

# 发电机组厂用冷冻水的设计特点与优劣

陈曦

台山核电合营有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i4.8375

**[摘要]** 发电机组厂用冷冻水用于保证机组相关厂房内系统和设备的可用性,其可用性间接影响到安全系统的稳定运行。伴随着机组体量的增加,发电机组厂用冷冻水系统主要用于冷却相关通风而设计,运行技术规格书对其要求极为严格,需要深入研究透彻。本文就发电机组厂用冷冻水的系统设备、组成和运行方式进行介绍。

**[关键词]** 冷冻机; 膨胀阀; 蒸发器; 温度; 冷凝器

**中图分类号:** U664.5+2 **文献标识码:** A

## The design characteristics and advantages and disadvantages of chilled water for generator set plant

Xi Chen

Taishan Nuclear Power Joint venture Co., LTD

**[Abstract]** generator plant with frozen water is used to ensure the availability of related plant system and equipment, the availability indirectly affects the stable operation of the safety system, with the increase of unit volume, generator plant with frozen water system is mainly used for cooling related ventilation and design, running technical specifications for the requirements are very strict, need thorough study. This paper introduces the system equipment, composition and operation mode of the chilled water used in the generator set plant.

**[Key words]** freezer; expansion valve; evaporator; temperature; condenser

### 引言

发电机组厂用冷冻水系统作为辅助系统虽不直接参与安全功能,但却间接影响安全相关系统的稳定运行,在日常生产工作中具有非常重要的作用,并且确保其稳定可靠的运行将有利于设备的长期可靠性和寿命。

### 1 安全级冷冻水系统简介

安全级冷冻水系统由4列实体隔离的闭路循环冷却回路组成,4列闭路循环冷却回路位于4列安全厂房,每列由1台冷冻机、1台循环泵、1个膨胀水箱、1条旁路管线组成。其中,1、4列冷冻机为空冷形式;2、3列冷冻机为水冷形式,冷却水流量由1个电动三通阀调节。1台循环泵将冷冻水循环通向冷冻机,在其中获得冷却,冷冻水离开冷冻机后被送往用户,然后冷冻水返回到冷冻水循环泵继续循环<sup>[1]</sup>。

安全级冷冻水系统管线设计压力为11bar. g,安全级冷冻水系统向下游用户提供5℃的冷冻水,冷冻水温由冷冻机控制,冷冻水的流量取决于用户的冷却需求,由下游用户的手动调节阀预置一定开度固定冷冻水流量或者由下游用户的电动调节阀自动调节冷冻水流量,为防止流经冷冻机的冷冻水流量过低导致冷冻机的蒸发器结冰,每列冷冻机蒸发器的压差由旁路管线的

电动调节阀控制旁路流量使其维持在0.4bar。

### 2 安全级冷冻水系统原理

为满足多样化需求及避免共模故障,1/4列冷冻机的冷凝器为空气冷却,2/3列冷冻机的冷凝器为水冷却,且由不同的厂家供货。冷冻机主要由以下部分组成:压缩机,冷凝器,膨胀阀,蒸发器。另外,1/4列由于为风冷,其制冷剂较多,还单独设置了储液器。1/4列各设置两台压缩机,2/3列各设置4台压缩机。

#### 2.1 冷冻机的工作原理

冷冻机工作原理简介如下:

(1)压缩:气态制冷剂在压缩机中压缩,温度、压力、密度上升;(2)冷凝:制冷剂在冷凝器中被冷却介质冷却,释放热量。对1/4列而言,冷却介质是空气;对2/3列而言,冷却介质是RRI冷却水。在此过程中,制冷剂压力不变,但由气态变为液态;(3)节流:制冷剂膨胀,其温度压力下降。制冷剂由液相转变为气/液混合物;(4)蒸发:制冷剂被冷冻水加热,吸热蒸发。冷冻水温度下降,实现制冷。

#### 2.2 冷冻机压缩机的控制

1/4列:每个冷冻机由2台压缩机组成,一台压缩机故障,则该列不可用。1台空冷形式的冷凝器、1台蒸发器、1条气态制冷

剂旁路管线、1台制冷剂接收器、1台制冷剂泄漏探测装置、6个消音器、4个空气过滤器、6个空气冷却器和4个风机组成,其中气态制冷剂旁路管线作用是,在用户热负荷较小时,将部分气态的制冷剂直接导向蒸发器而不过滤器冷凝。冷冻机热容量为1100kW。

2/3列:每个冷冻机由4台压缩机,在失去一台压缩机的情况下可以满足设计最大冷却容量,如果两台及以上压缩机不可用,则该列不可用。1台水冷形式的冷凝器、1台蒸发器、1条气态制冷剂旁路管线和1个制冷剂泄漏探测装置组成。冷冻机热容量为1000kW。

1/4列冷冻机每列各有两台压缩机,根据负荷情况选择一台或两台运行。如果第一台压缩机负荷接近最大值(如负荷>95%)且冷冻水出口温度高于额定值(5℃)加上死区,第二台压缩机延时启动。随后第一台压缩机降负荷至50%,第二台压缩机升负荷至50%。当两台压缩机负荷均达到50%后,两台压缩机由负荷控制器同步控制增减负荷;当冷冻水用量减少,负荷下降时,两台压缩机出力均下降。当两台压缩机负荷均小于40%且冷冻水出口温度低于额定值(5℃)减去死区,第二台压缩机自动停运。随后第一台压缩机立即升负荷至60%,以减小冷冻水温度的波动。

2/3列冷冻机每列各有四台压缩机,根据冷冻水温度来调整压缩机的输出功率,以将冷冻水温维持在整定值5℃。当冷冻水用户增多,负荷增大时,会自动加大运行压缩机的输出功率。当运行的压缩机不足以满足功率需求时,会自动再启动一台压缩机,然后负荷均摊;当冷冻水用户减少,负荷降低时,压缩机功率需求下降。当运行的压缩机功率降低至最小允许功率时,会自动停运一台压缩机,然后功率由剩下的压缩机分摊。

在冷凝器和蒸发器之间还安装有一个热气体旁路阀,当仅有一台压缩机运行,且需求功率过低时,此阀门开启将气体制冷剂从冷凝器直接引向蒸发器,为压缩机提供一个最小负荷,避免压缩机在负荷过低时频繁启停。

当冷冻机的压缩机出现故障时,会在监视终端电脑上显示故障报警,同时在主控触发冷冻机部分故障报警。但此报警均为综合报警,触发原因较多。当主控部分故障报警触发后,需到监视终端电脑上查看报警的具体原因。1/4列的冷冻机各有两台压缩机,其压缩机采用风冷形式,导致的压缩机不可用的信号较多。如果有一台压缩机不可用冷冻机的报警裕度降低,需要尽快维修以保证压缩机的可用性。下表列举了1/4列冷冻机的压缩机故障的信号,在冷冻机部分故障报警出现后,其相关信息可以在冷冻机就地面板查看。

### 2.3列磁悬浮压缩机

压缩机将来自蒸发器的低温低压的制冷剂气体压缩成高温高压的制冷剂气体。

磁悬浮离心式压缩机以电磁轴承替代金属轴承,压缩机的电机转子、电机轴、离心叶轮都集成在一起,永磁体轴和双级离心叶轮在运行时悬浮在轴承中,安装在电磁轴承上的位置传感器等将运行状况实时地反馈至轴承控制系统,适时调整轴承,确保转子实时精确定位,并保持在中心位置,使之始终运行在最佳

状态下,实现无油、无摩擦运行。电磁轴承使压缩机运行安静、可靠,无油运行消除了复杂的油路系统,降低运行维护问题和费用,提高了机组可靠性和经济性;制冷剂中不会混入润滑油,而且没有机械磨损,进而不会发生制冷量和效率的衰减<sup>[2]</sup>。

### 2.4冷却电磁阀

BMCC向串口板发送控制信号,串口板通过背板上相应接点向电磁阀供电,电磁阀通过动作向需要冷却的电气元件(IGBT、SCR、电机腔室等)提供制冷剂。

## 3 安全级冷冻水典型故障

对于2/3列冷冻水系统保护逻辑闭锁其再启动,跳闸直接原因为冷冻机蒸发器压力低于3.0bar.g,可能原因有:

(1)蒸发压力传感器测量不准;(2)系统制冷剂有泄漏:手持检漏仪查漏时,发现检漏仪在顶部检修盖处疑似有反应,结合参数曲线和现象,存在制冷剂泄漏的可能。(3)冷冻机温度控制PID设置不佳或压缩机转速调节器性能不佳;(4)冷冻水温度波动导致的调节耦合。

(1)压缩机故障(导叶位置传感器故障,齿轮箱损坏,A104/105开关接线松动或限位故障,绕组温度探头失效,环境温度低导致压缩机频繁启停,426K1卡件故障等)由于外界环境温度较低,存在2台压缩机运行时制冷能力过高,1台压缩机运行能力不足的情况。压缩机电机绕组温度高曾多次出现,主要原因有探头故障、探头受电磁干扰等,此次电机三相绕组温度和轴承温度同时上涨,可排除探头本身问题,同时从压缩机电流、导叶开度、DEL冷冻水温度等判断压缩机负荷有所增加,绕组温度存在真实上涨。(2)旁通阀故障,就地电脑上存在旁通阀故障报警,旁通阀无法参与制冷机组负荷调节,导致压缩机频繁启停,可能造成压缩机损坏。(3)冷凝器液位探头故障(接线松动或探头故障)冷冻机停运后重启,如果频繁启停,可能导致冷冻机坏。(4)制冷剂泄漏,由于冷媒探测的探测器一端与大气相连,探测有机物含量,如果制冷剂泄漏,会被探测到,从而触发报警;如果周围环境有工作(如附近有刷漆工作),也可能导致报警触发,并不一定是制冷剂泄漏。(5)控制柜DELU故障,卡件活控制系统故障会导致冷冻水系统不可用。(6)油加热器故障,如果一个油加热器故障,可能增加冷冻机启动的预热时间。(7)磁悬浮压缩机,对动力电源电压波动十分敏感,多次出现,电压波动后,磁悬浮压缩机故障导致冷冻机故障的情况,当前提高磁悬浮冷冻机的稳定性是最需要解决的问题。

## 4 油加热器SA侧定值与设计不一致

安全级冷冻水系统1/4列使用轴承式压缩机进行做功,该类型压缩机需要油进行润滑,为保证压缩机正常启动和运行,需要将油温保持在合适温度。正常工况下:油加热器由本身的TXS平台控制,设计文件及现场定值均为<70℃启动,>75℃停运。失电的工况下:控制机柜失电,需要将控制逻辑切换至(严重事故控制系统)控制,SA设计图纸及现场定值均为<45℃启动,>65℃停运。但上游设计要求,失电工况下仍需保证油温定值为<70℃启动,>75℃停运。

当进入失电工况后(全厂失电),此时控制电还由蓄电池供电(可供电2h)、LVP和LVS油加热器供电还由12h蓄电池供电,所以此时油温还是由制冷机的TXS控制。如果2h内电源恢复成功,则切SA侧,这时候油加热器由SA侧控制,但是这个时候油温控制一定要至少大于58℃,否则后面即使供电恢复成功,制冷机组后会因为油温低于58℃无法启动<sup>[3]</sup>。

### 5 其他非安全级冷冻水系统

非安全级冷冻水A子系统有四台冷冻机组;非安全级冷冻水B子系统有两台冷冻机组。

这六台冷冻机组都由以下部分组成:

压缩装置

冷凝器

与用户冷冻水子回路相连的蒸发器

膨胀阀

一股热空气旁路用于在冷却负荷很小时使部分气体制冷剂直接回到蒸发器而不经冷却凝制制冷剂泄漏诊断装置,它能探测到向冷冻间内、向冷凝器RRI回路侧或者向蒸发器冷冻水回路侧的制冷剂泄漏非安全级冷冻水A子系统的四列冷冻机组的启停序列通过预选择开关预选一系列来决定。被预选中的一列冷冻水泵启动,30秒后,对应的冷冻机组启动;冷冻水公共回水管线上有一个流量传感器来测量总的冷冻水流量,当此流量超过319m<sup>3</sup>/h时,第二台冷冻机组启动。第二台冷冻机组的选择是在未运行的冷冻机组中自动选择累计运行时间最短的那台;当此流量超过629m<sup>3</sup>/h时,自动启动第三台冷冻机组,即在剩下未运行的冷冻机组中自动选择运行时间最短的那台。当3台冷冻机组

都投入运行,且冷冻机出口总管上的温度传感器测得冷冻水温度超过6℃时,需要手动投入第四台冷冻机组。当公共回水管线上冷冻水流量降到611m<sup>3</sup>/h以下时,停运运行冷冻机组中运行时间最长的那台,30秒后停运其对应的冷冻水泵;当此流量降到301m<sup>3</sup>/h以下时,在剩下的运行冷冻机组当中自动选出运行时间最长的那台将其停运,30秒后停运其对应的冷冻水泵。

当运行的冷冻机组故障失效时,其对应的冷冻水泵延时30秒自动停运。备用冷冻机组自动启动,备用冷冻机组的选择也是根据运行时间来确定的,选出运行时间最短的那台。

### 6 结语

冷冻机通过制冷剂循环系统、水循环系统和电器自控系统相互配合,实现冷却功能。冷冻机的工作原理是利用制冷剂在蒸发器中吸收水中的热量,形成温度差,然后通过压缩机、冷凝器、膨胀节流阀等部件完成制冷循环,最终达到降低冷冻水温度的目的。

### [参考文献]

[1]陈健,高枫,李彦宏,等.风力发电机组实施频率下垂控制的建模与仿真[J].电工材料,2024(03):67-71+75.

[2]周国梁,王昱丹.发电厂单元机组集控运行危险点预控分析[J].中国设备工程,2024(06):127-129.

[3]张亚峰,朱爱华,吕晨勇.某核电站#3发电机进相运行的安全分析[J].电工技术,2020(20):112-114+117.

### 作者简介:

陈曦(1983—),男,汉族,安徽省阜阳市人,本科,台山核电合营有限公司,工程师,研究方向:电站运营。