[钢铁]

改造出焦除尘风机调速方式实现节能降耗

文/攀钢集团攀钢钒公司炼铁厂　阎　峰

针对攀钢炼铁厂1#2#焦炉出焦除尘风机采用液力耦合器调速存在效率低及电能消耗高等问题，将其与高频斩波内反馈调速、高压变频器等调速方式对比分析，阐述改造为高压变频器调速将产生明显的节能效果，具有推广应用价值。

炼铁厂属于冶金行业耗能大户，加强用电节能技术改造，对攀钢炼钢厂降本增效具有非常重要的意义。

攀钢炼钢厂1#2#焦炉出焦除尘风机(900 kW)作为焦炉生产必备的环保设施，每天24 h运转，消耗大量电能，应对其进行节能技术改造。

工艺简介及现状分析

1#2#焦炉建设中，为减少烟尘等污染物排放，设计安装了装煤出焦除尘地面站，主要工作原理为：焦炉出焦过程中大量高温含尘烟气在热浮力及除尘风机的作用下经拦焦车上的大型吸气罩、集尘干管，送入蓄热式冷却器冷却、粗分离，然后进入除尘器进行净化，净化后的烟气经除尘风机、消声器和烟囱排入大气。

根据流体力学原理可知，风机类设备所消耗的功率与其转速的三次方成正比。因此，通过调速来调节风量的方式，相比通过调节阀门来调节风量的恒速运转方式，风机消耗的功率将大幅度地降低。1#2#焦炉除尘风机所配电动机参数为P_e=900 kW，V_e=6 000 V，I_e=108 A，cos ϕ = 0.83，n_e=994 r/min，采用YOTCS875型液力耦合器进行调速。该风机运行时分为高速、低速两种运行状态，即当推焦车开始推焦时，风机高速运转（转速为750 r/min左右，占额定转速994 r/min的75.5%），推焦车推焦后空余时间风机低速运转（转速为325 r/min左右，占额定转速994 r/min的32.7%）。推焦车一般每10 min推一炉焦，即除尘风机每10 min完成一次从低速到高速再到低速的循环周期。经现场标定，除尘风机在每10 min即600 s的时间内，忽略速度转变过程时间，高速运转时间约183 s，低速运转时间约417 s。

由上述可见，除尘风机大部分 (约占69.5%）时间都处于低速运转，这里尚未考虑焦炉检修时间（该时间内焦炉不出焦）除尘风机都处于低速运转。根据液力耦合器运行特性曲线（转速与效率成正比例变化）可知，除尘风机的液力耦合器大部分时间处于低效率运行状况，必然浪费很多电能。另外，液力耦合器调速时，风机转速虽然比额定转速降低许多，电动机仍全速运行，也势必消耗大量的电能。

由此可看出，采用液力耦合器调速，整个系统节能效果比较差。

改造思路

鉴于液力耦合器调速的节能效果不好，可考虑采用其他更具有优势的调速方式对出焦除尘风机进行调速改造。目前，在6 kV高压电动机调速领域，除了液力耦合器调速以外，主要还有两类调速方式：①高频斩波内反馈调速；②高压变频

器调速。可以通过了解并比较以上三种调速方式在几个主要方面的优劣，选用一种具有综合优势的调速方式，以达到节能降耗的目的。

调速方式简介

1．液力耦合器调速方式

液力耦合器是一种液力传动装置，一般由泵轮和涡轮组成，放在充有一定量工作液体的密封壳体中。当泵轮在原动机带动下旋转时，壳体中的液体在离心力作用下沿着泵轮外环进入涡轮时，给涡轮叶片以推力，使其带动生产机械运转。液力耦合器的动力传输能力与壳内相对充液量的大小是一致的。在工作过程中，改变充液率就可以改变耦合器的涡轮转速，做到无级调速，其特点为：功率适应范围大，结构简单，工作较可靠，使用较方便，且造价低；适用于风机、水泵的调速。

2．高频斩波内反馈串级调速方式

将绕线式异步电动机部分转子能量回馈至电网，从而改变转子滑差实现调速的方式称为串级调速。内反馈串级调速是指省略逆变部分的变压器，将反馈绕组（也称调节绕组）直接设置在定子绕组里。该调速系统通过改变串入电动机转子绕组电势的大小，实现调速的目的；同时定子反馈绕组吸收转子的转差功率，通过与转子旋转磁场相互作用产生正向的拖动转矩，使电动机从电网吸收的有功功率减少，达到节能的目的。

传统的串级调速技术，是通过有源逆变器向转子回路串入反电势，反电势的大小通过调整有源逆变器的逆变角来调节，又称移相调节。近些年来，国内出现了第三代内反馈调速系统，即高频斩波内反馈调速系统，该系统不再进行逆变器逆变角的移相调节，设置最小逆变角固定不变，在转子三相整流器和有源逆变器之间加入升压型高端IGBT斩波器，通过PWM调制斩波，达到调节等效反电势大小的目的，这种新技术使得串级调速性能获得极大提高，同时得到不断推广使用。

3．高压变频器调速方式

交流电动机变频调速技术是通过控制交流电动机的定子供电电压与频率，平滑地改变电动机转速，从而实现无级调速的一项节能技术，已广泛应用于各行业的电动机调速节能系统。随着现代电力电子技术和微电子技术的迅猛发展，高压大功率变频调速装置已成熟起来，其应用的领域和范围也越来越为广泛，这使得高压电动机能够实现变频调速及节能。

高压变频器的种类繁多，目前，国内广泛采用并不断推广的单元串联多电平电压型变频器，输出谐波含量、转矩纹波和电动机噪声极低，功率因数可达0.95，采用直接高压输出，无升压变压器，对电动机绝缘无损害，电缆长度无限制，最适用于风机水泵；该变频器内部的H桥级联多电平逆变器是目前工业应用最为成熟的一种拓扑结构，被业界认为在高压大容量领域中最具应用前景；该方案也是目前国产6 kV、l0 kV高压大功率变频最可行的方案。

调速方法对比

1．运行效率方面

典型的液力耦合器和高压变频器（高－高变频器）的效率－转速曲线如图1所示。从该图可看出，随着输出转速的降低，液力耦合器的效率基本上正比降低（例如：额定转速时效率0.95，1#2#焦炉出焦除尘风机高速运转时，75.5%额定转速的液力耦合器效率约为0.72，除尘风机在低速32.7%额定转速时，液力耦合器的效率仅约为0.31），而高压变频器在输出转速下降时效率仍然较高（例如：额定转速时效率0.97，出焦除尘风机高速运转时，75.5%额定转速的高压变频器效率大于0.95，除尘风机在低速32.7%额定转速时，高压变频器效率为0.91）。

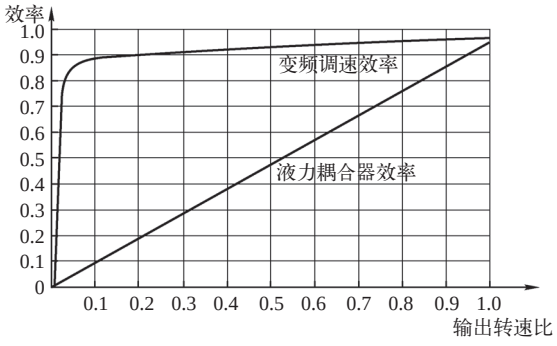

图1　高压变频器调速与液力耦合器调速的效率曲线

三相内反馈串级调速系统以触发角为控制参数的实测效率－转速特性图如图2所示。

从图2可看出，内反馈调速系统随着导通角变化，系统的效率发生变化，对于高频斩波式内反馈系统，取固定的导通角90°，在转速约为1 200 r/min时效率最高，但仍然不到0.6，并且随着转速的上升或下降，效率明显降低。

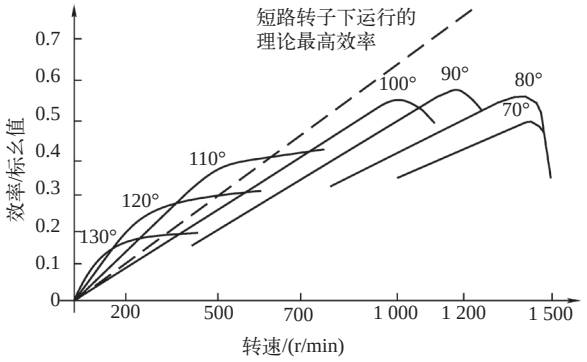

图2　三相内反馈系统以触发角为控制参数的实测效率－转速特性

从上面两图对比可看出，高压变频器调速的效率在不同转速下都是最高的。

2．功率因数方面

高压变频调速可以在很宽的转速范围内保持高功率因数运行，在20%以上转速时，功率因数始终大于0.95，而液力耦合器低速运行时，功率因数低于电动机额定功率因数，如果在70%以下转速时，功率因数将低于0.7。高频斩波式内反馈系统采用逆变角不变，使逆变器功率因数恒为0.9，但整个系统的平均功率因数仍然不高，最高只能达到0.86～0.9。

由上述可知，高压变频器调速的功率因数最高。

3．起动性能方面

采用高压变频器调速时，如电动机保持额定转矩起动，电网输入起动电流被限制在200%额定电流以下(根据机种不同，为125%～200%)，而且起动的全过程可控，起动点和爬坡时间可设置。而液力耦合器不能直接改善起动性能，起动电流达到额定电流的5～7倍。高频斩波内反馈调速系统在转子串频敏电阻的情况下，起动电流是额定电流的2.5～3倍，对电网有较大冲击。由上述可知，高压变频器调速的起动性能最好。

4．运行可靠性及维护方面

液力耦合器机械结构和管路系统复杂，要长期可靠运行，系统维护工作量增大，如果出现故障，必须停机检修。高频斩波内反馈调速系统中，有源逆变器对触发脉冲的要求十分苛刻，任何触发失误都将造成逆变颠覆的严重后果。高压变频装置电子线路比较复杂，但目前技术已趋成熟，具有功率单元自动切换和冗余运行特性，在功率单元故障时可不停机连续运行，可靠性得以保证。由上述可知，高压变频器调速的可靠性较高，易于维护。

5．调节和控制方面

液力耦合器依靠调节工作腔油量大小改变输出转速，因此响应较慢；高频斩波式内反馈系统采用高端IGBT斩波器，通过PWM调制斩波，达到调节等效反电势大小实现调速目的，电动机速度响应调节较快；高压变频器调速的频率改变速度相当快，完全可以以系统允许的最高速度进行调节。液力耦合器的速度调节准确度较低，调速范围窄，通常在40%～90%之间；高频斩波式内反馈系统调速范围为40%～99.5%额定转速之间平滑、无级调速；而高压变频器调速属于数字式控制，其稳频准确度达到0.1%以上，调速范围宽,可在0%～100%范围调速。由上述可知，高压变频器调速范围最宽，调节准确度最高。对于出焦除尘风机大部分（约占69.5%）时间处于低速（32.7%额定转速）运转这种工况，高频斩波内反馈系统由于调速范围受限无法在此速度运行。

6．适用电动机方面

液力耦合器适用于各种电动机，应用范围较广；内反馈调速系统只能应用在带有调节绕组的特殊绕线式异步电动机的场合，属于非标产品，且转子上有集电环，维护工作量大，价格也比较昂贵；高压变频器调速可适用于普通的笼式异步电动机、同步电动机等各种交流电动机。1#2#焦炉出焦除尘风机采用笼式异步电动机，改为高压变频器调速可不需更换电动机（可外加散热风机），若要改成高频斩波内反馈调速系统，必须更换成带有调节绕组的特殊绕线式异步电动机，其价格昂贵。

7．节能方面

从调速时的能耗观点来看，有高效调速与低效调速两种方式：高效调速指转差率不变即无转差损耗的调速方式，如多速电动机、变频调速以及能将转差损耗回收的调速方法（如串级调速等）。有转差损耗的调速方式属低效调速，如液力耦合器调速，能量损耗在液力耦合器的油中。一般来说转差损耗随调速范围扩大而增加。从上述可看出，液力耦合器调速属低效调速方式，而高压变频器调速和高频斩波内反馈调速都属高效调速方式，后两种调速方式节能效果好于前者，且后两种调速方式相比前一种调速的节能效果将随转速下降而越明显。

8．投资回报方面

目前，液力耦合器初期投资比高压变频器

低，高频斩波内反馈调速系统制造成本也低于高压变频器制造成本，大约是后者价格的2/3，高压变频器的价格较昂贵。高频斩波内反馈调速节能效果优于液力耦合器调速，投资也比高压变频器调速略少，但调速范围受限制，不能在40%额定转速以下运行，对于类似1#2#焦炉出焦除尘风机大部分时间在低速32.7%额定转速运转的情况，高频斩波内反馈调速无法使用，除非调高出焦除尘风机低速时的运转速度才行，这样其节能效果将较差，投资回报相对高压变频器较低。

从以上几个主要方面综合对比，高压变频器调速优势明显，因此建议对出焦除尘风机液力耦合器调速方式改造为国内使用最广泛、技术最成熟的且特别适用于风机类负载的单元串联多电平电压型高压变频器调速，预计将产生很好的节能效果，较短时间即可收回投资（后面将有详细计算）。

预计经济效益

1．采用液力耦合器的年耗电费用

忽略1#2#焦炉检修时间（出焦除尘风机此时都处于低速运转）和除尘风机检修时间，每年按365天考虑，除尘风机连续运转，低速运转时间占69.5%，高速运转时间占30.5%，现除尘风机采用液力耦合器调速，低速时电动机电流为39 A左右，高速时电动机电流为76 A左右，功率因数都按0.83估计，电单价按0.5元/(kW·h)估算，年耗电费用为：

（低速运行功率×低速时间＋高速运行功率×高速时间）×电单价

＝($\sqrt{3}$×6 kV×39 A×0.83×24 h×365×69.5%＋$\sqrt{3}$×6 kV×76 A×0.83×24 h×365×30.5%)×0.5元/kW·h＝(2 048 003.75＋1 751 438.00)×0.5≈189.97万元

2．采用高压变频器的年耗电费用

（1）风机高速运转时的耗电功率

由流体力学原理可知，风机消耗的功率与其转速的三次方成正比。出焦除尘风机在高速时转速为额定转速的75.5%，则风机单独消耗的功率占风机额定功率的比例为75.5%×75.5%×75.5%＝43.0%。

按风机电动机效率在高速时为0.88估算，管道系统效率按0.92估算，高压变频器效率查图1为0.95，则出焦除尘风机（采用高压变频器调速）整个系统消耗的电功率约占风机额定功率的比例为43.0%/(0.95×0.88×0.92)＝55.91%。

除尘风机额定功率为900 kW，在采用高压变频器调速高速运转时，风机系统消耗的电功率将为：900 kW×55.91%＝503.19 kW。

（2）风机低速运转时的耗电功率

出焦除尘风机在低速时转速为额定转速的32.7%，由流体力学原理可知，风机单独消耗的功率占风机额定功率的比例为32.7%×32.7%×32.7%＝3.50%

风机电动机效率在低速时有所降低，按0.60估算，管道系统效率按0.85估算，高压变频器效率查图1为0.91，则除尘风机（采用高压变频器调速）整个系统消耗的电功率约占风机额定功率的比例为3.50%(0.91×0.60×0.85)＝7.54%。

除尘风机额定功率为900 kW，在采用高压变频器调速低速运转时，风机系统消耗的电功率将为：900 kW×7.54%＝67.86 kW。

（3）采用高压变频器调速的年耗电费用

（低速运行功率×低速时间+高速运行功率×高速时间）×电单价

＝(67.86 kW×24h×365×69.5%＋503.19 kW×24 h×365×30.5%)×0.5元(kW·h)

＝(413 145＋1 344 423)×0.5≈87.88万元

3．高压变频器的投资回报和效益

出焦除尘风机900 kW，若选用国产1 000 kW的高压变频器，费用估计为120万元，而采用变频器调速比液力耦合器每年将节约耗电费用为：189.97万元－87.88万元＝102.09万元。即一年多可收回投资。以后的运行情况将是：高压变频器调速比液力耦合器每年节省102.09万元的开支，因此采用高压变频器总体投资回报效果好。

以上结果尽管是理论上计算得出，但是经多种资料现场实测试验报告表明，高压电动机采用高压变频调速技术节能效果非常显著，其中风机类为28%～69%，泵类为18%～41%。出焦除尘风机采用变频器调速相比液力耦合器节能效果为（1－87.88/189.97×100%＝53.7%，符合有关资料数据，考虑到出焦除尘风机大部分时间处于低速运行，故认为上面节能效果计算应该与实际情况差别不大。

结束语

1#2#焦炉出焦除尘风机如果改用高压变频器调速相比液力耦合器调速的节能效果明显，具有推广价值。EA