

罗茨与水环耦合技术在火电机组真空系统上的研究应用

冯 冰

宁夏银星发电有限责任公司 宁夏 银川 750411

摘要:火电机组汽轮机在启动和运行过程中,需要将系统内析出的不凝结气体抽出后,才能正常维持凝汽器内的真空度,从而提高汽轮机做功效率,提高经济行。当火电机组正常运行后,需要从真空系统抽取的不凝结气体流量较小,因此,机组正常运行期间,可选用小功率真空泵来维持机组运行所需正常真空度,从而降低厂用电和节能降耗。

关键词:火力发电厂;凝汽器;真空系统;罗茨;节能技术

1 技术摘要

众所周知,现在的火电厂凝汽器大多使用的是大型的液环泵作为真空维持装置。随着火电厂设备治理技术的不断成熟,其设备的可靠性不断提升,凝汽器真空系统得严密性也越来越好,泄漏量远远小于设计值,机组的真空严密值长期处于优良值。但是大型液环泵的作用仅在启动阶段真空非常差时才能发挥其优势,在启动完成后的维持阶段并没有优势,反而会造成很大的电耗浪费。目前一种新型的罗茨式的高效节能真空泵可以应用真空系统上,对真空系统进行节能降耗,在建立真空时投入该泵组可以缩短启动真空时间。在维持真空时仅投运该泵组,可以降低真空系统电流,达到节能降耗的目的。^[1]

2 原系统运行现状

以内国660MW火电机组凝汽器真空系统为例,采用2台单级液环泵(一用一备)抽吸凝汽器内不凝性气体。每一台的名义抽气量大约为3000m³/h,装机功率为110kw。在实际运行中,除了火电机组启动初期阶段,真空系统需要较大的抽气能力,必须使用两台泵同时运行,才能使凝汽器的真空度迅速达到符合要求的真空值。真空度稳定并达到设计值后,单台泵运行。当机组稳定运行,各项参数都正常后,只需要抽吸凝汽器中正常排出的不凝性气体,维持凝汽器稳定的真空度。更重要的是,大型液环泵(水环泵)的极限真空值及抽气能力主要与工作水温有关。当夏季环境温度升高,冷却水、凝结水泵水温较高时,液环泵较易气蚀,其抽气能力将衰减为理论抽气能力的30%左右。当液环泵的抽气能力无法满足凝汽器抽真空的要求时(通过真空严密性数值可以估算凝汽器所需要抽出的不断泄漏进入的干空气量),便会导致凝汽器无法维持应有的最佳真空,造成汽轮机的效率变差,发电煤耗增加,造成直接的经济损失。

液环泵的维护成本也较高。液环泵的特点是,在真空度数值越高的情况下,泵组的抽气量将越小,由于其

抽气性能受水温的影响因素,在冷却水温度越高时,其抽气量也将越小,在夏季高温天气真空泵性能、出力下降明显;在高真空阶段,液环泵也更容易气蚀,由气蚀导致泵体振动加剧,叶轮、轴承使用寿命降低,维护备件成本较高。

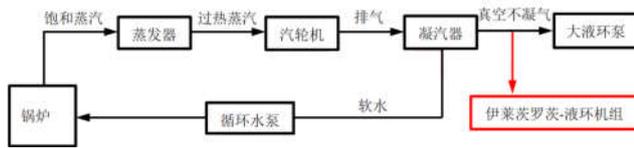
3 改造方案

经调研,罗茨式的高效节能真空泵已在部分火电企业成功应用,节能效果明显,具备推广意义。在不改变原有真空泵机组及系统结构的情况下,在机组真空系统的抽气母管上用一变径三通接一管路引接到高效真空维持装置,原有的水环式真空泵可作为备用泵及在机组启动抽真空阶段使用,既可以缩短真空建立时间,又能作为备用手段保证真空度的安全可靠。

该系统最大理论抽速5300m³/h;极限真空度50Pa;在最恶劣的工况下,罗茨泵的最高泵体许用温度为125℃,超过125℃时程序自动降频,保护设备;总装机功率预计约67kW。真空系统内罗茨泵配备变频器、变频电机、压力变送器、电磁阀、换热器、管道等组成真空系统。控制系统采用连续反馈变频控制,通过压力变送器和电流反馈实时控制罗茨真空泵组,封闭式水系统由温度控制变送器来实时检测和调整循环液温度。该真空系统具备自动启停,报警联锁等设定功能。当循环液减少或温度过高时,系统自动进行补水;当机组入口压力波动较大时,泵组可自动减速实现运行保护,等到参数平稳时再次恢复最大转速出力,不会出现系统停机。同时可以设定指定压力进行稳压控制。采用此种智能变频控制罗茨液环机组,目的并非全程取代现有的大型液环泵系统,而是设计与大型液环泵进行转换“接力”:汽机启动等需要特别强大的抽气能力时,使用大液环泵系统,而在其它的绝大部分的时间里,切换至节能机组运行,以三分之一或更少的耗电仍然获得原有的吸气能力,维持凝汽器的真空度。仅在影响凝汽器效率特别厉害的因素,

作用大到节能机组自身无法支持的情况下（根据电厂机组参数情况，设定安全的真空切换值），会通过实时的参数信号告知DCS，要求启动原有的大型液环泵，在恢复正常后，再自动切换回节能机组，这种联动互备的技术改造项目，符合火电机组现有节能减排精细化运行原则。

节能真空机组流程位置示意图：



示意图

4 技术特点对比：

4.1 液环泵（水环泵）：

4.1.1 技术原理：

液环泵又称水环泵，水作为常规的工作液，当泵组叶轮顺时针旋转时，水通过叶轮抛向四周，在离心力作用下，水形成一个封闭圆环。水环的上部分内表面与叶轮轮毂相切，水环的下部内表面与叶片顶端接触（叶片在水环内有一定的插入深度）。叶轮轮毂与水环之间形成一个月牙形的空间，同时这一空间又被叶轮分成若干数量的小腔（小腔数量取决于叶片的数目）。当以叶轮上部 0° 作为起点，叶轮在旋转前 180° 时小腔的容积由小变大，且与端面上的吸气口相通，此时气体被吸入，当吸气结束时，小腔则与吸气口隔绝；当叶轮继续旋转时，小腔将由大变小，使得气体被压缩；当小腔与排气口相通时，气体侧被排出泵体外。

4.1.2 技术特点：

（1）结构较为紧凑，转速较高，与电动机直接连接，不需要任何减速装置。使用较小的结构尺寸，能够获得大的排气量。（2）压缩气体能够保持等温的状态，在压缩气体过程中温度变化非常小。（3）泵组腔内没有金属摩擦面，泵内不需要进行润滑，并且磨损非常小。使用水在转动件和固定件之间进行密封。（4）吸气均匀，工作平稳可靠，操作简单。（5）效率较低，一般能够达到30%左右，较好的可达50%。（6）真空度较低，除了受到结构形式上的限制外，还受到工作液饱和蒸气压的限制。使用水作为工作液，其极限压强也只能达到2kPa到4kPa。如果用油作为工作液，最高也只能可达到130Pa。

4.2 罗茨风机（罗茨泵）：

4.2.1 技术原理：

罗茨风机是一种容积式风机，有两个三叶式叶轮在机壳和墙板密封的空间内进行相对转动。两个叶轮相向转动，由于叶轮与机壳、叶轮与墙板、叶轮与叶轮之间

的间隙极小，使得进气口形成很好的真空状态，大气压的作用下空气进入进气腔，每个叶轮的其中两个叶片与墙板、机壳形成一个密封腔，进气腔内的空气通过叶轮的转动，被两个叶片所形成密封腔不断地带到排气腔，加之通过排气腔内的叶轮之间相互啮合的作用，最终把两个叶片间的空气挤压了出来，空气在这样连续不停的运转下，能够源源不断的从进气口侧输入到出气口侧。

4.2.2 技术特点：

（1）由于风机采用三叶式转子结构形式，加之其壳体内合理的进、出风口结构，所以风机本体振动较小，噪声也很低。

（2）风机的叶轮和轴为整体结构，因叶轮无磨损，风机的性能能够持久不变，保证长期连续稳定运转。

（3）风机的容积利用率较大、效率较高，并且由于其结构紧凑，安装方式也能够应对各种工况。

5 节能真空机组公用条件

5.1 冷却水系统

间接冷却水来自厂区的水处理装置，水质满足GB/T19923-2005，指定的接管点需要满足下面所要求的压力，流量等工艺要求，冷却水的温度对液环泵的真​​空度有很大的直接影响，因此要保证冷却水允许的最高温度。

冷却水进回水压差	2-3Bar
冷却水温度	不超过 35°
最大硬度	250 mg/l as CaCO_3
PH值	6.5-7.5
悬浮物	$\leq 30\text{mg/L}$

5.2 压缩空气系统

压缩空气源由电厂提供，主要用于真空系统内气动设备的开启以及在维护、维修时的气源使用，指定的接管点需要满足下面所要求的压力，流量等工艺要求。

气体	压缩空气
含水量	$< 1\%$
含油量	$< 1\%$
允许的最大入口压力	10 bar

5.3 厂用电系统

低压电压	380 V AC $\pm 10\%$
频率	50 Hz $\pm 2\text{Hz}$

常规火力发电厂冷却水、压缩空气、厂用电系统各项技术参数均能满足。

6 节能真空泵组改造安全可靠分析

本改造方案是保持原配备真空系统设备及相关逻辑保护功能不变的基础上，并接了一套罗茨水环真空泵组，系统采用DCS控制，可实现远程和就地操作。在机

组启动过程时，继续使用原配备真空泵组建立真空；在机组正常运行期间，投运罗茨水环真空泵组，将原真空泵停运作备用；当真空系统发生严重泄漏或罗茨水环真空泵组设备故障检修时，投运原有真空泵组以满足机组真空要求。改造后机组正常运行时主要以罗茨水环真空泵组维持真空，实现一运两备，设备之间有可靠的联锁保护功能，以保证真空系统设备安全可靠运行。

水环罗茨真空泵组具有强劲的抽吸能力，在高真空时抽气量比水环真空机组大，通过降低凝汽器干空气的分压，使得极限真空度比水环真空机组更高，从而提升了凝汽器真空度。且水环罗茨真空泵组受工作水温度和大气温度变化的影响极小，能快速将空气抽出真空系统外，使凝汽器的传热性能提高，进而提高机组的热效率。其节能效果与真空系统严密性呈反比关系，即真空严密性越差，则节能效果越大，特别是在真空系统泄漏量较大时，效果将更加明显。

7 改造后经济效益预估

7.1 节约厂用电消耗：

改造前：

一台真空泵的实际消耗功率为： $P = \sqrt{3} \times \text{电压} \times \text{电流} \times \text{功率因数} \times \text{效率}$ 。

则 $P = \sqrt{3} \times 380 \times (140 + 150) \times 0.87 \times 0.9/2 = 74.7 \text{ kW}$ 。
一台真空泵年均消耗电能约为： $74.7 \times 4300 = 32.1 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$ 。

改造后：

单套节能真空泵组全年运行，根据实例，节能机组运行总电流约为 40A (380V)：

实际消耗功率为： $P = \sqrt{3} \times 380 \times 40 \times 0.87 \times 0.9 = 20.6 \text{ kW}$ 。改造后智能节能机组年电耗约为： $20.6 \times 4300 = 8.9 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$ 。

由上可得一套节能真空泵组全年运行可节约电耗： $32.1 - 8.9 = 23.2 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$ 。

即节能比例为 $23.2/32.1 \approx 72\%$

按照每度电 0.35元，每台发电机组配置一套罗茨式的高效节能真空泵计算；

则单台发电机组需增加 $23.2 \times 0.35 = 8.1 \text{ 万元}$ 。

7.2 节约设备维护费用：

全部液环泵的平均维护费用（零部件、人工、委外）按估计10万元每年计算（实际的情况一些电厂的维护成本远高于此值）。但罗茨式的高效节能真空泵的维护费用则小于4万元。维护费总计节约6万元。

7.3 回收凝结水收益：

通过配置的前置冷凝器，可将水蒸汽进行冷凝回收，按照每小时回收1吨凝结水，每吨水 40元计算，则

每年节约凝结水费：

$$1 \text{ t/h} \times 4300 \text{ h} \times 40 \text{ 元/吨} = 17.2 \text{ 万元}。$$

综上所述，采用一套凝汽器节电、节水系统可以产生三方面的收益，下表对收益进行汇总：

下表中数据是以年平均运行4300小时进行核算；其中经济效益部分按照电价0.35元/度，凝结水价格按照40元/吨。

表1：总体经济效益汇总

序号	名称	费用
1	节约厂用电收益	8.1 万元
2	节约设备维护费用	6 万元
3	回收凝结水收益	17.2 万元
4	总体经济效益	31.3 万元

8 改造应用情况

国华太仓发电公司装机两台国产630MW超临界机组，电厂位于江苏省太仓市港口开发区，两台机组分别于2005年和2006年投产发电，因原设计真空泵组选型偏大、台数较多、能耗较高，2017年两台机组分别改造了一台罗茨式的高效节能真空泵。

8.1 改造情况：

拆除一台原水环式真空泵组，在其基础上安装一套节能型真空泵组。改造后，在机组正常稳定运行，且真空严密性符合要求的情况下，节能型真空泵组正常并入运行维持凝汽器真空，原有真空泵组退出备用，设备间联锁控制系统可靠投运。

8.2 运行效果：

(1) 在夏季，原水环真空泵运行电流分别为184A、197A左右；夏季之外，原水环真空泵运行电流188A左右。

(2) 完成智能节能型真空泵组研究及应用后，最大运行电流不超过64A。

8.3 经济效益核算：

采用变频罗茨泵+小水环式真空泵的抽汽系统后，每年节省126000元；真空泵改造后，夏季2个月的真空度有所提高，可减小煤耗0.5g/kWh。夏季2个月可节省标煤720吨，节省标煤对应的效益为338400元。

结论：这种由罗茨泵+水环真空泵组合的高效真空泵组，在发电厂已得到广泛应用，技术成熟可靠，并且有较好的节能效果，符合国家现阶段对节能减排的工作要求。同时降低了水环真空泵汽蚀问题等的检修周期和费用。罗茨泵+水环真空泵组进一步提高了凝汽器的真空度，节能效果显著；同时真空系统由一用一备变成一用两备，提高了真空系统的安全可靠性。

参考文献

[1]《火力发电厂节能和指标管理技术》中国电力出版社 李青 公维平