油浸式平波电抗器重瓦斯保护误动分析及防治措施

介绍了某换流站两起油浸式平波电抗器重瓦斯保护误动经过，对瓦斯继电器的结构、校验方法及现场测试进行了分析说明，认为平波电抗器在直流系统发生换相失败时，其内部受到大电流的热效应产生油流涌动，并伴随瓦斯继电器本体振动，进而导致重瓦斯保护动作。最后，针对重瓦斯保护动作机理提出了相关防治措施和方法，有效地降低了瓦斯继电器误动的可能性，提升了跨区直流输电系统的运行可靠性。

姜海波　闫兴龙　康建准　孙　亮　薛　飞/国网河南省电力公司检修公司

姜海波/工程师

关键词/Keywords
平波电抗器·
瓦斯继电器·
换相失败·
振动测试·

瓦斯保护是变压器类设备内部故障的主要保护元件，它由轻瓦斯保护和重瓦斯保护两部分组成，结构简单，动作灵敏迅速，对绕组匝间和层间短路、铁心故障、套管内部故障、绕组内部断线及绝缘劣化和油面下降等故障均能灵敏动作[1]。当油浸式变压器类设备内部发生严重故障时，电弧使绝缘材料分解产生大量的气体，并在油箱内形成油流涌动，当油流速度超过瓦斯继电器挡板的设计值时，瓦斯继电器的挡板触动继电器接点导通，启动非电量保护使断路器跳闸，从而避免了事故扩大[2]。

通过对某换流站油浸式平波电抗器（以下简称为“平抗”）重瓦斯保护动作的原因以及延伸故障中暴露出的问题进行分析，发现直流系统换相失败时，平波内部受到大电流的热效应产生油流冲击并伴随瓦斯继电器本体振动，进而导致重瓦斯保护动作。最后，结合实际情况，提出了相关防治措施和方法，有效降低了瓦斯继电器误动的可能性。

故障情况

1. 系统介绍

某换流站连接西北与华中电网，传输额定功率为 750 MW，换流站西北侧与华中侧换流阀通过一台平抗相连。平抗额定电压为 167 kV，额定电流为 4 500 A，电感值为 121.14 mH，充油油重量为 32 700 kg。该平波采用 ODAF 冷却方式，即安装三组冷却器，每组有一台油泵、三台风机。

2. 故障介绍

截止 2011 年 12 月，该换流站共经历六次电流值为 11 kA 以上换相失败，其中只有两次发生平波瓦斯动作。发生两次事故后，运检人员都对现场一、二次设备进行检查，检查情况如表 1 所示。

表 1　检查情况汇总

序号	检查项目	检查结果
1	本体检查	平抗本体无油迹，油位指示符合温度曲线，油温显示正常
2	气体继电器检查	瓦斯继电器内无气体，观察窗内油颜色正常，接线盒密封良好，无受潮痕迹
3	冷却器检查	冷却器工作正常，冷却器停止时油泵负压区无渗漏
4	油枕检查	油枕呼吸器管路畅通，油枕无渗、漏油
5	绝缘油油化试验	分别采集平抗本体上、中、下三个部位油样，色谱分析数据未见异常，具体最大数据为 CH_4：4.23 μL/L；C_2H_4：0.35 μL/L；C_2H_6：0.65 μL/L；C_2H_2：0 μL/L；H_2：8.69 μL/L；CO：70.66 μL/L；CO_2：533.87 μL/L

中国知网　https://www.cnki.net

（续）

序号	检查项目	检查结果
6	回路检查	对瓦斯继电器二次回路接线、回路绝缘进行检查，未发现异常；分别对回路进行传动，传动结果正确
7	高压试验	铁心、夹件及绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比及极化指数测量，绕组连同套管的介损，绕组直流电阻测量，试验结果未见异常
8	OWS 显示报文	华中侧任一桥臂换相失败被检测到，平抗重瓦斯跳闸，直流系统闭锁

3. 故障波形分析

根据故障录波数据显示，在平抗重瓦斯保护动作前，交流系统电压均有扰动，且发生换相失败。

以第一次平抗重瓦斯动作为例进行分析。2010 年 2 月 7 日，直流系统发生第一次换相失败，直流最高达到 10 940 A，故障电流持续大约 36 ms 后降为零，再经过 75 ms 后恢复至 4 500 A。经过 936 ms 后再次发生第二次换相失败，此时直流电流最高达到 11 090 A，故障电流持续约 34 ms 后降为零，再经过 45 ms 后开始逐渐恢复，当直流电流达到 4 422 A 时，平抗重瓦斯保护动作。第二次换相失败，波形如图 1 所示。

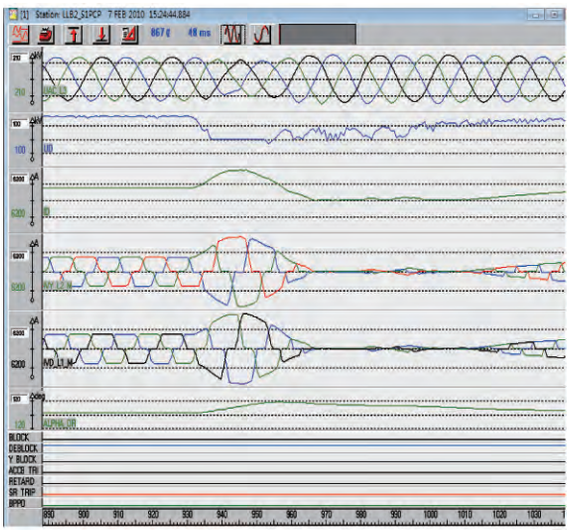

图 1　第二次换相失败

重瓦斯保护动作时间为第二次换相失败之后的 113 ms，动作信号持续时间为 92 ms。重瓦斯保护动作后，控制系统立即执行直流闭锁，同时跳开两侧交流开关，具体波形如图 2 所示。

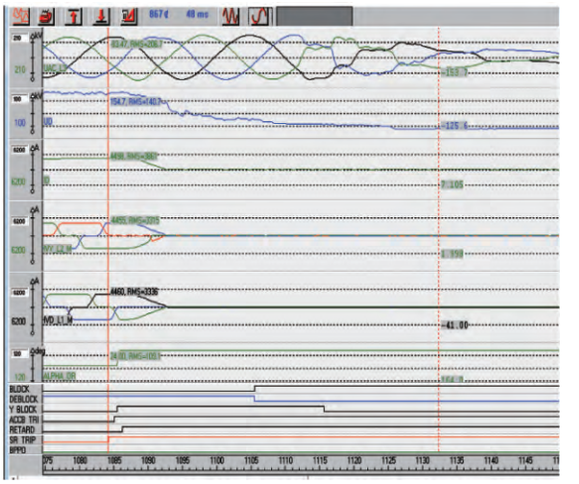

图 2　重瓦斯动作信号

根据换流站一、二次设备检查情况，初步判断原因为直流系统短时连续两次换相失败，故障电流引起平抗绝缘油温度升高，促使油体积膨胀出现油流涌动，达到瓦斯继电器挡板动作值，致使重瓦斯保护动作。由于控制系统动作正确，换相失败很快恢复，油流仅短暂维持，重瓦斯动作信号约 80 ms 后复归。为了防止重瓦斯保护再次误动，对瓦斯继电器进行换型，更换成整定值最大为 2.5 m/s 的瓦斯继电器。

2011 年 7 月 31 日，直流系统又发生了一次换相失败，电流峰值达到 11 900 A。此次换相失败恢复时间为 65 ms，再此过程之后又经过 167 ms，直流系统收到平抗重瓦斯保护动作信号，直流系统闭锁。现场检查一、二次设备，未发现异常现象，与第一次平抗重瓦斯动作事故具有相似性。在此期间，即使调整瓦斯继电器定值，也未避免事故的发生。

鉴于两次瓦斯继电器误动均在直流电流达到最大值后约 200 ms 时发生，如果是油流引起的话，瓦斯继电器应该在故障后 100 ms 内动作，可以初步得出结论为瓦斯继电器存在误动的可能性。

瓦斯继电器误动分析

1. 瓦斯继电器结构

瓦斯继电器安装在平抗油箱与油枕之间的连接管道上，采用双浮子结构。在通常工作状态下，它充满了绝缘液体，由于浮力，浮子处在最高位置，具体结构如图 3 所示。

中国知网　https://www.cnki.net

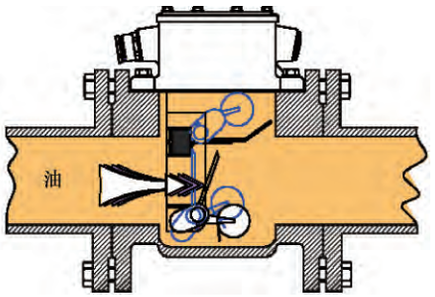

图3 瓦斯继电器结构示意图

当平抗内部出现故障时，瓦斯继电器将会做出如下的反应[3]。

1) 气体积累。在绝缘液中有自由气体，液体中的气体上升，聚集在瓦斯继电器内并挤压绝缘液，随着液面的下降，上浮子也一同下降。通过浮子的运动，将带动一个开关元件（磁性开关管），由此启动报警信号。但下浮子不受影响，因为一定量的气体是可以通过管道向储液罐流动的。

2) 绝缘液流失。由于渗漏造成绝缘液流失，液体水平面下降，上浮子下沉，此时发出报警信号。当液体继续流失，储液罐、管道和瓦斯继电器被排空。随着液体水平面的下降，下浮子下沉。通过浮子的运动，带动开关元件，由此切断连接变压器的电源。

3) 绝缘液故障。由于突发性事件，产生了向油枕方向运动的压力波流。当压力波流的流速超过挡板的动作灵敏度，挡板顺压力波流的方向运动，开关元件因此被启动。

2. 瓦斯继电器校验

平抗采用EMB瓦斯继电器，分别在试验平台上进行动作特性试验、反向油流冲击试验。试验结果显示：积聚气体为260 mL（动作范围为200～300 mL）时轻瓦斯继电器正确动作；油流速度实测为1.096 m/s［定值为1.0 m/s（1±15%）］时重瓦斯继电器正确动作；当反向油流速达1.7 m/s时，轻瓦斯报警节点时通时断，以2.76 m/s的油流速反向冲击三次，继电器内部各部件无变形、位移及损伤，重瓦斯均不动作。

采用抗振能力试验的方法，试验结果显示：在X、Y和Z三个方向分别以40 m/s^{2}的加速度，试验频率为20 Hz，振动时间为1 min时，瓦斯继电器跳闸接点均不会接通。

3. 瓦斯继电器现场振动测试

瓦斯继电器采用管径为80 mm的连接管，安装具体位置为水平方向距器身中心线835 mm，垂直方向距油箱1 100 mm，距油枕正下方400 mm。

为了降低电磁环境干扰，获取瓦斯继电器真实振动数据，特别考虑了加速度传感器、振动测试仪及信号线的安装方式。具体安装方式为：用磁铁吸盘将加速度传感器吸附在油管上，并用布带绑牢；直接将信号线引到平抗本体端子箱与振动测试仪相连；振动测试仪电源取自外部电源，传感器屏蔽线接地。具体试验条件及方式如下：

1) 试验条件。直流输送功率为750 MW，额定直流为4 500 A，平抗油温在55 ℃左右，两组冷却器在运行状态。

2) 试验方式。手动依次起动平波电抗器1#、2#和3#冷却器，记录振动测试仪显示数据，加速度数据如表2所示。

表2 加速度数据

序号	冷却器组数	第一次数据/g	第二次数据/g	第三次数据/g
1	1#	3.2	4.2	3.7
2	1#、2#	7.4	9.5	8.3
3	1#、2#和3#	21.3	19.4	17.8

注：所列数据为多次试验平均值。

通过多次试验发现，瓦斯继电器振动加速度值与冷却器运行组数、起动时刻和油温等因素有关；振动加速度值在冷却器起动瞬间已超过10 g，经过10 s左右才渐进稳定。

防治措施

1. 减少瓦斯继电器振动

为了减少受换相失败时的电流以及冷却器投切的影响，防止瓦斯继电器振动，对平抗瓦斯继电器连管加固，具体加固方式为将两根直径为60 mm的实心铁棒一根垂直固定于箱盖加强铁上，一根倾斜固定于加强铁上，两根实心铁棒上端均支撑于主导气管上用U形卡环固定，且U形卡环用双螺母固定。

通过现场测试，在同样的直流电流作用下，瓦斯继电器振幅随时间衰减，加速度最大为5g，为加固前的1/2，因此，加固瓦斯继电器主油管支

中国知网 https://www.cnki.net

撑结构是避免共振的有效措施。

2. 瓦斯继电器换型

常规换流站的平抗瓦斯继电器采用三副接点，即一副轻瓦斯报警接点、两副重瓦斯动作接点，每副重瓦斯动作接点与对应测控系统相连。如果回路上任意一个元件误动都将直接出口，就可以闭锁直流。为了防止瓦斯继电器误动，对现有继电器进行换型，即一副轻瓦斯报警接点、三副重瓦斯动作接点的瓦斯继电器。采用三取二选择出口，三个保护回路完全相同，具有其各自独立的电源回路、信号输入/输出回路。三个系统同时运行，任意一重保护因故障、检修或其他原因而完全退出时，不影响其他各重保护。瓦斯继电器三取二跳闸回路如图 4 所示。

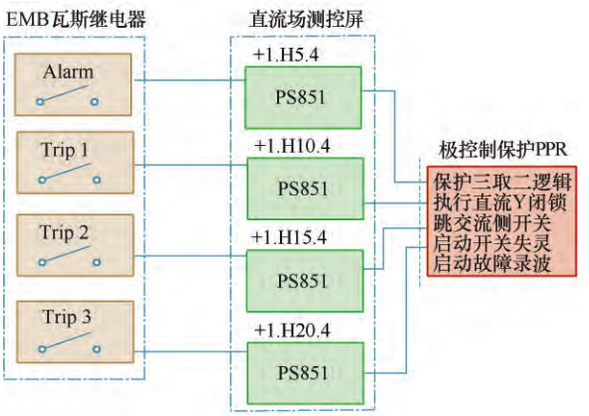

图 4　瓦斯继电器三取二跳闸回路

3. 增设平抗非电量保护装置

常规换流站的平抗都未单独设置非电量保护装置，仅仅是将瓦斯继电器的两副跳闸接点分别接入到直流测控屏。如果瓦斯继电器回路有工作或者需要停用非电量保护时，通常采用两种方式：第一种方式，在控制保护系统软件中强制置 “0”；第二种方式，直接在端子箱或者测控屏断开开入回路。这两种方式存在极大的安全隐患，因此建议增加平抗非电量保护屏，输入/输出回路中设置功能压板、出口压板和回路监测功能，有利于运行方式的灵活调整。

结束语

对瓦斯继电器的结构、校验方法及现场测试进行分析，认为平抗内部受到大电流的热效应产生油流冲击，并伴随瓦斯继电器本体振动，进而导致重瓦斯保护动作。为了防止误动事故再次发生，现场采取了相关防治措施，取得了良好的效果。针对此次事故处理过程，对设计单位、运维单位提出如下建议。

1) 在设计制造阶段，应根据设备的实际情况进行研究分析，特别是首次使用额定电流最大为 4 500 A的平抗，仍然沿用以往的继电器选型模式，值得进一步商榷。

2) 由于无法模拟换相失败时最大的电流，也无法获取油流速速，排除油流涌动导致误动的可能性，现场可采取增加超声波流量计监测油流速度的措施，监测油流数据，以便于事故分析与处理。

3) 合理设计瓦斯继电器安装管路，消除产生本体共振的可能性。与此同时，根据国网 “十八项反措” 要求，应防止瓦斯继电器二次回路异常导致误动事故的发生。

参考文献

[1] 钟天翔，金树军. 500 kV 变压器瓦斯继电器误动作原因分析 [J]. 高压电器，2011，47 (5)：79-82.
[2] 王忠毅，严平. 主变轻瓦斯保护动作后的原因分析及处理 [J]. 高电压技术，2005，31 (5)：87-88.
[3] 何文林，李宏雯，余睿，等. 500 kV 变压器重瓦斯动作的原因分析明 [J]. 华东电力，2006，34 (6)：72-74.
[4] 敖明，梁义明，崔明，等. 一起变压器气体继电器非故障动作原因分析闭 [J]. 变压器，2006，43 (4)：41-43.
[5] 王世阁，周志强，李保福. 变压器气体继电器故障分析与改进措施 [J]. 电力设备，2006，7 (9)：58-60.
[6] 汲胜昌，周冬生，陈锦，等. 空载变压器油箱表面振动信号的初步研究 [J]. 高电压技术，2004，30 (8)：30-32.
[7] 洪凯星，潘再平，黄海. 短路条件下变压器振动特性研究 [J]. 机电工程，2010，27 (6)：88-90.
[8] 谢坡岸. 振动分析法在电力变压器绕组状态监测中的应用研究 [D]. 上海：上海交通大学，2008.

(收稿日期：2014-02-08) EA

中国知网 https://www.cnki.net