大型空冷机组直接空冷系统的冻结原因及防冻措施

李　军

山东电力研究院，山东 济南　250002

[摘　　要] 结合华电灵武发电有限公司空冷机组的实际情况，对直接空冷系统在严寒环境下出现的冻裂问题进行了分析，提出了防治冻裂的对策。通过改进空冷岛结构，优化运行过程中不同环境条件下的风量调节等措施，可有效克服直接空冷系统运行中出现的冻结问题，从而提高空冷机组安全经济运行水平。

[关 键 词] 空冷机组；直接空冷系统；空冷凝汽器；空冷岛；冻裂；防冻

[中图分类号] TK264.1

[文献标识码] A

[文 章 编 号] 1002－3364(2008)05－0058－03

1　直接空冷系统的应用

当前用于发电厂的空冷系统主要有3种，即直接空冷（直冷）、表面式凝汽器间接空冷（间冷）和复合式凝汽器间冷系统[1]。直冷机组与常规湿冷机组的主要区别在冷端系统，直冷机组以环境空气而不是以水作为汽轮机排汽的冷却介质，因此，环境空气变化会显著影响直冷系统的运行特性。在直冷机组较集中的我国西部地区，频繁出现沙尘天气，容易导致空冷凝汽器（空凝器）散热器管束的严重积尘，而冬季严寒的气候可能使不合理的空冷系统设计出现散热器管束冻裂现象。此外，直冷系统体积庞大，易出现真空泄漏问题。对此，如果不能及时解决，将会影响机组安全经济运行。

华电灵武发电有限公司2×600 MW机组直冷系统由德国GEA公司设计并供货，系统主要由56个空凝器组成，如果出现局部凝结水结冰，就会发生散热器管束冻裂的情况，影响机组安全运行。56个空凝器分为8排，垂直A列布置，每排有7个冷却单元，其中5个为汽水顺流式，2个为汽水逆流式，空凝器散热管以接近60°角成等腰三角形（A型）结构，每个冷却单元下布置一台轴流风机。空凝器散热管束采用大直径椭圆翅片管。其中，空凝器顺流管束是冷凝蒸汽的主要部件，可凝结75%～80%的蒸汽；空凝器逆流管束的作用是将系统内的空气和不可凝气体排出，避免空凝器某些部位在运行时形成死区，以及低温时发生冻结。

2　直冷系统运行问题分析

2.1　环境气温、风速、风向的影响

由于直接以环境空气作为汽轮机排汽的冷却介质，因此在直冷系统中环境气温、风速、风向会显著影响直冷系统的运行特性。随着环境气温的升高，空凝器的进口空气温度就会相应升高，在排汽热负荷保持不变的条件下，导致空凝器冷凝温度升高，排汽压力增加，使机组运行经济性变差。另一方面，当空冷系统位于锅炉的下游，或者一个空冷岛位于另一个空冷岛的下游时，吹向下游空冷岛的空气温度也会升高，导致下游的空冷岛进口空气温度升高，出现空凝器压力升高的不利情况，使空凝器的工况变差。

此外，在外界环境风速和风向的影响下，空凝器进口空气流量也会减少，导致空凝器内凝结温度和压力升高，机组运行经济性变差。由于外界环境风速和风向的影响，两台600 MW机组空冷岛的进、出口空气

作者简介：李军（1979－），控制专业硕士研究生，现于山东电力研究院热控所从事电厂热控系统的调试及改造工作。

E－mail：lijun_sdu@hotmail.com

温度场和流场都发生了变化。在下游的空冷岛，进口空气流速明显降低，冷却空气流量减少，处于下游空冷岛的进口空气温度升高，冷却效果最差，使空凝器内冷却温度和排汽压力最高。因此，出现了空冷岛不同位置换热状况的差异，易导致空凝器内压力失衡。

2.2 出现过冷的原因

(1) 泄漏或蒸汽流量太少，会导致散热管束内存在大量空气，无法保证蒸汽充满散热管束空间，泄漏点周围及后部散热管束的表面温度明显偏低，从而可能出现过冷现象。

(2)如果排气压力控制正常，就会避免排汽压力低于真空泵组的抽气限值，从而防止空气和不可凝气体的积存，反之，过多的积存可能导致空凝器内的凝结水过冷，在冬季较低的环境气温下还会结霜。在正常运行时，当环境温度低于 2 ℃一段时间后，在空凝器逆流管束的上端可能会结霜，这是由于该部位有不可凝物出现过冷所致。如果这种状况持续一段时间，即一天或几天的环境温度一直在霜点以下，可能导致逆流管束的上部端口逐渐堵塞，妨碍不可凝气体的抽出。

(3)在空凝器处于某些异常运行方式时，例如真空泵组故障使不可凝气体涌入真空系统或者排汽压力控制故障，过冷就可能出现。通过检测与凝结水排送设备相连的空凝器逆流管束下联箱中的凝结水温度，可发现过冷。

(4)在相同散热面积时，蒸汽流量越小，散热管束温度越低。若空冷控制系统是在手动模式下操作的，并且逆流管束的蒸汽流速低于顺流管束，风机转速出现差异时，蒸汽重新分配，蒸汽流量减少，而风机转速提高时就会出现过冷，甚至在管束内结冰。而此时，由于有些管束仍可形成通路，造成凝结水收集管内的温度不会出现过冷(手动控制造成有些风机转速低，才不会出现过冷)，从而不会出现保护动作。

正常运行时，逆流风机转速需大于顺流风机转速(图 1)。若顺流风机转速大于逆流风机转速(图 2)，则空气在顺流管束中集聚，造成部分管束堵塞。由此可知，汽轮机的起停过程中蒸汽流量较小，凝结水在严寒低温环境下可能出现结冰，使管束冻裂；空凝器内不可凝气体的聚集，会导致管束内局部蒸汽流量减少，管壁温度降低，从而使凝结水流过低温管壁时发生结冰现象；多排管空冷散热器，由于各排管束间换热状况的差异，可能出现压力失衡，从而出现蒸汽回流，导致不可凝气体的聚集，出现局部凝结水结冰[4]。

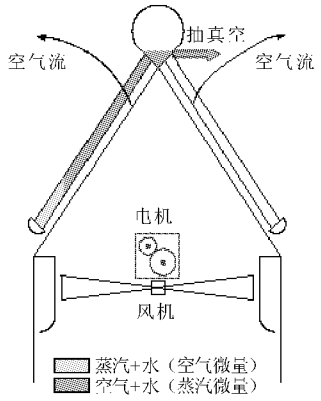

图 1 逆流风机大于顺流风机转速

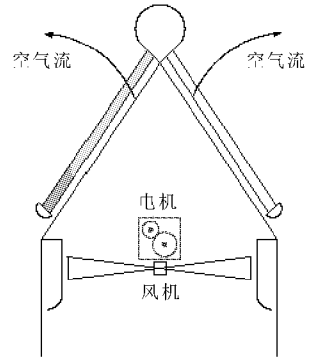

图 2 顺流风机大于逆流风机转速

3 直冷机组空凝器系统的防冻

3.1 防冻措施

(1)空冷风机的运行控制 空凝器系统配置的风机在转速控制上设计了完整的控制程序，在冬季设计有逆流风机加热保护、启用较少的散热面积及反转风机等专用的保护程序。

(2)锅炉、汽轮机的联合起动 在冬季利用机组的旁路系统进行锅炉、汽轮机的联合起动，保证空凝器系统需要的最小防冻热量。

(3)机组运行控制 在机组真空严密性较差时，注意对凝结水温度、抽气温度的控制，使机组在空凝器系统不发生冻结的情况下尽量降低背压。

3.2 空凝器系统防冻保护程序

对空冷风机的控制设计了完整的保护程序并纳入 DCS。

(1)逆流风机回暖保护 当环境气温下降到 2 ℃以下时，逆流空凝器加热循环将被启动，起用逆流管束回暖。以 30 min 的间隔依次停止各排的逆流风机，而

后以 15 Hz(30%)的变频转速反转 5 min,其余顺流风机则保持运行。首先,第 1 排(编号为 10 排)的两台逆流风机将被切断 15 min,以 15 Hz 变频转速反转。回暖 5 min 后,再停风机,经过一段等待时间后,调整风机的转向和转速与该排其它 5 台顺流风机相同。每隔 30 min 之后依次进行第 2 排(20 排)直至第 8 排(80 排)逆流风机回暖后,循环回暖结束。下次逆流风机循环回暖重新从 10 排开始。如果环境气温仍然低于 2 ℃,加热循环将再次启动。

(2)启用较少的散热面积　作为冬季的一项防冻措施,根据环境气温、排汽压力、温度等条件的不同,空凝器分为 12 个运行等级。当环境气温低于 2 ℃时,空凝器启起用较少的散热面积,即 10/20/70/80 排的散热管束被封闭而不进汽,空凝器起动至第 1 个运行等级(简称为 1 级)。当环境气温高于 5 ℃时,空凝器启动至第 9 级,即打开所有的散热管束通入蒸汽。其中,10/20/70/80 排散热管束入口为蝶阀,可根据实际需要调节进汽量,且管束入口还装有电动截止阀,而其它排的管束没有截止阀,属于开放式设计。因此,一旦空冷系统有蒸汽进入,则形成 30 排～60 排散热管束同时进汽。

各等级设备运行情况如下:

1～4 级在环境气温低于 2 ℃时运行,10 排、20 排、70 排、80 排散热管束蝶阀全关,30 排～60 排风机运行情况见表 1。

5～8 级在环境温度低于 2 ℃时运行,10 排、80 排散热管束蝶阀全关,20 排、70 排散热管束蝶阀开,20 排～70 排风机运行情况见表 2。

9～12 级 10 排、20 排、70 排、80 排散热管束蝶阀全开,10 排～80 排风机运行情况见表 3。

表 1　1～4 级风机转速频率　Hz

运行等级	冷却单元						
	001	002	003	004	005	006	007
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	10～20	0	0	0	10～20	0
3	0	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	0
4	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20

表 2　5～8 级风机转速频率　Hz

运行等级	冷却单元						
	001	002	003	004	005	006	007
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	10～20	0	0	0	10～20	0
7	0	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	0
8	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20

表 3　9～12 级风机转速频率　Hz

运行等级	冷却单元						
	001	002	003	004	005	006	007
9	0	0	0	0	0	0	0
10	0	10～20	0	0	0	10～20	0
11	0	10～20	10～20	10～20	10～20	10～20	0
12	10～55	10～55	10～55	10～55	10～55	10～55	10～55

(3)凝结水过冷保护措施　每排散热管束的每一边都装有温度测点,当环境气温下降到 2 ℃以下,其中一个测点凝结水温度＜＋20 ℃,操作屏上显示警示信号;当环境气温下降到 2 ℃以下,其中一个测点凝结水温度＜＋15 ℃,则报警,操作屏上显示(FREEZE PROT)控制系统将排汽压力设定值升到 12 kPa。如果过冷现象 30 min(调试期间整定)后仍然存在,再多起动一台水环式真空泵。

当环境气温＞＋5 ℃,且凝结水温度正常,即排汽与凝结水温差＜6 K,持续(5～15)min,则报警信号和操作屏上的指示(FREEZE PROT)消失,控制系统将排汽压力设定值重新设定回原值,恢复单台水环式真空泵运行。

根据机组实际运行情况,通过调整汽轮机和机组旁路系统的蒸汽流量以满足空冷系统的防冻最小流量要求,并调节空冷风机的转速,可使机组在冬季低温环境下正常运行。

在机组处于空负荷或低负荷运行时,由于蒸汽流量较小,加上旁路系统的蒸汽流量也不能达到空凝器全部投入时的设计流量,此时即使将所有风机全部停运,当蒸汽由空凝器进汽联箱进入散热管束后,在由上而下的流动过程中,散热管束中的蒸汽与外界冷空气进行热交换后不断凝结,当环境温度低于水的冰点温度时,凝结水在自身重力的作用下沿管壁向下流动,其过冷度不断增加,在到达散热管束的下部(即散热管束与凝结水联箱接口处)时达到结冰点温度,产生冻结现象。在冷却过程中蒸汽不断凝结并不断在散热管束的下部冻结,就出现了北方地区进入冬季的“井口”冻结现象,使散热管束与凝结水联箱接口处冻结,从而造成散热管束内的蒸汽滞流,严重时冻坏散热管束。另外,即使空凝器内的蒸汽流量在设计值之内,如果运行调整不当,在冷却空气流量过剩的情况下,同样也会出现散热管束冻结现象。

(下转第 63 页)

量，缩短汽轮机盘车装置运行时间，使检修尽早开工，并完善了机组系统功能，增加了设备的可调小时数。

[参 考 文 献]

[1] 电力技术标准汇编. 锅炉及辅机[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

[2] 容銮恩，等. 300 MW 火力发电机组丛书. 燃煤锅炉机组[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

[3] 300 MW 机组典型汽轮机、锅炉运行规程[Z].

IMPROVEMENT OF VACUUM EXTRACTING SYSTEM FOR 300 MW UNIT

SHI Fu - jun

Jingyuan Power Generation Co Ltd No2, Baiyin 730919, Gansu Province, PRC

Abstract: Directing against troubles existing in the corrosion - preventing process by drying the boiler through vacuum exraction and in the rapid cooling process of steam turbine after sliding parameter shutdown of the 300 MW turbo - generater set, a scheme of additionally installing a vacuum extracting by - pass for the boiler has been put forward, satisfying the demand of separate vacuum extraction for the boiler, facilitating shutdown of other equipments after boiler's shutdown and putting the rapid cooling system of steam turbine into service, and the economic efficiency of said improvement scheme being also analysed.

Key words: 300 MW unit; vacuum extraction for corrosion prevention; rapid cooling; system improvement

(上接第 60 页)

4 结 论

600 MW 直冷机组在冬季环境气温低于设计温度时空凝器散热管束发生冻结主要有两方面原因：(1)空凝器内的蒸汽流量低于其设计值；(2)冷却空气流量过剩。所以，对空凝器的防冻措施须采用控制蒸汽流量和冷却空气流量来实现。

[参 考 文 献]

[1] 邱丽霞，郝艳红，李润林，等. 直接空冷汽轮机及其热力系统[M]. 北京：中国电力出版社，2006.

[2] Tawney R, Khan Z, Zachary J. Economic and performance evaluation of heat sink options in combined cycle applications[A]. Proceeding of Turbo Expo[C]. ASME/IGTI Turbo Expo. Atlantic, Georgia, USA, 2003.

[3] 王佩璋，徐明. 600 MW 空冷机组直接空冷散热器与风机的新进展[J]. 电站辅机，2003，(1)：12 - 15.

[4] 马义伟. 空冷器设计与应用[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1998.

CAUSES OF FREEZING IN DIRECT AIR COOLING SYSTEM FOR LARGE - SCALE AIR COOLING UNITS AND FREEZE - PREVENTING MEASURS THEREOF

LI Jun

Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, Shandong Province, PRC

Abstract: Combined with real situation of air cooling units in Huadian Ningxia Lingwu Power Generation Co Ltd, the frost - cracking problem occurred in direct air cooling system under severe cold circumstances has been analysed, and counter measures for preventing frost - cracking being put forward. Through measures, such as retrofitting the structure of air cooling island, and adopting adjustment of the air flow rate under different environmental conditions in operation - optimizing process, the freezing problem occurred in operation of direct air cooling system can be effectively eliminated, thereby, the safe and economic operation level of air cooling units being enhanced.

Key words: air cooling unit; direct air cooling system; air cooling condenser; air cooling island; frost - cracking; freeze - prevention