接近于检修时正常停机后进行主回路电阻测试时的状态,而此时的测试结果也接近于检修时的测试值。

测试结果说明 GCB 带负荷前后触头接触状况是有差异的。在 GCB 带负荷后,保持合闸状态,进行的主回路电阻测试,测试结果所反映的触头接触状态可能更接近 GCB 运行时的状态。因此不能仅根据检修时主回路电阻测试结果增大的现象判断 GCB 触头接触状态不良,同时也说明 GCB 触头接触状态在大电流和小电流下的表现是不一致的。

该项试验结果表明:若在常规的测试电流条件下(直流 100~600 A 左右),GCB 导电回路电阻值出

现异常增长,则应提高测试电流(尽量接近于 GCB 的额定电流)进行测试,以排除上述原因的影响。

3 动态电阻测试

由于 GCB 主触头和弧触头的接触电阻相差很大,因此在 GCB 分、合闸过程中,主回路电阻是变化的。动态电阻测试就是利用了这种电阻的变化来检测弧触头的烧蚀和磨损程度^[13-17]。在实际测试中可以利用 GCB 的分闸过程来进行。

在 GCB 分闸过程中,主触头首先分开,电流从主触头转移到弧触头上,经过一段时间后,弧触头再分开。在这段时间内,弧触头是主导电回路,定义这段时间为“弧触头接触时间”。随着烧蚀和磨损程度的加剧,弧触头会越来越短,弧触头接触时间也相应缩短。当缩短到一定程度后,在分闸过程中,主触头分开后,电流无法转移到弧触头上,将直接烧蚀主触头,导致故障甚至事故。由此看出,弧触头接触时间与弧触头的烧蚀和磨损程度是对应的,检测出弧触头接触时间,再与 GCB 的相关技术参数对比即可分析出弧触头的烧蚀和磨损程度。动态电阻测试即是通过测量导电回路电阻的变化来获得弧触头接触时间^[13],评估弧触头的烧蚀和磨损程度^[13,16-17]。

现场进行动态电阻测试时,在 GCB 合闸状态下,对其通以一定的直流电流,然后操动 GCB 分闸,在分闸过程中,测录电压、电流、电阻的变化情况,从而得到弧触头接触时间^[9]。图 1 为动态电阻测试典型测试曲线。

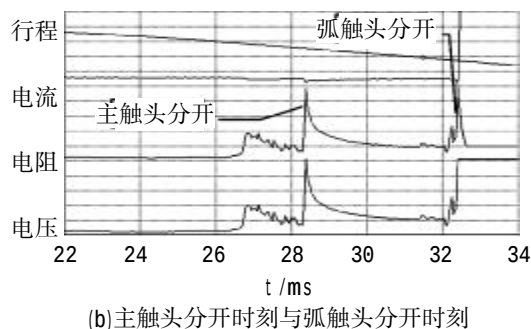
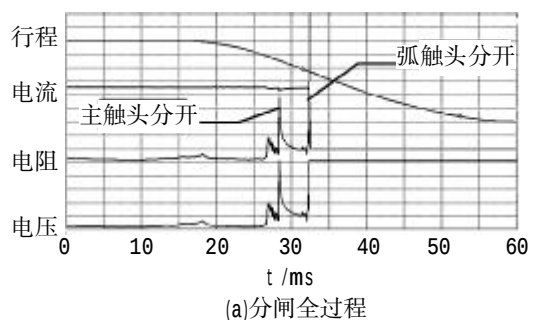


图 1 动态电阻测试典型测试曲线

Fig. 1 The result of dynamic resistance measurement

为了分析 4 台 GCB 弧触头的烧蚀和磨损程度,从 2008 年起定期进行动态电阻测试,结果见表 3。

表 3 4 台 GCB 动态电阻测试结果

Tab. 3 The dynamic resistance measurement result of 4 GCB

GCB	测试时间	弧触头接触时间/ms			备注
		A	B	C	
1 号 GCB	2009-02-27	4.6	4.6	4.6	
	2009-12-09	4.2	4.3	4.1	
	2010-04-23	4.0	4.2	4.0	
2 号 GCB	2009-02-10	4.5	4.6	4.2	
	2009-12-09	4.3	4.4	4.1	
	2010-04-01	3.9	4.0	3.7	
3 号 GCB	2007-12-11	4.3	4.4	4.4	
	2009-03-19	3.5	3.7	3.7	
	2009-09-22	3.4	3.5	3.5	
4 号 GCB	2009-09-24	4.9	4.9	4.9	大修后
	2010-03-05	4.6	4.8	4.5	
	2008-05-27	4.9	4.9	4.9	
4 号 GCB	2008-12-11	4.6	4.7	4.6	
	2009-10-14	4.4	4.5	4.4	
	2010-05-12	4.2	4.3	4.2	

制造厂规定新灭弧室的弧触头接触时间约为 (5.3 ± 0.5) ms,当弧触头接触时间降到 2.5 ms 时应进行大修。从表 3 中数据可以看出,随着运行时间的增长,GCB 机械操作次数和累计开断负荷电流随之增长,弧触头接触时间越来越短,说明弧触头确实存在一定程度的烧蚀和磨损。因此动态电阻测试是检测弧触头烧蚀和磨损程度的有效方法。表中历次测试结果与制造厂提供的大修值相比仍有一定的裕度,不会影响 GCB 的安全运行。

4 解体检查和污染物分析

为了进一步查找影响 GCB 触头接触状态的因素,结合某台 GCB 解体大修,对灭弧室内部情况进行了检查。打开灭弧室后,可以看到弧触头存在较为明显的烧蚀痕迹,但并不十分严重,与动态电阻测试结果相一致。由于主回路电阻测试结果主要反映了主触头的接触状态,因此对主触头进行了详细的检查。

主触头的静触头部分为一铜镀银的导电环;动触头部分为 300 个并联的铜镀银触指。由于 GCB 经常需要带负荷分闸,电流转移由主触头回路转到弧触头回路,会对主触头造成一定的损伤,如果每次的主触头分离都落在电流峰值附近,则这种损伤会更为严重。但对解体后的灭弧室内部进行检查发现主

触头表面损伤并不严重,说明不是由于电流转移对主触头造成的损伤导致 GCB 主回路电阻异常。

对主触头的检查发现导电环上以及触指与导电环的接触面上都布满了一层黑色的物质,见图 2、3。



图 2 主触头导电环上的黑色物质

Fig. 2 The black pollutant on the contact loop



图 3 主触头触指上的黑色物质

Fig. 3 The black pollutant on the contact finger

这层黑色物质呈油泥状,较柔软,很容易被刮下,在导电环与触指相接触的位置上堆积尤多。怀疑正是这层黑色物质的存在影响了触头的接触状况。现场任取 10 个拆下的触指,在清洗前后分别与原导电环固定在一起,测量接触电阻结果见表 4。结果表明,这层黑色物质对 GCB 主触头间的接触状况影响是明显的,应该是影响 GCB 触头接触状态的最直接因素。

对这种黑色物质进行热重分析,失重为 31.8%,说明其中含 30%左右的有机物;经 X 射线光电子能谱分析,其中含有 Ag 和 W。再结合其呈油泥状,较柔软的形态,分析认为这层黑色物质灭弧室装配过程中所使用的润滑脂与 Ag、W 的氟、硫化物的混合物。

这种黑色物质的生成过程可能如下:灭弧室内充满的 SF₆ 气体,在电弧产生的高温中热分解产生氟和硫,它们和电弧放电时蒸发或离子化的金属(主、弧触头表面所使用的银、钨等)形成黑色化合物(硫化物和氟化物),这些化合物与触头表面的润滑脂混合后粘附在触头表面形成一层黑色污染物。

表 4 触指清洗前后接触电阻测试结果

Tab. 4 The contact resistance before and after cleaning the finger

触指编号	接触电阻	
	清洗前/mΩ	清洗后/μΩ
1	1.2~1.5	300
2	1.3	500
3	1.4	700
4	1.3	600
5	2.2	200
6	0.6	400
7	1.4	500
8	1.1	500
9	2.2	700
10	2.1	600

5 GCB 主回路电阻异常增大分析

通过灭弧室解体检查可知,影响 GCB 触头接触状态的因素就是在触头表面覆盖的一层黑色污染物,它是在燃弧过程中产生的。同时由第 3 节的分析可知,GCB 触头接触状态在大电流的作用下会得到改善。综合以上两方面,认为黑色污染物对触头接触状态的影响作用会随着电流的增大而减弱甚至消失。

在 GCB 主触头表面覆盖的这层黑色污染物,导致其接触状况受到影响,从而产生主回路电阻测试结果异常增大的现象。在 GCB 运行过程中,通过较大的负荷电流时,这层黑色油泥状污染物的形态和性质可能发生变化,油泥状的污染物受热变软,触指间的电动力使接触面间的压力变大,从而将触头间的污染物挤开,使接触状况得到改善。GCB 通过较大的负荷电流后,若不再进行分合操作,直接测量主回路电阻,由于此时触头接触状况已得到改善,主回路电阻测试结果相对较小;若 GCB 再经过分合操作,则由于触头运动过程中的推挤,污染物在触头间重新形成了阻碍,造成触头接触面接触状况变差,此时进行主回路电阻测量,结果必然相对较大。

6 结论

1)GCB 主回路电阻测试结果异常增长的情况是由于常规测试方法所使用电流较小,无法消除燃弧产物对触头接触状况的影响所致。在常规测试方法下所得的主回路电阻已无法真实反映 GCB 运行工况下的触头接触状况。

2)对 GCB 导电回路电阻测试结果产生影响的因素是在主触头上覆盖了一层黑色燃弧产物。其对 GCB 触头接触状态的影响作用会随着电流的增大

而减弱甚至消失。

3)不能根据常规方法下导电回路电阻测试结果异常增长的情况直接判断断路器接触不良,而应提高测试电流(尽量接近于断路器的额定电流)进行测试。但便于现场使用的,能提供大电流的试验仪器还有待进一步研究开发。

参考文献:

- [1] 韩晓辉.发电机断路器在大容量机组上的应用[J]. 上海电力学院学报, 2005, 21(3): 229-233.
HAN Xiao-hui, Generator circuit breaker is used in huge capacity power plant[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2005, 21(3): 229-233.
- [2] 葛玉敏, 梁爽.一起断路器故障的综合分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 159-160.
GE Yu-min, LIANG Shuang. Comprehensive analysis of an fault of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 159-160.
- [3] 张若飞, 杜黎明, 张利燕.SF₆高压断路器故障分析[J]. 高压电器, 2010, 46(2): 99-102.
ZHANG Ruo-fei, DU Li-ming, ZHANG Li-yan. Fault analysis of SF₆ high-voltage circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 99-102.
- [4] 李庆玲, 夏辉军, 李宏仁, 等.断路器的应用研究[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 92-94.
LI Qing-ling, XIA Hui-jun, LI Hong-ren, et al. Case studies of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 92-94.
- [5] 郭贤珊, 王章启.高压断路器触头电寿命预测的研究[J]. 高压电器, 1999, 25(3): 43-44.
GUO Xian-shan, WANG Zhang-qi. Research on expectancy of electrical endurance of HV circuit breaker contact[J]. High Voltage Apparatus, 1999, 25(3): 43-44.
- [6] 刘希宽, 刘福刚, 郭淑平.断路器接触电阻分析与总结[J]. 一重技术, 2006(1): 68-70.
LIU Xi-kuan, LIU Fu-gang, GUO Shu-ping. Breaker contact resistance analysis and summary [J]. CFHI Technology, 2006(1): 68-70.
- [7] 杨光章, 继高, 鲍春燕.铜表面硫化膜形成及其电接触特性[J]. 电子工艺技术, 1999, 20(3): 120-122.
YANG Guang-zhang, JI Gao, BAO Chun-yan. Research on sulphuret films of forming on copper surface and the electrical contact properties[J]. Electronics Process Technology, 1999, 20(3): 120-122.
- [8] 黎斌.论 GCB/GIS 的可靠性设计(上)——对用户期盼的回应[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 98-106.
LI Bin. Discussion about the reliability design of GCB/GIS (I)——A response to the customer demand [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 98-106.
- [9] 黎斌.论 GCB/GIS 的可靠性设计(下)——对用户期盼的回应[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 99-106.
LI Bin. Discussion about the reliability design of GCB/GIS (II)——A response to the customer demand [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 99-106.
- [10] GB/T 11022—1999.高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S].
GB/T 11022—1999. Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards[S].
- [11] 狄美华, 李震彪, 吴细秀.开关电器触头电寿命诊断方法综述[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 201-204.
DI Mei-hua, LI Zhen-biao, WU Xi-xiu. Review on diagnostic techniques for electrical endurance of switchgear contact[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 201-204.
- [12] 臧春艳, 何俊佳, 李劲, 等.密封继电器接触电阻与表面膜研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 125-130.
ZANG Chun-yan, HE Jun-jia, LI Jin, et al. Contact resistance and surface film of sealed relay contacts[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(31): 125-130.
- [13] LANDRY M, MERCIER A, OUELLET G, et al. A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers [C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Canada: CIGRE, 2004: A3-112.
- [14] LANDRY M, TURCOTTE O, BRIKCI F. A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 710-716.
- [15] 张丽娜, 陈永义, 梁桂州.关于 GIS 和 SF₆ 断路器的现场检测方法[J]. 高压电器, 2001, 37(3): 47-48.
ZHANG Li-na, CHEN Yong-yi, LIANG Gui-zhou. ON the field detection of GIS and SF₆ circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(3): 47-48.
- [16] 王旭昶, 黄瑜珑, 古金国, 等. SF₆ 断路器不拆卸检测技术[J]. 高压电器, 1996, 32(2): 10-13.
WANG Xu-chang, HUANG Yu-long, GU Jin-guo, et al. SF₆ circuit breaker detective technique without disassembly[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32(2): 10-13.
- [17] 李六零, 丁卫东, 石月春, 等.动态电阻测量法用于评估 SF₆ 断路器灭弧室状况的探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(2): 54-57.
LI Liu-ling, DING Wei-dong, SHI Yue-chun, et al. Dynamic resistance measurement: a new method for online condition assessment of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 54-57.

徐鹏(1977—),男,工程师,主要从事电气设备性能技术监督工作。

郑树青(1978—),男,工程师,主要从事电厂电气设备管理和维护。