

变频空压机和新型干燥器在核电站的选型及应用分析

杨 阳

深圳中广核工程设计有限公司 广东 深圳 518000

摘 要: 目前核电站压缩空气系统节能效率偏低, 通过采用变频空压机和新型干燥器, 明确设备选型及技术要求, 通过节能分析, 采用变频空压机和新型干燥器后压缩空气生产系统可大大降低能耗, 节约运行成本, 对后续新建核电站空压站节能设计工作具有重要指导意义。

关键词: 核电站; 变频空压机; 新型干燥器; 节能

1 引言

压缩空气作为工业生产中的重要动力源之一, 以其安全性高, 调节性好, 传输便利等优点在国内现有在运行的核电站得到了广泛应用。传统的核电站压缩空气生产系统一般由工频空气压缩机、干燥器、过滤器及储气罐等主要设备组成, 其中空气压缩机是消耗能源的主要部分, 约占系统电能消耗的90%以上。其次, 干燥器、过滤器、分离器、管路、阀门等也直接或间接消耗电能。

目前, 在我国大部分核电站长期以来压缩空气系统的节能并没有得到应有的重视, 普遍存在以下问题: 空压机系统一般按照核电站最大负荷(即100%负荷)设计, 且保留10%~20%的余量。然而, 实际需求存在时间性波动, 导致用气波动较大, 绝大多数情况下只能用到额定供气量的50%左右, 使空压机加载卸载频繁、长时间无法自动停机; 采用无热再生式干燥器导致再生耗气量高。

本文针对核电站传统工频空压机和干燥器耗能量大, 选用变频空压机和新型干燥器, 以某核电站项目为依托, 通过节能分析表明, 采用变频空压机和新型干燥器后压缩空气生产系统可以有效增加节能效率, 降低能源成本, 对后续新建核电站空压站节能设计工作具有指导意义。

2 核电站传统压缩空气生产系统耗能分析

2.1 空压机空载运行和加卸载能耗分析

1) 空压机长时间空载运行

空压机是把电能转化为压缩空气压力能的主要设备, 在核电站空压机运行中, 当供气量大于末端用气量时, 机组排气出口压力上升, 当出口压力上升到超过压力检测开关上限设定值时, 机组关闭空气入口阀门, 转入卸载运行。空压机在卸载过程中电动机正常运转, 没有压缩空气输出, 处于空载状态, 造成能源浪费。据测算, 空压机卸载时的能耗约占空压机满载运行时的20%~35%。目前, 在所有核电项目空压站设计中, 为确保用气的可靠性, 要求空压机卸载以后继续空载运行20分钟以后才能停机^[1]。

2) 空压机加卸载能耗分析

为了减少电能浪费, 同时保持供气量与用气量的平衡,

不论是活塞式, 还是螺杆式压缩机, 普遍在其中设置了加、卸载机构。加、卸载过程是交替进行的, 加载期间, 储气罐压力在上升, 卸载期间, 储气罐压力在下降, 总体上储气罐的压力曲线是“锯齿”状。为了保证生产正常进行, 其最小压力必须满足一定要求, 这个值用 P_{min} 来表示最小压力。在加载过程结束转入卸载状态这一时刻, 储气罐压力最大, 用 P_{max} 来表示最大压力。一般情况下, P_{max} 、 P_{min} 之间关系可以用下式来表示:

$$P_{max} = (1 + \delta) P_{min}$$

δ 是一百分数, 其数值大致在15%~30%之间。也就是说, 在气压上存在15%~30%的浪费。

缩短加、卸载时间, 可以减少 δ , 但相应的时间内的加、卸载次数必然增加, 频繁加卸载的机械冲击将严重缩短设备寿命和加大电能的消耗。卸载期间的电力消耗实际上是百分百的浪费。

3 变频空压机的选型设计及技术要求

3.1 变频空压机的选型计算

根据核电站的用气需求, 一般为两台核电机组的供气的空压站一般设置3台空压机, 一般为四台核电机组的供气的空压站设置5台空压机。可以将其中的一台空压机改为变频空压机, 由于一般的变频空压机流量调节范围为出气量的30%~100%, 为避免调节死区, 在选择变频空压机型号时应选择变频空压机的最大出气量一最小出气量的差值大于工频空压机的出气量, 这样即可实现在波动流量范围内变频空压机的全流量调节, 从而避免变频空压机流量调节死区, 工频空压机频繁启停的情况^[2]。

以某核电项目二期工程为例, 两台机组运行时, 压缩空气的正常消耗量为2564 Nm³/h, 压缩空气的最大消耗量为3187 Nm³/h, 一台核电机组运行, 另一台核电机组停堆检修时, 压缩空气的最大消耗量为3990 Nm³/h, 首台核电机组安全壳压力试验时, 压缩空气的最大消耗量为6300 Nm³/h。空压机厂房(ZC)压缩空气机容量能保证: 当一台空气压缩机运行时, 能满足两台核电机组正常运行压缩空气的消耗量需求; 当两台空气压缩机运行时, 能满足两台核电机组正常运

行压缩空气的最大消耗量需求;当三台空气压缩机运行时,能满足首台和电机组安全壳压力试验,压缩空气的最大消耗量需求。原ZC厂房内设有三台单机排气量为 $43.3 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 水冷无油螺杆式空气压缩机,现根据节能优化分析,可将一台空压机改为变频,单机排气量按上述原则选择最大出气量为 $66.6 \text{ Nm}^3/\text{min}$,最小出气量为 $22.2 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 的变频空压机,实现全流量变频调节,故修改后的ZC厂房空压机设置仍能满足用户用气需求。

3.2 变频空压机的技术要求

采用变频空压机后供气量与系统所需量实现动态匹配,压缩机电机转速会随着系统用气量的不同而进行调节,故变频空压机的启停压力带设置可以远远小于工频空压机,实际系统设计中,在满足空压机供气压力下,可将变频空压机的压力带设置为 0.2 bar ,从而使空压机在一个较低的压力水平运转,从而大大降低了能耗^[3]。数据显示,运行压力每降低 1 bar ,可节能7%。比如传统核电项目压缩空气系统全部采用工频空压机,加卸载压力设置为 $0.86\text{--}1.0 \text{ MPa.abs}$,将一台工频空压机改为变频后,可将工频空压机的加卸载压力设置为 $0.86\text{--}0.88 \text{ MPa.abs}$,工频空压机的加卸载压力设置不变,当管网压力低于 0.86 MPa.abs 时,变频空压机首先启动,管网压力上升,当管网压力大于 0.88 MPa.abs 时,变频空压机开始降低转速,若变频空压机达到最低转速时管网压力仍没有低于 0.88 MPa.abs ,则变频空压机进入卸载状态或停机。加入变频空压机后的压缩空气系统与全部采用工频空压机的系统压力变化对比图如下(图1)。

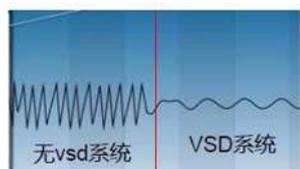


图1 工频与变频空压系统的管网压力波动对比图

通过分析,变频空压机的主要技术要求可总结如下:

压缩机组应为无油、水冷、螺杆型变频空压机,并且压缩机应该不经预热或预润滑就能在任何时候和任何条件下启动运行。

变频压缩机的启动或停机是根据系统的压力决定的。系统压力(具体指精过滤器出口管路压力)为 0.88 MPa(abs) 时,变频压缩机降至最低转速转为空载运行;系统压力降至 0.86 MPa(abs) 时,变频压缩机带负荷运行。

4 新型干燥器的选型计算

4.1 新型干燥器的能耗对比分析

传统的无热再生干燥器会消耗大量压缩空气作为干燥剂再生用气,根据吸附式压缩空气干燥器的再生方式,吸附式压缩空气干燥器分为加热再生吸附式干燥器,无热再生吸附式干燥器及微热再生吸附式干燥器。通过不同干燥器机型能耗对比可以发现,在相同条件下,达到同样的露

点要求,压缩热干燥器与其它吸附式干燥器装置相比,节能效果更明显。

4.2 转鼓式压缩热再生干燥器的工作流程

转鼓式压缩热再生干燥器的工作原理是利用空压机排出的高温空气所具有的热量,对经过吸附过程的吸附剂直接加热升温,使吸附剂得到彻底脱水再生,由于在加热再生过程中无气耗,所以最大程度地节约了能量。转鼓式压缩热再生吸干机的吸附剂安装在转鼓上,转鼓由一个小型电机带动,转子缓慢旋转并由两股气流通过:一股为待干燥的冷湿压缩空气;另一股为用于再生干燥材料的热压缩空气。冷湿压缩空气通过转子的四分之三,来自压缩机后冷却器上游的热空气通过转子的四分之一并再生干燥材料。只要空压机运行,转鼓转动便可实现吸附剂的连续再生,无需像传统的双塔干燥器再生时反复切换。且对于变频干燥剂转鼓的转速变化可与压缩机转速同步,达到与变频空压机良好配合。

转鼓式压缩热再生干燥器的工作流程分为三个回路。

1) 空气干燥回路。压缩机后冷却器中的湿空气进入干燥器进口,通过进气阀和喷射器喷嘴进入空气进口气水分离器。离开后冷却器的空气通常已饱和,并且温度大约为 10°C ,高于水冷式压缩机上进口冷却水的温度或风冷式压缩机上的环境温度。在除雾器中,空气中的水滴将被除去。空气随后会流经吸附水蒸汽的转子。干燥空气随后会流入空气出口室,并通过出口阀离开干燥器。

2) 再生空气回路。热的再生空气从压缩机后冷却器上游的管道中分流出来;此空气不饱和,其温度为 $130\text{--}190^\circ\text{C}$,具体取决于工作压力、冷却水进口温度或环境温度 and 空气进口温度。再生空气流经关闭阀、节流阀和过滤网,进入进口密封区,然后流入湿转子通道;由于热空气的蒸汽压力比湿转子通道低,因此它将使转子干燥(即再生)。离开转子的湿再生空气在出口密封区中聚集。接着,热的饱和空气在再生空气冷却器中被冷却,然后流向气水分离器,在此处通过排污系统排空游离水。再生空气随后被引向喷射器的吸入室,在此处与从压缩机后冷却器排出的湿压缩空气相混合。在喷射器中,湿压缩空气的速度增加,使得喷射器吸入室和整个再生空气回路乃至节流阀中的压力下降。压降可防止再生空气进入干燥空气出口室。

3) 转子冷却空气回路。在再生之后,转子的热通道由干燥空气室中的空气进行冷却。冷却空气流量由再生空气出口密封区收集,并与湿再生空气相混合。

4.3 新型干燥器的选型及技术要求

在核电压缩空气系统设计中,一般干燥器的台数与空压机一一对应,且在选型设计时,要保证单台干燥器的处理气量大于单台空压机的排气量,且要满足露点要求。采用压缩热再生干燥器空压机出口需直接与干燥器相连,则传统真空系统中的湿罐及干燥器前的过滤器则应取消。

通过分析,压缩热再生干燥器的主要技术要求可总结

如下:

- a) 单台设备处理气量: 要求在工作压力和温度范围内均大于单台空压机的排气量;
- b) 工作压力: 0.86 ~ 1.2 MPa(abs.) (对应工频空压机); 0.86 ~ 0.90 MPa(abs.) (对应变频空压机);
- c) 进气湿度: $\leq 100\%$;
- d) 排气压力露点: 根据厂址参数选定 (广东省内: 一般 -20°C (0.90MPa abs.));
- e) 再生控制: 露点控制, 带露点显示 (干燥器配置露点指示仪, 以进行露点自动控制);
- f) 机组的寿命: 40年(不包括消耗品和易损件);

5 变频空压机和新型干燥器的系统设计

以某核电项目二期工程为例, 原空压机厂房设置三台出气量为 $43.3 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 水冷无油螺杆式工频空气压缩机, 正常运行工况下两用一备, 设置三台无热再生干燥器, 处理气量大于空压机的排气量 $43.3 \text{ Nm}^3/\text{min}$, 一台空压机对应一台干燥器。通过在系统中加入变频空压机和新型干燥器, 则系统配置为两台出气量为 $43.3 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 水冷无油螺杆式工频空气压缩机, 一台最大出气量为 $66.6 \text{ Nm}^3/\text{min}$, 最小出气量为 $22.2 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 的变频空压机, 三台转鼓式压缩热再生干燥器, 一台干燥器对应一台空压机, 且保证处理气量大于对应空压机的排气量。据此, 节能改造后的压缩空气系统流程可设置为: 空压机出口连接压缩热再生干燥器, 干燥器出口连接过滤器 (预过滤器和精过滤器), 再由空气储罐供给下游用户。其中, 压缩热再生干燥器与空压机可由厂家联合供货, 并负责内部管道连接, 现场安装只需扳手简单操作, 方便快捷。

加入变频空压机和无热再生干燥器的系统工艺与传统系统工艺相比, 减少了两个湿储罐, 同时压缩热再生干燥器的占地面积更小, 与空压机之间的连接更紧凑, 减少了厂房面积, 经对比, 改造后的系统可节约厂房面积约30%。

6 经济性分析

6.1 采用变频空压机和新型干燥器节能分析

6.1.1 空载能耗

在压缩空气系统中采用变频空压机后, 节约了原工频空压机卸载能耗, 空压机卸载所消耗的电量可以根据电动机额定功率、运行时间和运行效率, 设定电动机运行效率为100%, 按如下公式计算:

$$Q = (Pt) \times (\eta_{\text{空}} k)$$

Q—空压机消耗电量, kWh

P—装机功率, kW

t—空压机总运转时数, h

$\eta_{\text{空}}$ —空载率, 空压机空载运转时数与总运转时数的比值

k—空载耗电系数, 空压机空载时耗电占满载耗电的比例, 取值30%。

按系统年运行时间8000小时计算, 一台工频空压机满

负荷运行, 一台工频空压机加载率为60%, 卸载率为40%, 空压机功率为300kW, 则采用变频每年可节约的电量约为:
 $8000 \times 40\% \times 30\% \times 300 = 288000 \text{ kWh}$

6.1.2 压差损耗

在压缩空气系统中工为了避免工频空压机的频繁启停一般加卸载压力带设置较宽, 数据显示, 运行压力每降低1bar, 可节能7%。采用变频空压机后, 控制压力降低1bar, 节省了压差损耗。一台工频空压机功率为300kW, 负载率为60%, 一台满负荷运行, 则加载时间 \times 高出1bar压差所带来的电量损耗为: $7\% \times 300 \times 8000 \times 60\% + 7\% \times 300 \times 8000 = 268800 \text{ kWh}$ 。

6.1.3 干燥器耗能

目前核电站使用的干燥器型号一般都为无热再生式干燥器, 此类型干燥器会消耗大量压缩空气作为干燥剂再生用气 (约13% ~ 17%), 空气流量的损失实质上就是耗电量的损失。按照流量和空压机功率折合计算, 工频空压机功率为300kW, 出气量为 $43.3 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 无热再生干燥器的再生耗气量为15%, 负载率为60%, 则两台无热再生干燥器再生耗气折合电量为 $43.3 \times 15\% \times 7.0 \times 8000 + 43.3 \times 15\% \times 7.0 \times 0.6 \times 8000 = 581952 \text{ kWh}$ 。一般在核电站里压缩空气系统的干燥器不止一台, 由此看出无热再生干燥器存在的节能潜力很大。

6.2 改造后系统布置优化节约造价分析

采用变频空压机和新型干燥器后, 原压缩空气系统中的湿罐可以取消, 同时空压机厂房占地面积可减少约30%, 按估算, 湿罐造价约18万元/个, 厂房面积减少节约30万元, 故整个系统布置优化节约约66万元^[4]。

表1 节能改造后系统节约电量分析

节能改造后系统	电量 (万度/年)
空载能耗节约	28.8
压差损耗节约	26.88
再生干燥节约	58.1952
总计	≈ 113.88

根据以上表1节能分析可知, 采用变频空压机和新型干燥器后的压缩空气系统可大大降低电耗, 节约运行成本, 每年节约电量约为113.88万度。

7 结论

(1) 空压机加卸载频繁、长时间卸载无法自动停机、采用无热再生式干燥器导致再生耗气量高等问题是造成压缩空气系统的节能效率偏低的主要原因。

(2) 本文以某核电项目压缩空气系统为例, 通过明确变频空压机和新型干燥器的选型计算和技术要求, 将原系统中一台工频空压机改为变频空压机, 将无热再生干燥器改为压缩热再生干燥器, 对原系统进行设备优化改造。

(3) 通过改造前后系统节能对比分析可知, 采用变频空压机和新型干燥器的压缩空气系统可大大降低能耗, 节约运行成本, 同时系统流程得到了简化, 减小了布置占地面积,

同时采用变频空压机供气有利于供气管网的压力稳定,为后续核电项目压缩空气系统节能改造提供了指导。

参考文献

[1] 《压缩空气站设计手册》编写组, 压缩空气站设计手册[M]。北京: 机械出版社, 1993

[2] 鄂凡, 合康变频在空压机技能改造中的应用[J]。工频与变频技术, 2014: 34-35

[3] 蔡茂林, 压缩空气的能量[J]。液压气动与密封,

2007, (5): 54-59

[4] 赖江圳, 空压机技能方法探析[J]。能源与节能, 2011, (6): 38-40

作者简介: 杨阳, 出生于1989年5月, 性别女, 民族满族, 籍贯辽宁丹东, 中级工程师, 硕士研究生, 毕业于东北大学, 研究方向为核电厂气体系统, 柴油机系统设计。