

某核电厂 1000MW 发电机组耗氢量高的原因分析

王朝金

中广核惠州核电有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i3.13636

[摘要] 论文对某核电厂1000MW发电机组耗氢量高的问题进行分析,指出真空油箱运行压力高,导致氢气纯度下降;氢气纯度仪显示波动及两个纯度仪测量的偏差;单流环油密封系统其漏氢量相对偏大;发电机密封瓦轴瓦氢侧间隙设置偏大,都将导致氢气消耗量大。论文通过机组的实际运行数据确认了相关分析的正确性及处理措施的有效性,提高了发电机组运行的安全性和经济性。

[关键词] 发电机; 耗氢量; 真空油箱; 压力; 漏氢

中图分类号: TB857+.3 **文献标识码:** A

Analysis of the Reasons for High Hydrogen Consumption of a 1000MW Generator Unit in a Nuclear Power Plant

Chaojin Wang

CGN Huizhou Nuclear Power Co.,Ltd

[Abstract] The paper analyzes the problem of high hydrogen consumption in a 1000MW generator unit of a nuclear power plant, pointing out that the high operating pressure of the vacuum oil tank leads to a decrease in hydrogen purity; The hydrogen purity meter displays fluctuations and the deviation measured by two purity meters; The hydrogen leakage of the single flow ring oil sealing system is relatively large; Setting the hydrogen side clearance of the generator sealing tile shaft tile too large will result in high hydrogen consumption. The paper confirmed the correctness of the relevant analysis and the effectiveness of the handling measures through actual operating data of the generator set, improving the safety and economy of the generator set operation.

[Key words] generator; hydrogen consumption; vacuum fuel tank; pressure; hydrogen leakage

引言

现代大型发电机组普遍采用水氢氢冷却方式,采用氢气作为冷却介质,在运行中会不可避免地出现漏氢现象。漏氢量升高发电机氢气纯度下降时,混合气体的密度随氢气纯度的下降而上升,将导致发电机的通风摩擦损耗增加,降低发电机的效率。氢气纯度每下降1%,通风损耗及转子摩擦损耗将增加11%^[1]。同时氢气也是一类易燃易爆的高危险性物质,一旦泄漏的氢气还没有完全释放,就在厂房内积聚并和周围空气混合,一旦超过了爆炸限值,就有产生氢爆的风险。某核电厂发电机组大修后执行氢气泄漏量检测试验,结果显示发电机氢气泄漏量为16.25Nm³/d,接近试验要求的上限标准(18Nm³/d)。而大修之前的氢气泄漏量检测试验数据约为12-13Nm³/d之间。同时汽轮发电机组的耗氢量约80Nm³/d,远高于电厂其他发电机组的耗氢量20Nm³/d。论文对该机组可能存在的漏氢量及耗氢量大的问题加以研究,并提出具体的解决方法,终于使机组漏氢量偏高及耗氢量高的问题得到解决,提高了电厂运营的安全性和经济性。

1 发电机相关系统介绍

某核电厂使用东方电气集团与ALSTOM合作生产的汽轮发电机组。其发电机额定有功功率为1150MW,极数为4极,额定转速为1500r/m,采用水氢氢冷却方式,即定子绕组采用水(定子冷却水系统GST)冷却,定子铁芯、转子绕组及其相连接线均采用氢气(发电机氢气供应系统GRV)冷却。发电机其它部件损耗所产生的热量,均由氢气带走。氢气流经位于发电机四角处的氢气冷却器(发电机氢气冷却系统GRH),氢气冷却器中通有闭式水(常规岛闭路冷却水系统SRI),将氢气中的热量带走。(发电机密封油系统GHE)发电机密封油压力由油氢差压调节阀来调节,确保密封油压力和发电机内部氢气压力维持一定的差值(约50kPa)且密封油压力高于氢气压力,防止氢气外溢,保证发电机内氢气具有一定的纯度和压力。

2 发电机耗氢量大的原因分析

发电机组氢气的消耗主要有两类:一类是发电机内氢气泄漏引起氢压降低时补充氢压消耗的氢气。另一类是为提高氢气品质手动置换氢气消耗的氢气。由于机组大修后氢气泄漏量检测试验结果(16.25Nm³/d)大于大修之前的氢气泄漏量检测试验

数据(12~13Nm³/d),初步判断该发电机组漏氢量增大,即优先对有可能导致发电机氢气泄漏量增大的原因进行分析排查,再对氢气置换量大的原因进行分析。

2.1发电机漏氢量大的原因分析

发电机内氢气的泄漏可分为两种：一是直接漏到大气中,称之为“外漏”;二是漏到GHE、GST系统、氢气冷却器和封母外壳内,这一部分比较隐秘,因此称之为“暗漏”^[2]。

外漏缺陷一般可通过便携式氢气检测仪检测判断出来,暗漏则需通过对相关系统的参数整体分析对比排查得出结论。在确认发电机内氢气相关系统在线运行状态正常后,我们根据GRV系统流程图,优先利用便携式氢气检测仪对现场可能存在的外漏点进行逐一排查,随后又对发电机氢气供应相关系统的运行状态参数进行详细分析。

(1)检查GRV系统上安全阀正常无泄漏,自动补氢回路减压阀运行正常。

(2)检查GGR(汽机润滑顶轴和盘车系统)\GHE系统运行正常,对比发现运行参数与历史基本一致:密封油入口油压、温度、氢油压差(49kpa)正常,排除氢油压差波动导致氢气泄漏量增大的可能。

(3)重新执行发电机氢气泄漏量检测试验,并对试验中使用的检测仪表进行校验,确认试验数据正确。

(4)检查GST头箱压力、水位基本稳定,其GST顶部排氢管线计数器显示正常,无异常新增,排除GST定子线棒泄漏的可能。

(5)对发电机氢气冷却系统氢冷器周边法兰密封处进行测氢排查,未发现泄漏;对GRH氢冷器顶部排气管进行测氢,未发现泄漏。

(6)对发电机氢气供应系统供氢管线上的阀门、排氢母管、干燥器、监测仪表装置等设备进行测氢排查(优先对大修中进行过检修或拆装的设备进行检查),未发现泄漏。

(7)对发电机端盖、二次测量引出线端口、出线套管法兰及出线罩等氢密封系统处进行测氢排查。未发现泄漏。

(8)研究发现不同结构的密封瓦,漏氢量不同。单流环油密封其结构简单,密封瓦内仅形成一个油环,其漏氢量相对将供油系统分为空气侧和氢气侧两路,使用两个油环的双流环油密封系统较大。

该电站两台使用单流环油密封的机组自商运以来,其氢气泄漏量检测试验结果最小约10Nm³/d,大部分时间为12~13Nm³/d。而上游文件要求机组的氢气泄漏量试验合格标准为<18Nm³/d。调研核电群厂同类发电机组,其发电机漏氢量大部分时间也为12~13Nm³/d。使用双流环油密封的电站其他机组,其氢气泄漏量常年维持在1~2Nm³/d。

(9)GHE氢侧密封回油量变大,导致溶解在密封油的氢气量增加

查询大修后密封瓦间隙测量数据可知,大修发电机解体回装后密封瓦氢侧轴瓦间隙测量值0.22mm较氢侧标准0.11~0.15mm偏大。

GHE回油管线上没有流量计,为了验证密封瓦间隙变化对GHE氢侧密封回油流量的影响,通过隔离相邻两台机组的浮子油箱GHE103CW出口隔离阀后,根据单位时间两机组GHE103CW液位上涨的量计算出两机组GHE氢侧回油流量,详见下表1。

表1 相邻两机组GHE氢侧回油流量计算

数据说明	相邻机组	本机组
GHE103CW计时初始液位	540mm	480mm
GHE103CW计时终止液位	700mm	700mm
GHE103CW计时间容积变化	113.5L	140L
计时时间	2min53s	2min26s
计算回油流量	2.36m ³ /h	3.45m ³ /h

由上表可知:相邻机组GHE氢侧回油流量2.36m³/h;本机组GHE氢侧回油流量3.45m³/h。本机组GHE氢侧回油流量偏大44%,将使发电机内的更多的氢气以溶解氢的方式被密封油带到真空箱中。大修前后发电机内氢油压力及温度没有变化。根据亨利定律:在一定温度下,气体在溶液中的溶解度与该气体的压力成正比。具体方程为:

$C=H \cdot p$ 其中: C是溶质在溶剂中的浓度;

H是亨利常数;

p是气体在气液界面上的压力。

发电机内的氢油压力均没有变化,可以认为p不变,则氢气在密封油中的溶解度不变,而密封油回油量多44%,就代表着氢侧回油中带出的溶解氢多44%,而这部分多带出来的氢气大部分会在真空箱中析出并被风机抽出,进而导致机组GRV系统氢气泄漏率偏高。

2.2氢气置换消耗量高的原因分析

氢气置换耗氢量高是因为提纯频度高造成的,下面对提纯频度高的原因进行分析。

(1)4GRV上游氢气气源纯度低,需要频繁执行提纯操作维持发电机内氢气纯度。

通过取样分析,测得上游氢气来源与发电机补氢口氢气品质相同,且气体纯度、湿度均合格。氢站来氢气体露点为-73℃(要求<-61℃);氢气纯度:<1ppm(要求<10ppm)。排除因上游来氢品质异常导致发电机内部氢气纯度低导致提纯频度增加的可能。

(2)氢气纯度仪显示偏差,导致手动提纯频度增加。

本机组氢气纯度仪探头采用热导式测量原理,其传感器准确度为空气中氢气浓度在80%~100%,满刻度的±1%(当下国内没有精度更高的探头)。检查探头校验历史,确认本机组氢气纯度GRV001/002MG仪表大修校验结果为合格,且自商运以来历次校验均为合格(偏差均在0.2%附近)。两块仪表虽显示有偏差,但均在合格范围内。

同时由于本机组采用DCS控制,主控显示信号由现场测量的模拟信号转化为数字信号,转化过程中会引入量化误差。然后将

数字信号送到KIC系统时, KIC指示与就地指示可能会存在一个0.5%以内的偏差(信号传递通道精度约为0.5%)。

提纯记录文件显示, 在氢气纯度为98%附近时, 现场进行一次氢气提纯, 仅能使得纯度上升约0.1%。而无论是纯度仪显示的波动还是两块纯度仪表的偏差(按显示较低的仪表执行), 都会导致氢气提纯次数增多。

(3) 发电机氢气纯度降低导致提纯频度高。

根据GRV系统提纯记录, 在大修前GRV系统的提纯频率约1.8次/天就能保证氢气纯度在98%以上; 大修后, 提纯频率约2.6次/天, GRV系统氢气纯度仍很难达到98%以上。

调查发现, 大修期间为解决GHE真空油箱真空度过高后GHE101P0汽蚀等问题, 电站将真空油箱的运行压力由17KPa. a调整到27KPa. a, 真空油箱的去除杂质的效率不足导致发电机氢气纯度下降速度增大。

根据亨利定律: 在一定温度下, 气体在溶液中的溶解度与该气体的压力成正比。具体方程为:

$C=H \cdot p$ 其中: C是溶质在溶剂中的浓度;

H是亨利常数;

p是气体在气液界面上的压力。

真空油箱中的压力提高后, 更多气体杂质溶解在密封油中, 析出并排放的气体杂质减少, 最终导致发电机内氢气纯度下降。同时从真空油箱的压力(003MP)与发电机内的氢气纯度短时变化趋势曲线也可以看出, 真空箱压力增加, 氢气纯度下降; 反之真空箱压力下降时, 发电机内的氢气纯度升高。

3 处理措施及效果

3.1 调整GHE密封瓦氢侧间隙, 减少机组氢气泄漏量 $4\text{Nm}^3/\text{d}$

机组在后一次的大修中调整了GHE密封瓦氢侧间隙至标准范围内(0.15mm), 氢气的泄漏率试验重新回到了(12-13 Nm^3/d), 机组氢气泄漏量减少氢气损耗约 $4\text{Nm}^3/\text{d}$ 。

3.2 降低GHE真空油箱运行压力, 提升杂质气体除气效率, 氢气纯度上升, 提纯频率由2.6次/日降至1.8次/日

GHE真空油箱改造后将运行压力降低至原设计值, 机组平均提纯频率由2.6次/日降至1.8次/日。

3.3 优化氢气提纯标准, 氢气提纯频率由1.8次/日降至0.9次/日

为兼顾系统运行的安全性和经济性, 2015年9月电站出版

TOI(临时管理要求), 在确认两个探头均有效(偏差小于2%)的情况下, 采用显示值较高的仪表低于98%, 显示值较低的仪表低于97%, 作为发电机手动氢气提纯的标准。TOI出版后机组功率未变的前提下, 发电机的提纯频率由1.8次/日降至0.9次/日。

3.4 相关措施实施后, 机组每日氢气消耗减少约 50Nm^3

根据理想气体状态方程: $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$, 假设提纯期间发

电机内氢温不变, 即 $T_1=T_2$, 则 $P_1 V_1=P_2 V_2$, 已知发电机内自由空间 $V \approx 135\text{m}^3$, 则单次氢气提纯发电机内0.2bar压力变化的耗氢量:

$\Delta V=(P_1-P_2) \cdot V=0.2 \times 135=27\text{Nm}^3$, 每日机组提纯减少氢气消耗量为 $(2.6-0.9) \times 27=45.9\text{Nm}^3/\text{d}$; 加上机组泄漏率降低的 $4\text{Nm}^3/\text{d}$, 每日减少氢气消耗约 50Nm^3 , 实际氢气消耗量由约 $80\text{Nm}^3/\text{d}$ 下降到约 $30\text{Nm}^3/\text{d}$ 。

4 最终结论

本文针对某核电站汽轮发电机组耗氢量高的问题进行了研究分析, 发现GHE真空油箱运行压力调高后, 真空油箱内的杂质气体除气效率降低将导致氢气纯度下降; 氢气纯度仪显示的波动及偏差, 将导致提纯频率增加和氢气消耗量增大; 采用单流环密封瓦的发电机漏氢量本就较大, 如果密封瓦轴瓦间隙的设置偏大, 将使发电机氢气泄漏量进一步变大^[3]。通过降低GHE真空油箱运行压力, 调整手动氢气提纯标准策略, 减小密封轴瓦间隙等一系列手动, 大大降低了发电机组的耗氢量, 提高了发电机组运行的安全性和经济性。

[参考文献]

[1] 汪耕. 大型汽轮发电机设计制造与运行[M]. 上海: 科学技术出版社, 2012.

[2] 崔凯峰, 陈臻, 曹冬敏. 1000MW超超临界二次再热机组再热汽温控制研究[J]. 电力科技与环保, 2018, 34(06): 1-5.

[3] 曾春. 汽轮发电机组漏氢量大的原因分析及处理[J]. 电力安全技术, 2004, (12): 11-12.

作者简介:

王朝金(1984--), 男, 汉族, 河南省平顶山市人, 工程师, 本科, 研究方向: 核电运行。