

高压变频调速在循环氢压缩机中的应用

汤玉合

中石化(河南)炼油化工有限公司, 河南省洛阳市, 471012;

摘要:分析了某石化PX装置歧化循环氢压缩机15K01的运行工况及变频改造的必要性。基于高压变频的调速原理和现场实际情况,确定了施工改造方案。根据实际运行效果,总结了增上高压变频器之后压缩机运行存在的问题及应对措施。并对增上高压变频前后能耗做了对比,结果表明15K01高压变频改造后运行平稳,节能效果显著。

关键词:压缩机; 高压变频; 节能降耗

DOI: 10.64216/3080-1508.25.01.012

前言

某石化PX装置歧化循环氢压缩机15K01是歧化装置输送反应所需含氢气体的核心设备,15K01由电动机驱动,中间有增速机。压缩机组型号为MTV1-3,结构为径向剖分3级筒形离心式压缩机,一级临界转速4500rpm,二级临界转速15200rpm,额定转速12000rpm,设计额定质量流量120000kg/h,入口压力2.7Mpa,出口压力3.4Mpa。电动机为异步电动机,额定转速1489rpm,额定电压6000V,满载电流95.8A,额定功率875Kw。增速箱为齿轮增速箱,8倍增速^[1]。该机主要为歧化反应系统氢气循环提供动力,将反应产品分离器顶部的氢气升压后与歧化反应进料(甲苯和C9)混合升温后进入歧化反应器,保证歧化反应系统所需压力和循环氢量。歧化反应系统催化剂要求反应产物需要在高压临氢环境下进行,正常生产时只能通过调整压缩机入口蝶阀15HIC003调节循环氢量,来维持反应所需氢烃比在一定区间内,但效果不是很明显。同时,大量的能量因为阀门阻力而浪费,形成了大量的节流损失^[2]。

歧化装置经过更换国产催化剂和低负荷运行优化后,反应氢烃比偏高,通过关小15HIC003可适当降低循环氢量,但氢烃比仍远远高于设计值,氢气消耗量偏大,能耗比较高。因此,15K01需要增上调速设施,降低氢气循环量,保证反应氢烃比可降至正常范围,降低装置能耗。

目前常用的调速设施有液力耦合调速、永磁调速及变频调速^{[3][4]}。永磁调速常用于低压电机,而在高压电机领域中传统调速是采用液力耦合调速。液力耦合的调速范围比较窄、调速精度差、效率比较低,易漏油,不易维护。而随着高压变频器技术的进步、成熟,稳定性的提高及价格的下降,利用高效节能的高

压变频器进行调速是目前最优的手段。同时采用变频器可以对大型异步电动机进行软启动,解决了电动机直接启动时启动电流大、机械冲击等缺点。

1 高压变频器的原理

1.1 变频调速节电原理

根据电机学的原理,三相交流异步电动机的转速为:

$$n = 60f(1-s)/p$$

上式中, n 为电机转子转速, f 为电源频率, p 为电机的磁极对数, s 为转差率。

由公式可知,电机转子转速 n 与电源频率 f 为线性关系,通过调整输入电源频率 f ,即可调整电机转速,这就是变频调速的基本原理。

对于风机和泵类负载,根据流体动力学原理可知:流量与转速的一次方成正比:

$$Q = K_1 * n \quad (Q \text{ 为流量, } K_1 \text{ 为常数, } n \text{ 为转速)}$$

于是得到 $\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}$, 即 $Q = \frac{n}{n_0} Q_0$, Q_0 为额定工况时的流量

的流量

轴功率与转速的立方成正比:

$$P = K * n^3 \quad (P \text{ 为轴功率, } K \text{ 为常数, } n \text{ 为转速)}$$

于是得到 $\frac{P}{P_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3$, P_0 为额定工况时的轴功率

由上述公式可知,当转速降低时,电机的能耗将以三次方的倍率降低,这样就可获得很好的节电效果,这就是变频调速的节电原理。

节电率的计算公式如下:

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} * 100\% = \left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^3\right] * 100\%$$

1.2 高压变频器的工作原理

本次 15-K-01 进行高压变频改造，变频器选用型号为 CHIC2000 系列风机泵类调速专用高压变频器，CHIC2000 系列风机泵类调速专用高压变频器具有高性能、高效节能、高功率因数及高可靠性等特点，多用于矿山机械节能改造，对于石化行业，这还是首次进行应用。

CHIC2000 系列风机泵类调速专用高压变频器采用功率单元串联多重化叠加技术，属于高-高电压源型变频器，高压直接输入输出^[5]。通过输入移相变压器的特殊移相角设计，整流的输入效果变成 36 脉波（6kV）整流，其输入总电流的谐波含量小于 3%。输出侧通过对每个功率单元的 PWM 波形进行重组可得到阶梯 PWM 波形，这种波形正弦度好，dv/dt 小，输出波形符合中国国家标准 CB/T 14549-93 及 IEEE19-1992 电能质量标准的要求，无须输出滤波器就可直接使用，可减少了对电缆和电机的绝缘损坏，可直接用于旧设备的改造。高压变频器的主电路结构图如图 1 所示。通过主电路图，可以直观的了解变压器的副边绕组与功率单元以及各功率单元之间的电路连接方式，具有相同标号的 1 个副边绕组的三相，分别向相同标号的 1 个功率单元三相供电。第一级内每个功率单元的一个输出端连接在一起形成星型连接点，另一个输出端则与下一级功率单元的输出端相连，依此方式，将同一相的所有功率单元串联在一起，便形成了一个星型连接的三相高压电源，驱动电动机运行。

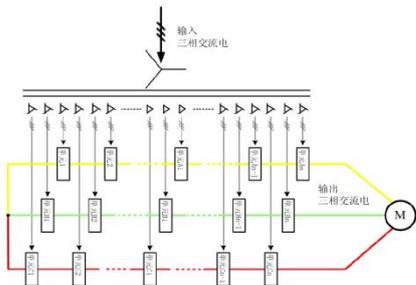


图 1 高压变频器主电路结构示意图

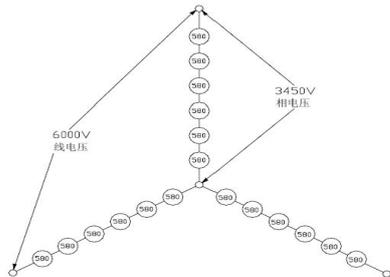


图 3 6kV 输出电压叠加原理

功率单元电路示意图如图 2 所示。功率单元的整流电路将变压器副边绕组提供的三相交流电源整流为脉动的直流电源，经过大容量的薄膜电容滤波后，可以得到稳定的直流电源。通过对绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)组成的逆变桥进行正弦调制的 PWM (Pulse Width Modulation)控制，可得到等效正弦的单相交流输出。各功率单元的输入侧由移相变压器副边各绕组独立供电。输出侧 U、V、W 相分别由各功率单元输出端子相互串联结成星形接法给电动机供电。

输出 PWM 移相原理，高压变频器的输出电压由多个功率单元的输出电压相互叠加而成。6kV、6 级功率单元的电压叠加原理如图 3 所示。电网电压为 6kV，高压变频器的每个功率单元的最高输出电压为 580V，同一相的六个单元串联后，相电压为 580V×6=3480V，由于三相连接成星型，线电压为 1.732×3480V≈6000V，达到电网电压的水平。变频器输出电压和电流波形如图 4 所示。

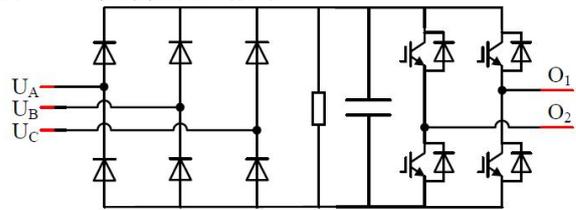


图 2 功率单元主回路示意图

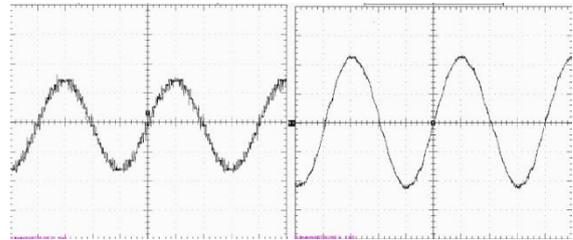


图 4 变频器输出电压与电流波形图

2 改造方案

利用装置停工大检修的机会，对歧化压缩机 15K01 进行变频改造，增上高压变频器，实现 15K01 调速，达到装置节能降耗的目的。改造后的供电示意图如图 5 所示。

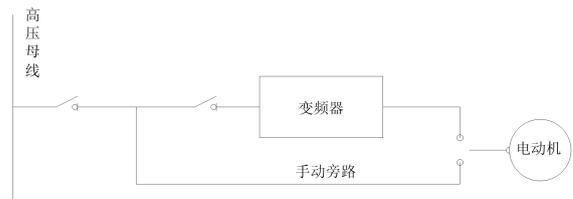


图 5 高压变频系统供电示意图

2.1 改造措施

全开压缩机入口蝶阀，通过变频调速方式降低15K01电机转速，以满足降低循环氢流量的需求。基于改造的可靠性和自动化程度的考虑，具体改造措施如下：

①由于大检修期间对芳烃压缩机组控制系统整体更新，新增加一台控制系统操作站，变频器的运行状态及相关参数引入机组控制系统进行监控。

②保留15K01原供电高压柜，通过增上一旁路柜，实现电机运行工频和变频模式之间的切换，保证变频器故障时15K01可以工频运行。由于15K01功率比较大，为了确保机组安全，没有设置变频和工频在线互且功能，只有在15K01停机时切换运行模式。

③保留原压缩机组联锁停车直接停供电高压柜的方式，即15K01机组控制系统发出停车命令直接去PX变电所停15K01供电高压柜，因此，15K01停车后要及时通知电气维保人员停高压变频器。

④由于变频装置体积比较大，在PX变电所单独设置房间进行安装，并配备空调进行散热冷却。

2.2 变频器控制方式

大检修期间机组控制系统整体更新，在PX中控室新增加一台操作站对压缩机组运行状态和相关参数进行显示、监控、记录及报警提示，因此高压变频器各模块运行状态、变频电流、工频电流及变频开度反馈信号通过硬接线进入机组控制系统，实现变频器远程启动及参数监控，并在操作站上设置相关监控画面。根据工艺操作人员操作习惯，变频器的开度大小调节通过硬接线进入PX装置分布式控制系统DCS(Distributed Control System)系统，即通过DCS来调整变频器的频率输出。同时，将机组控制系统监控的所有参数通过通讯的方式进入DCS系统进行显示。高压变频器和机组控制系统之间有10组DI信号，3组AI信号，1组DO信号，高压变频器与PX装置DCS系统之间有一组AO信号，即变频阀位输出，如图6所示。

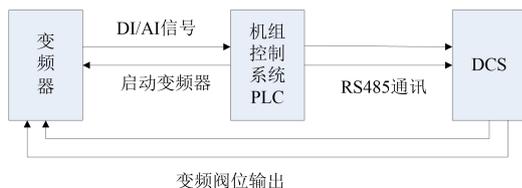


图6 变频器控制方式

根据压缩机组原有设计，通过机组控制系统现场操作面板对15K01主电机进行启动，在启动1min之后，压缩机喘振联锁功能自动投用。因此，变频改造

之后，15K01启动方式为一切准备就绪后，工艺人员通过现场操作面板启动按钮去电气合高压柜开关，通过中控操作站远程启动变频器，在15K01电机软启动之后，工艺操作人员需要快速将变频器开度开大来避免由于机组转速过低而喘振联锁，然后根据所需循环氢量和中控操作站上实时喘振计算值调整变频开度至合适位置。

3 改造后的节能效果

15K01变频器投用之后，在生产厂家和电气维保人员的共同维护下，变频器未出现故障，压缩机组运行平稳正常。变频器投用之后，根据工艺生产需求，变频阀位开度为72%左右，对应电机频率为35Hz左右。电机运行电流也由之前的83A降低至45A，循环氢流量由之前的100000 m³/h左右降低到70000-80000 m³/h，不仅节省了大量电能，还降低了氢气消耗，节能效果显著。同时，15K01入口蝶阀全开，降低了管网阻力消耗，也减少了喘振发生的可能性。15K01电机软启动也减少了启停时对电网的冲击。

4 改造后出现的问题及应对措施

15K01变频器投用之后一直运转正常，压缩机组运行平稳，但降低转速也带来了一系列问题，具体如下所示：

①压缩机组转速降低之后，机组轴振动整体偏高，但没有出现剧烈波动，仍在可控范围内，其中非驱动端轴振动检修前的最大振动13um，现在最大振动31um，增大18um。驱动端检修前最大振动10um，现在最大振动21um，增大11um。15K01厂家设计资料要求轴振动不能大于45um，通过操作对比发现，每次调整变频开度，调整机组转速，轴振动都跟随性地发生跳变，通过对振动频谱分析，初步判断为低速运行下转子不平衡引起的。因此，要求工艺操作人员在做转速调整时，要时刻关注轴振动的大小，来保证机组在一个安全的状态下运行，同时，在合适机会对转子做动平衡处理。

②增上变频器后，原则上机组转速可以在0-12000rpm内任意调整，但考虑到压缩机组一阶临界转速为4500rpm，根据压缩机组设计资料要求以高出或低于临界转速的15—20%安全容限值来至于安全状态和防止日常误操作的发生，通过DCS对变频阀位输出做了低限位设置，以此来保证机组的运行平稳，目前低限位值为50%。

③由于原电机为同轴风扇冷却方式，降速之后，电机轴承温度和定子线圈温度需要严格监控，尤其是

在夏季高温天气情况下。目前,电机定子线圈温度信号引入机组控制系统,可以在操作站上实时监控,电机轴承温度则要求每天巡检时进行检测。由于目前该机组间歇性运行,还没有经受高温酷暑天气的考验,若轴承温度和电子线圈温度过高则建议对该电机进行改造,不受同轴风扇冷却量不足的影响。

④变频调速之后,只能通过变频器反馈信号来估算机组实际运行转速,由于压缩机组上装有键相测量探头,测量信号进入本特利3500轴系监测系统,因此,可以考虑合适机会,利用键相信号对机组实际运行转速进行实时监控。

⑤变频调速对压缩机15K01喘振的影响。原设计15K01为定速运转,机组喘振值为一定值,15K01喘振计算公式如下所示:

$$Q_{sv} = Q_{dv} * \frac{101.3}{P_s + 101.3} * \frac{273.15 + 40}{273.15 + 15.56}$$

式中 Q_{sv} 为喘振计算值, Q_{dv} 为15K01出口流量15FI005A测量值(0-110000Sm³/h), P_s 为15K01入口压力15PT289测量值(0-4000Kpa)。由于机组开机时流量较低,该公式计算值会导致机组喘振停机(实际情况机组未发生喘振),在喘振逻辑判断中加入了60秒的延时,即开机60秒后喘振逻辑才启用。根据设计,15K01喘振报警值为2285m³/h,喘振连锁值为2154m³/h,当计算值 $Q_{sv} < 2285m^3/h$ 时机组控制系统发出报警, $Q_{sv} < 2154m^3/h$,机组控制系统发出连锁停机信号。对于变频调速之后,机组喘振报警值和连锁值是否应该发生改变仍需商榷。芳烃歧化压缩机组15K01和异构化压缩机组18K01同为离心式压缩机组,区别为18K01为汽轮机驱动,可以通过调节入口蒸汽量来实现转速调节,该机组喘振公式中就增加了机组转速这一测量值,即不同转速下该机组的喘振报警值和连锁值是不一样的,喘振报警值和连锁值计算公式

如下:

$$SX1 = 1.391768 * S + 20.2$$

$$SX2 = 1.312574 * S + 10.1$$

式中, S 为18K01机组转速测量值, $SX1$ 为喘振报警值, $SX2$ 为喘振连锁值。根据计算公式可知,转速越低,喘振报警值和连锁值越低。因此在通过变频改造后,15K01转速降低,而喘振报警值和连锁值仍是以原来12000rpm时的数据为判断依据,若以相似的机组18K01为参考,则15K01目前的喘振报警和连锁值是偏高的。为了保证15K01的安全运行,15K01的喘振报警值和连锁值是否也应根据实际转速不同来适时改变,仍需咨询压缩机组厂家和相关方面的专家。

5 总结

本文分析了芳烃车间PX装置歧化压缩机15K01高压变频改造的必要性,重点分析了变频改造的控制方式、改造后出现的问题及应对措施,对改造前后能耗进行了对比。15K01变频改造项目是非常成功的,满足了工艺生产需求的同时,降低了装置能耗,节省了大量资源,提高了经济效益。

参考文献

- [1] 15K01技术资料.
- [2] 牛亚军,姚军营. 电厂引风机采用高压变频调速技术改造[J]. 电子世界. 2014. 15
- [3] 胡松如,李遵基. 高压变频调速控制节能原理分析[J]. 中国电力. 2003. 36(1):67-70
- [4] 姚光荣. 高压变频调速技术在SO₂风机中的应用[J]. 有色冶金节能, 2014.
- [5] CHIC2000系列风机泵类调速专用高压变频器用户手册.