

## 浅谈发电机氢气露点上升的原因

李继华

国核示范电站有限责任公司, 山东 荣成 264312

**[摘要]**某核电厂的发电机采用“水-氢-氢”冷却方式冷却发电机腔室, 发电机定子线圈采用水冷却方式, 定子铁芯及转子采用氢气进行冷却, 以防止发电机内部产生热应力及局部过热。氢气露点超标会危害发电机定子绕组的绝缘强度且能加快转子护环应力腐蚀速度。另外, 湿度超标又使得氢气纯度降低, 对机组运行有极大危害。文章旨在分析发电机露点上升的原因, 并提出一系列的解决措施。

**[关键词]**露点; 轴封; 氢气

DOI: 10.33142/hst.v3i5.2624

中图分类号: TM621.3

文献标识码: A

### Brief Discussion on the Reason of the Dew Point's Rising to Hydrogen of Generator

LI Jihua

State Nuclear Power Demonstration Plant Co.LTD, Rongcheng, Shandong, 264300, China

**Abstract:** The generator in this nuclear power plant taking the method by water-hydrogen-hydrogen to cool the generator's chamber. The stator coil uses water to cool, and the stator core and rotor use hydrogen to cool to prevent from the thermal stress and local overheating within the generator. Excessive dew point will harm the strength of insulation of generator stator and speed up the of corrosion of rotor guard ring. In addition, excessive humidity low the hydrogen purity that is very harmful to the plant. The aim of the paper is to analyze the reasons of the dew point's rising of the generation and to propose the solutions.

**Keywords:** dew point; shaft seal steam; hydrogen

### 引言

氢气凭其相对密度小转动阻力小、导热性能好、绝缘性能好等优点, 成为大型发电机最理想的冷却介质, 但是过高的氢气湿度将严重威胁发电机的安全。某核电厂的发电机采用“水-氢-氢”冷却方式冷却发电机腔室, 发电机定子线圈采用水冷却方式, 定子铁芯及转子采用氢气进行冷却, 以防止发电机内部产生热应力及局部过热。

### 1 发电机氢气湿度异常的危害

在氢气冷却的大型发电机中, 氢气湿度超标时影响发电机效率和绝缘, 严重超标时会造成发电机重要部件的损坏, 将严重影响发电机的安全、稳定运行。但并不是发电机内氢气的湿度越低越好, 因为湿度过低时, 会导致发电机电气绝缘材料因机内过于干燥而产生裂纹, 同样会使绝缘下降, 所以发电机内的氢气湿度不应低于-25℃露点温度。

### 2 氢气冷却简介

采用氢气作为冷却介质是因为氢气具有良好的导热性能, 较低的腐蚀性和相对密度小, 对转子的阻力小。然而, 氢气露点超标会危害发电机定子绕组的绝缘强度且能加快转子护环应力腐蚀速度。另外, 湿度超标又使得氢气纯度降低, 对机组运行有极大危害。

正常运行时由氢气单元向发电机腔室供气。氢气在发电机内部由发电机轴上的叶片强迫循环, 流经定子铁芯和转子时带走它们在发电机产生的热量, 通过氢气冷却器散热, 其热量被再循环冷却水带走。发电机正常运行时, 发电机内氢压(414kpa)应高于定子冷却水压(220kPa)。同时定子冷却水进水温度应高于氢气冷风温度, 以防止定子绕组结露。

### 3 设备描述

本文将从密封油、定子冷却水、厂房环境、氢气冷却器、轴瓦、轴封、露点分析仪、干燥器来分析对氢气露点的影响。

具体流程如下所示:

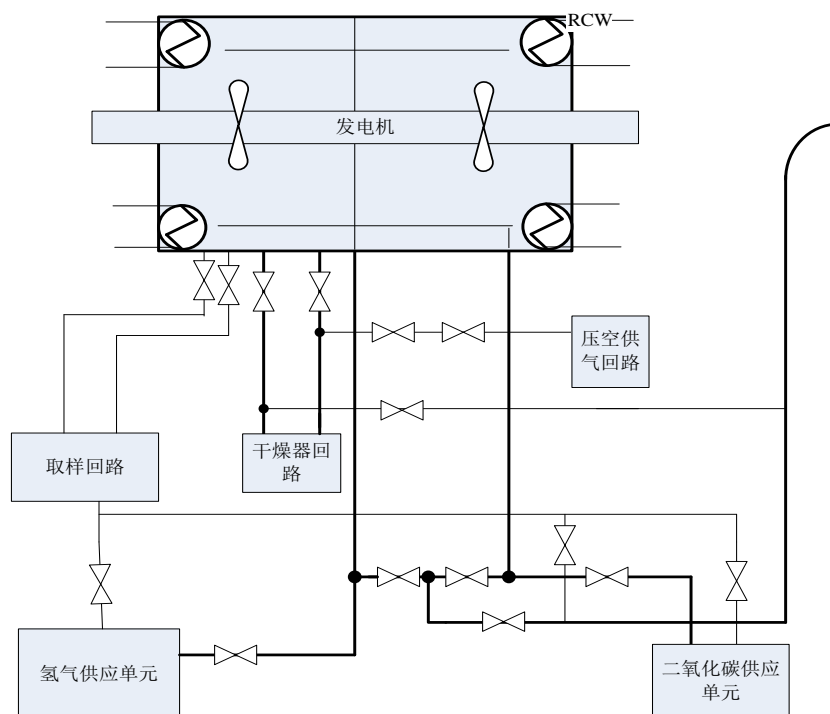


图1 发电机氢气系统流程简图

发电机氢气冷却系统主要由两组氢气供应接口，一组二氧化碳供应单元，一台氢气干燥器，四台氢气冷却器，氢气泄漏监测装置，油水泄漏监测装置以及就地控制盘台、管线、仪表及阀门等组成。

### 3.1 氢气干燥器

干燥器吸收水份饱和后，通过加热器加热干燥器吸水材料以除去其中的水份，可以使干燥器重新活化。通常，发电机运行期间干燥器是投入的，来自发电机的氢气通过干燥器入口隔离阀 4123-V5712 持续进入气体干燥器，而后通过干燥器出口隔离阀 4123-V5713 返回至发电机。

### 3.2 油水泄漏监测装置

为检测发电机内腔液体泄漏，系统中设置了检测装置 4123-LS-5338，当 RCW、定子水冷系统、密封油等出现泄漏及氢气湿度大时，会有液体从发电机内腔流出，4123-LS-5338 会检测到液体液位，当油水泄漏体积到达 800ml 时，发“油水泄漏高”报警。

### 3.3 发电机氢气湿度

为探测发电机内氢气的干燥程度系统设置了两个湿度探测仪 4123-ME5345/5346，正常运行时发电机的氢气湿度小于 5%，当其值大于 15%时触发发电机氢气湿度高报警。

## 4 原因分析

那么综上的系统简介的描述和现场实际运行经验分析，可以发现发电机氢气露点升高的原因如下：

### 4.1 密封油漏入发电机/密封油含水量较大<sup>[1]</sup>

因氢冷发电机在正压下运行，为避免氢气泄露，配有相应的密封油系统。在该核电厂，密封油和润滑油这两个系统是连为一体的，主油箱的油经过油冷器，在经过密封油泵送至密封轴瓦，回油回到主油箱，在主油箱中除去氢气和油烟。轴封蒸汽与润滑油的接触会导致润滑油含水量增加，而密封油又是与氢气直接接触的。由于密封油是使用经冷却后的润滑油，因而由轴封蒸汽进入润滑油中的水分会使发电机氢气的湿度不断增大，这就是引起发电机氢气露点超标的根源。

#### 4.2 轴封蒸汽泄漏<sup>[3]</sup>

机组停运期间,通过轴封系统进入润滑油,如果轴封系统有蒸汽压力,一旦油系统停运将导致蒸汽凝结成水而进入油系统,特别是主油箱的排油烟风机一直运行将形成一定的差压,水汽通过轴封系统进入润滑油系统。

#### 4.3 汽轮机厂房环境,上方空间漏雨水

由于沿海地区天气、台风、梅雨等原因,降水量较大,汽轮机外部的卷帘门防水性能较差,汽机平台上方偶有漏雨。距离汽轮机卷帘门直线距离为十五米的后的房间,为主油箱房间。在主油箱风机运转时,在主油箱内形成一定负压。同时由于主油箱上部为非密封结构,也可能将外部的潮湿的空气引入了主油箱。在经过了用设备冷却水冷却的润滑油油冷器后,进入密封油系统。可能导致密封油系统水分含量升高。

#### 4.4 定子冷却水漏入发电机腔室

经过运行日志的查询发现,定子冷却水水箱的水位时降低的速率较快,水箱补水频率加快。缺失的冷却水,挥发会导致氢气露点上升。

#### 4.5 氢气露点分析仪异常

通过查阅电厂内部报告《氢气露点仪的改进与应用(ITR-1074520-1-0)》<sup>[4]</sup>可知:在新更换氢气露点分析仪之后,发电机氢气露点升高。

主要原因如下:

就地露点仪的计算温度。就地露点仪取样温度原来采用氢气系统的温度,现在改造后的就地仪表可以直接检测温度进行换算。

由于两种传感器的测量原理和电极介质的不同,决定了它们的各自的优缺点。氧化铝传感器的湿度和电信号是非线性关系。变更后的传感器是采用高分子薄膜式湿敏传感器湿度和电信号是线性关系,测试数据稳定,校验周期长。基于以上比较,高分子薄膜式湿敏传感器更适用于现场。

多单位显示减少了人工换算的过程,避免了在换算过程中的人为误差。

通过图2当中观察我们发现,每次露点升高呈上升趋势,那么我们用曲线拟合和最小二乘法拟合方法来导出露点上升的曲线公式。

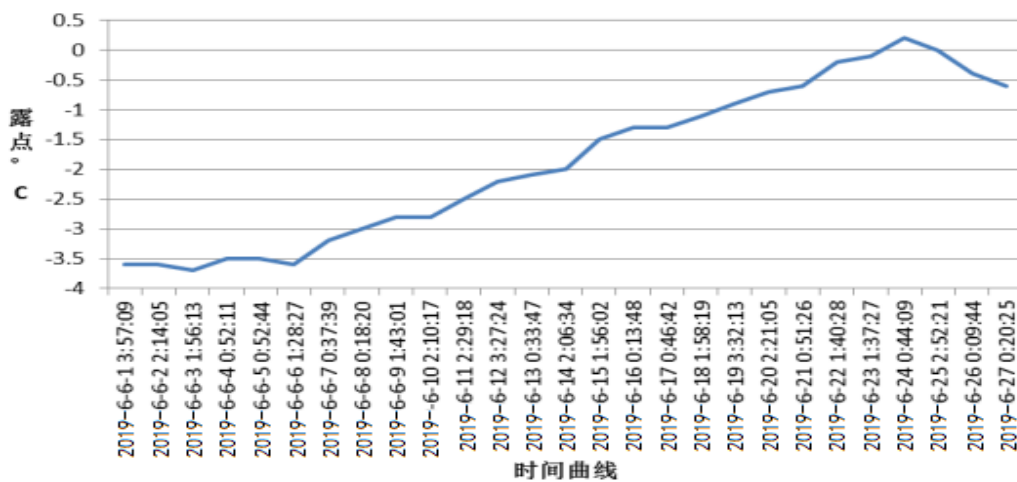


图2 短时间露点曲线图

公式推导过程如下:

原来在没有更换表计的时候,我们几乎从来没有对发电机在满功率运行的时候进行过扫气操作,也就是说,按照原来的表计和原来错误的计算露点的方法,发电机的露点会升高到A值,然后趋于稳定。按照更换后的露点分析仪和新的算法,发电机的露点一直上升,但是我们发现发电机露点上升曲线为指数型,也就是说发电机露点会最终收敛于A。那么

我们假设露点曲线为 $Y=B\ln(aX^2+bX+c)+A$ 型, $X$ 为时间, $Y$ 为露点。发电机内氢气在运行氢压下的允许湿度的高限应为 $0^{\circ}\text{C}$ ,发电机内氢气在运行氢压下的允许湿度范围为: $-25\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,故有必要将运行文件修改至满足国家电力行业标准。


















#### 4.6 氢气湿度过大在氢冷器上结露

发电机启动增大负荷或低负荷运行时(调门试验、换料等需要升降功率的操作),由于氢气冷却器冷却水量调整控制不当或冷却水温过低,流量过大,使部分氢气过冷却产生凝露。

#### 4.7 发电机本体密封不严时,外部环境湿度、温度增加<sup>[2]</sup>

该电厂机组大修时,发电机转子被抽出进行检查,发电机转子和发电机腔室暴露在大气中,当时正值5月,海滨环境下空气湿度大,加上阴雨不断,使空气中的水份含量增加,该地区5月历史天气状况见下表。

表1 天气状况图

日期	最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	天气状况	湿度 (%RH)	日期	最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	天气状况	湿度 (%RH)
2019-05-10	22 $^{\circ}\text{C}$	17 $^{\circ}\text{C}$		96	2019-05-21	23 $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$		80
2019-05-11	23 $^{\circ}\text{C}$	14 $^{\circ}\text{C}$		99	2019-05-22	23 $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$		86
2019-05-12	26 $^{\circ}\text{C}$	14 $^{\circ}\text{C}$		72	2019-05-23	23 $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$		84
2019-05-13	27 $^{\circ}\text{C}$	21 $^{\circ}\text{C}$		72	2019-05-24	23 $^{\circ}\text{C}$	17 $^{\circ}\text{C}$		85
2019-05-14	27 $^{\circ}\text{C}$	21 $^{\circ}\text{C}$		99	2019-05-25	25 $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$		86
2019-05-15	27 $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$		99	2019-05-26	24 $^{\circ}\text{C}$	19 $^{\circ}\text{C}$		90
2019-05-16	23 $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$		84	2019-05-27	23 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$		96
2019-05-17	25 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$		95	2019-05-28	26 $^{\circ}\text{C}$	21 $^{\circ}\text{C}$		92
2019-05-18	24 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$		96	2019-05-29	23 $^{\circ}\text{C}$	21 $^{\circ}\text{C}$		99
2019-05-19	26 $^{\circ}\text{C}$	17 $^{\circ}\text{C}$		86	2019-05-30	24 $^{\circ}\text{C}$	19 $^{\circ}\text{C}$		90
2019-05-20	26 $^{\circ}\text{C}$	13 $^{\circ}\text{C}$		97	2019-05-31	26 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$		86

发电机腔室未全部封盖前,定冷水、氢冷器先期投运。发电机氢冷器于5月11日通冷却水,水温度 $19^{\circ}\text{C}$ 左右低于环境温度,氢冷器管外壁面、定子线圈外体面等处会集湿、结露。此时发电机两侧端盖尚未封盖,定子腔膛两端敞口状态。

发电机多数部件外露时间偏长(本次因有转子解体工作,发电机定子腔膛开口时间超30天,有史以来最长),恰遇持续多日阴雨、湿闷天,汽机厂房大门通开、墙壁风机直吹送风无除湿去潮配置,检修场区湿度较历次大修比都要大许多。

#### 4.8 氢气干燥器工作不正常

如果发电机内氢气露点上升,氢气在正常运行时会通过氢气干燥器,氢气干燥器当中的干燥剂会消耗加快,如果没有加快,则说明干燥器失效。现在该厂较其他电厂的干燥器的容量低,干燥效果较差,导致氢气当中的水汽成分难

以良好的进行吸附，导致氢气当中的露点升高较快。

## 5 结论

影响发电机氢气露点的原因有很多，那么通过本文的分析和论证露点升高的主要原因是轴封、密封油系统和调门试验、换料等需要升降功率的操作引起氢气露点上升。

## 6 控制氢气露点改进建议

发电机氢气湿度异常严重威胁发电机组的安全运行，针对该电厂发电机组的运行现状，为确保氢气湿度在规定的范围内运行，应该从如下角度进行：

每台发电机增加 2 台冷凝式或吸附式干燥器，交替运行，使发电机内的氢气在小流量的连续循环中不断得到干燥。否则，仅靠氢气的补排来降低氢气露点，将造成氢气的巨大浪费，并增加人员的工作量，氢气露点降低的效果有限。

由于轴封蒸汽品质、密封油含水量、氢气露点有着莫大的关系，所以提高蒸汽的品质，降低发电机功率的波动，每日查看主控室关于轴封蒸汽温度和压力 AI，并和现场读取的露点进行匹配，时刻保持对露点的关注。

在汽机启动、停机时，轴封压力调整应该按照规定进行，防止轴封压力过高引起蒸汽串入润滑油中。汽机汽封经过大小修或发现轴封不严时应该及时更换，防止机组大负荷运行时轴封不严而引起轴封蒸汽漏气进入润滑油中。认真调整轴封蒸汽压力，防止压力波动，减少由轴封蒸汽进入润滑油中的水分，减缓氢气露点升高的速度，同时延长润滑油净化器的运行时间，降低润滑油中水分的含量。

正常运行时的湿度控制、发电机检修过程控制和运行方式控制等方面进行综合治理、增加大容量干燥器、监测发电机置换气体的湿度、加强对运行中发电机氢气湿度监测、发电机检修时的过程控制、轴瓦间隙调整、发电机内冷水运行控制、氢气干燥器优化变更、建立良好的轴封蒸汽、减少厂房漏雨水。

## 7 结束语

氢气湿度对氢冷发电机安全稳定运行有着极其重要的意义，氢气湿度大对发电机安全运行产生诸多的危害，对发电机的安全的威胁不容忽视。各电厂都应严格遵守行业标准，无论机组运行或停运，都要监测发电机氢气湿度，一旦发现氢气湿度超标，须及时查明原因并及时处理，使发电机氢气湿度恢复至正常范围内。本文主要介绍了氢气湿度高的危害，并结合机组氢气湿度高的问题，分析了导致氢气湿度异常增加的原因，并提出了相关的改进建议。

### [参考文献]

- [1]王涛英,郭晓宇.发电机氢气露点变化趋势研究及对策[D].北京:全国发电机组技术协,2009.
  - [2]吴贵德.发电机氢气湿度超标原因分析[D].沈阳:东北电力技术,2015.
  - [3]邹正宇.CANDU-6 核电厂系统与运行[D].北京:原子能出版社,2010.
  - [4]诸海川,龙鑫阁.氢气露点仪在重水核电厂的改进与应用[J].工业,2015(12).
- 作者简介：李继华（1979.6-），男，出生于黑龙江省，2010年毕业于长春工业大学工业自动化专业，2000年至2017年就职于中核核电运行管理有限公司运行五处，工程师，2017年至今就职于国核示范电站有限责任公司，主要负责公司技能培训工作。