

# 风机泵类高压变频改造的节能分析及计算方法

汪书苹, 盛明璐, 胡 丹

(安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 基于对风机泵类高压变频改造前后不同调节方式以及不同调节方式的性能曲线、管路特性曲线的研究, 比较分析了不同调节方式的节能原理、对节能的影响及节能效果。从风机泵类变频调速系统整体角度考虑, 针对不同工况研究了风机泵类变频调速前后节能效果的理论计算方法。以电厂风机泵类高压变频改造试验和实际运行数据为例, 验证了该计算方法的准确性和可行性。

**关键词:** 风机泵类; 高压变频; 节能; 调节

**中图分类号:** TM 921

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)03-0117-04

每个火电机组都有大量的辅机设备, 如给水泵、凝结泵、吸风机、送风机、一次风机、二次风机、循环水泵、磨煤机等, 这些辅机大多用高压大容量, 如 6 kV 高压等级的异步电动机拖动, 从而构成了发电厂重要的动力设备, 同时也是发电厂的主要用电设备, 大约占厂用电量的 80%, 其中锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵的耗电量占总厂用电的 50%, 锅炉送风机、引风机的耗电量占总厂用电的 25%, 提高风机泵类的运行效率对火电厂的节能降耗有重要作用<sup>[1-4]</sup>。为了节能, 提高经济效益, 发电企业对风机泵类等辅机设备进行变频改造<sup>[5]</sup>。但是很多变频改造的节能效果预算是根据经验估算, 导致改造后出现节能预算与实际节能有较大的差距, 造成用户投资回收期与预期相差较大<sup>[6-8]</sup>。

本文通过研究不同调节方式下风机泵类节能原理与节能效果, 提出了符合实际工况的变频改造节能分析计算方法, 并通过实例验证了该方法的有效性。

## 1 不同调节方式下风机与泵的运行特性分析

风机泵类作为一种流性机械, 其特性曲线复杂多变。风机泵类的流量调节方式直接影响其性能和管路特性, 要使风机或泵的节能量达到最大, 必须对其特性曲线进行详细分析, 通过性能曲线和管路特性曲线的变化, 可以对风机与泵类的运行状态和能量消耗进行较直观的分析。因此, 要准确预算使风机或泵类变频改造的节能效果, 必须以接近实际风机泵类情况的特性曲线为依据, 并对特性曲线进行详细分析, 掌握风机或泵的工况<sup>[9-10]</sup>。

### 1.1 特性曲线

风机泵类的性能曲线主要包括: 压力与流量 ( $H-Q$ )、效率与流量 ( $\eta-Q$ ) 关系曲线。这 2 条曲线可分别通过以下曲线拟合函数得到, 即<sup>[11]</sup>

$$H = k_0 + k_1 Q + k_3 Q^2 \quad (1)$$

$$\eta = c_0 + c_1 Q + c_3 Q^2 \quad (2)$$

其中,  $k_0, k_1, k_3$  及  $c_0, c_1, c_3$  为待定系数, 根据生产厂家产品出厂试验数据即可确定风机或泵的性能曲线。

风机与泵的管路特性曲线由具体的管路系统自然形成, 具有固定性。管路曲线方程可表达为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} H = KQ^2 & H_0 = 0 \\ H = H_0 + KQ^2 & H_0 \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $H_0$  为静压力值。

对于风机, 炉膛压力相对于管道阻力很小, 可以忽略; 对于泵类无背压系统, 如空调冷却水系统、热水供水系统及其他液体闭式循环系统等, 流体通过水泵的能量增值全部用于克服管路阻力, 因此, 认为  $H_0 = 0$ ; 对于泵类有背压系统, 如锅炉及压力容器非循环式供水系统等, 流体通过水泵的能量增值, 一部分用于克服管路阻力, 一部分用于提升流体势能 (包括位能和压力能), 此时  $H_0 \neq 0$ ,  $H_0$  为流体通过系统的势能提升, 称为背压<sup>[12]</sup>。由此, 风机泵类的性能曲线及管路特性曲线如图 1 所示。

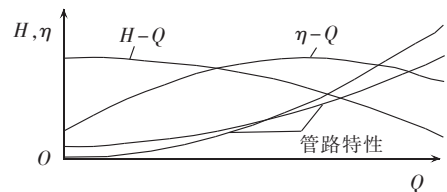


图 1 风机泵类特性曲线

Fig.1 Characteristic curves of fan and pump

### 1.2 特性分析

各种风机、泵类特性曲线上的每一点都对应着一个工况, 泵或风机的工作点必然是管路特性曲线与其性能曲线  $H-Q$  的交点处。稳定工作点必定是泵或风机性能曲线单调下降段与管道阻力特性曲线的交点。为节能, 往往利用各种调节方式, 通过改变风机泵类特性曲线及工况点达到节能目的。

假设风机或泵额定转速  $n_0$  运行时, 性能曲线和管路特性曲线分别为  $P_1$  和  $R_1$ , 则  $A_1$  点即为风机泵

类全速运行时工况点,如图 2 所示。由于改变阀门开度调节流量时,电机总是全速运转,因此性能曲线不变。当减小阀门开度,流量减小到  $Q_2$  时,系统运行工况点移至  $A_2$  点,相应地管路特性曲线变为  $R_2$ 。因此,改变阀门开度实际上就是通过改变管路特性实现流量调节的,方法简单,易操作。

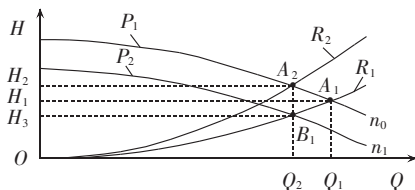


图 2 不同流量调节方式的风机泵类运行工况  
Fig.2 Operating conditions of fan and pump under different flow regulating modes

当通过改变风机或泵的转速来进行流量调节时,由于阀门开度不变,因此管路特性不变。如将流量调节到  $Q_2$  时,工况点沿如图 2 中的管路特性曲线  $R_1$  的  $A_1$  移至  $B_1$  点,相应地电机的转速降到  $n_1$ ,即性能曲线下移。因此,改变风机泵类转速实际上是通过改变其性能曲线实现流量调节的。

## 2 风机泵类变频改造节能分析

### 2.1 节能原理及节能效果分析

由图 2 可以直观地看出,流量由  $Q_1$  减小为  $Q_2$ ,节流调节时压力反而上升到  $H_2$ ,由于  $P \propto QH$ ,故轴功率  $P$  比调节前减少不多;而采用变频调节,随着转速的下降,流量下降的同时压力也下降到  $H_3$ ,因此轴功率与  $A_1$  点的相比下降较多。这是因为阀门减小控制流量时,人为地增加了风机或泵阀门及管网阻力,大部分电能被消耗在阀门和管网上,存在严重的节流损失,加上节流后可能使风机泵类运行效率降低或运行点偏离运行高效区,造成能源浪费,从而导致节能效果较低<sup>[13]</sup>。如果采用变频调速技术控制流量时,阀门可全开,这样减少了阀门上的压力损耗,即使在阀门开度不大时其前后的压差也不大,挡板产生的压力损耗并不大。此外,改变电机转速时管网阻力也并未增加而是保持恒定,因此变频改造后风机泵类节能效果比较明显。

不同的管路特性对变频调速节能效果影响较大<sup>[14]</sup>。如图 3 所示,假设具有相同的设计工况点  $A$  的同一型号的泵在 3 个不同的管路系统中工作,管路特性表达式分别为

$$\begin{cases} H = S_0 Q^2 & H_0 = 0 \\ H = H_1 + S_1 Q^2 & H_0 = H_1 \\ H = H_2 + S_2 Q^2 & H_0 = H_2 \end{cases} \quad (4)$$

现要把流量从  $Q_1$  调到  $Q_2$ ,若采用关小阀门节流调节,则 3 个系统满足流量  $Q_2$  的工况点均为  $G$ ,转速为  $n_0$ ,对应的轴功率为  $P_G$ ;若采用调速控制,则 3 个系统的工况点分别为  $D$ 、 $E$ 、 $F$ ,对应的转速分别为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  ( $n_0 > n_1 > n_2 > n_3$ ),轴功率分别为  $P_D$ 、 $P_E$ 、 $P_F$ ,显

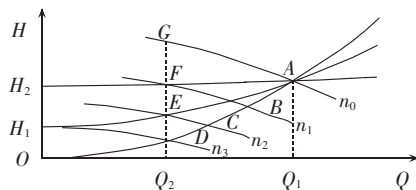


图 3 不同管路特性曲线对变频调速节能效果的影响

Fig.3 Influence of pipeline characteristic curve on energy-saving effect

然,  $P_G > P_F > P_E > P_D$ 。说明无论  $H_0$  大小,各系统采用变速调节与采用节流调节相比,轴功率都有所减少,但减少的幅度不同。 $H_0$  越小,轴功率减少的幅度越大,节能效果越好,因此无背压系统的节能效果最好。反之, $H_0$  增大到一定程度时,节能调节的轴功率逐渐趋近于一定程度的节流调节,变速调节的节能效果逐渐降低,若把变速装置的效率考虑在内,变速调节的实际能耗就会很接近、甚至可能超过节流调节的能耗。所以,用户应根据具体的管路特性曲线来确定是否适用变频改造。如果盲目选用,很可能事与愿违。

对于如图 3 中变速调节,风机或泵不同转速时,性能曲线为一组近似平行曲线。随着转速的下降,压力减小,轴功率下降,即  $P_A > P_B > P_C > P_D$ 。当转速降到一定程度后,如  $n = n_3$  时,性能曲线与管路特性曲线交于  $Q = 0$  点,最大压力与管路静压力相等,此时系统已无法克服管路阻力。因此,变频调速时风机泵类转速不易过低,若电机输出功率过低,过度偏移额定功率或者工作频率过度偏移额定频率,都会使电机效率下降过快,最终都影响到整个机组的效率,甚至电机冷却风量不足影响散热而威胁电机安全运行。因此,变频调速只适合于一定的转速范围,称为工作范围,在此工作范围内,可以保证风机或泵在高效区运行。为此,制造厂出厂风机或泵时都会规定工作范围,通常认为变频调速不宜低于额定转速 50%,最好处于 70%~90%<sup>[14]</sup>,具体应结合实际工况计算确定。

### 2.2 节能计算

对于风机泵类调速系统的节能计算,应从系统整体角度考虑。因为在变频运行过程中,风机或泵的有效功率  $P_e$ 、风机输入功率(即轴功率)  $P_m$ 、电动机效率  $\eta_m$ 、变频器效率  $\eta_{inv}$ 、传动效率  $\eta_d$  以及风机效率  $\eta_f$  在实际运行中都是随风机或泵转速的变化而不断变化的,尤其风机或泵的效率,变频改造前后效率变化比较大。如图 4 中, $\eta_0$ 、 $\eta_2$  分别为风机或泵类在转速  $n_0$ 、 $n_2$  下的效率曲线,设计时最大效率应为额定流量时的效率。假设  $A$  点为额定工作点,当阀门控制减小流量时,出口压力升高,风机或泵的效率将沿曲线  $\eta_0$  从最大值下降到  $E$  点。当变频调速控制减小流量时,虽然不同转速下效率曲线发生偏移,但却始终工作在最大效率区。

风机或泵的轴功率为

$$P_m = P_e / \eta_f = \gamma QH / \eta_f \quad (5)$$

其中, $\gamma$  为运输液体的比重。

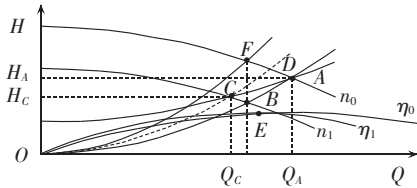


图 4 不同工况下风机或泵的效率变化  
Fig.4 Efficiency change of fan or pump under different operating conditions

一般情况下,很多文献或工程都按照流体力学的相似定律来计算风机、泵类变频调速的节电率,即如果保持泵或风机的效率不变,则流量  $Q$ 、压力  $H$ 、转速  $n$  的关系如下<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \\ H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \\ P_{in2}/P_{in1} = (n_2/n_1)^3 \end{cases} \quad (6)$$

得:

$$H_1/Q_1^2 = H_2/Q_2^2 = c \quad (7)$$

或

$$H = cQ^2 \quad (8)$$

其中,  $Q_1, Q_2$  分别为转速  $n_1, n_2$  下的流量,  $H_1, H_2$  分别为转速  $n_1, n_2$  下的压力,  $P_{in1}, P_{in2}$  分别为转速  $n_1, n_2$  下的风机或泵的轴功率,  $c$  为常数。其中式(8)为相似抛物线方程,当变频调速减小流量,转速  $n_1, n_2$  下  $A$  与  $B$  为相似工况点,即  $A$  与  $B$  这 2 点的效率相等。同样,变频调速得到的其他转速下的性能曲线与该相似抛物线相交的工况点效率均相等。因此,相似抛物线又称为等效率曲线。

对于风机或无背压泵类系统,因  $H = S_0Q^2$ ,对比式(8)知  $c = S_0$ ,说明在风机或无背压泵类管路系统中,等效率曲线与管路特性曲线完全重合,即风机或无背压泵类系统进行变频调速时,不同转速下效率相等。因此,可以按式(6)进行计算,这也是风机或无背压泵类系统所具有的特点。

对于有背压系统,很显然因管路特性曲线不满足等效率曲线,因此  $A$  与  $C$  的工况并不相似,若运用式(6)进行节电计算,会存在较大误差。这也就是很多用户出现变频改造前的节电预算结果与变频改造后实际系统节电效果存在出入的原因。因此,此时耗电功率要代入式(5)进行计算,得到不同转速下轴功率关系:

$$P_{inC}/P_{inA} = (Q_C H_C / \eta_{inC}) / (Q_A H_A / \eta_{inA}) \quad (9)$$

若过  $C$  点作相似抛物线,该曲线与转速  $n_1$  下的性能曲线相交于  $D$  点,此时  $C$  与  $D$  为相似工况,效率相等,则可按式(6)进行计算。

基于以上风机泵类轴功率的计算结果,若忽略电动机效率、传动效率以及变频前后变频器效率的变化,则变频改造后节能量为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{P_e}{\eta_m \eta_{inv}} \left( \frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \quad (10)$$

其中,  $P_1, P_2$  分别为变频前后的变频器输入功率,  $\eta_1, \eta_2$  分别为变频前后风机或泵的效率,可由风机或泵

类的出厂性能曲线图查得。

### 2.3 算例及结果分析

假设一台泵或风机额定工况下的轴功率  $P_{in} = 817 \text{ kW}$ ,电动机效率  $\eta_m = 96\%$ ,变频器效率  $97\%$ ,泵或风机与电动机直接连接,则  $\eta_d = 1$ ,设备年运行时间  $t = 5568 \text{ h}$ 。

#### 2.3.1 理论计算方法

已知各种工况下流量(转速)标么值  $Q_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ )及对应的工作时间百分比  $t_i$ ,管路特性曲线为  $0.7583(Q_i^*)^2 + 0.3958$ ,因此,根据风机或泵的出厂性能曲线,作出相应流量的相似抛物线得其相似工况点  $Q_i^*$ ,如表 1 所示。

表 1 各种工况下的流量标么值  $Q_i^*$  及其工作时间百分比  $t_i$

Tab.1 Per-unit flow  $Q_i^*$  and its percentage of running time  $t_i$  under different operating conditions

工况	$Q_i^*$	$Q_i^*$	$t_i/\%$	工况	$Q_i^*$	$Q_i^*$	$t_i/\%$
1	0.518	0.7657	20	4	0.755	0.8864	10
2	0.554	0.7894	12	5	0.829	0.9101	12
3	0.669	0.8516	41	6	0.888	0.9256	5

根据

$$C_d = t \sum_{i=1}^6 (P_i t_i) = t \frac{P_{in}}{\eta_m \eta_{inv}} \sum_{i=1}^6 [(Q_i^*/Q_i^*)^3 t_i] \quad (11)$$

求得变频调速年耗电量理论值:

$$C_{d,th} = 2436923.466 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

#### 2.3.2 曲线拟合法

由 2.2 节分析知,因变速调节时改变的是风机泵类性能曲线而不改变管路特性,所以不同工况流量变化时应在管路特性曲线上查找对应新的工作点,记为  $(Q_i^*, H_i^*)$ 。则由

$$C_d = t \sum_{i=1}^6 (P_i t_i) = t \frac{P_{in}}{\eta_m \eta_{inv}} \sum_{i=1}^6 [(Q_i^* H_i^*) t_i] \quad (12)$$

得到变频调速年耗电量实际值:

$$C_{d,m} = 2459091.394 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

如果上网电价为  $0.398 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$ ,则变频调速方式比变阀调节方式年节约的费用理论计算值与实际年节约费用相差为

$$\Delta r = 0.398 \times |C_{d,th} - C_{d,m}| = 8822.835 \text{ (元)}$$

这对于几十万元甚至几百万元的变频改造费用而言,此差值是非常小的,证明了理论计算的有效性和可行性,这对实施一次性投资较大的风机泵类高压变频改造项目目前需进行节能分析、节能预算及资金回收期等经济效益可行性分析的企业而言,具有重要的理论价值和参考价值。

## 3 结论

为了节能,各企业纷纷采用变频调速进行流量调节,代替效率低下、能耗大的变阀调节方式。但变频改造系统的投资比较大,为了降低投资风险,需对变频改造前的节能效果进行准确而可信的分析,才能对其节能效果、经济性做出正确的结论,这是绝大



多数企业目前非常关注的也是比较难的一个问题。

进行变频调速节能理论计算时,要掌握风机泵类的工况、特性曲线及运行效率,再结合流体力学的相似定律来计算节电情况。文中的实例计算变频改造年节电费用理论值与实际值很接近,表明了理论节能分析计算方法的准确性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] 孟崇林. 发电厂循环水泵、凝结水泵高压变频技术研究与应用[D]. 北京:华北电力大学电气工程学院,2004.  
MENG Chonglin. The research and application of high voltage inverter technic on electric factory cyclic water pump and clotted water pump[D]. Beijing:North China Electric Power University,2004.
- [2] 王卫宏,阎春林,杨忠民,等. 风机高压变频改造的节能预算方法与实践[J]. 中国电力,2006,39(9):71-74.  
WANG Weihong, YAN Chunlin, YANG Zhongmin, et al. Energy-saving budget calculation and application for the HV inverter retrofit of ID fan[J]. Electric Power,2006,39(9):71-74.
- [3] 张本昌. 变频器在火力发电厂的应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):136-138.  
ZHANG Benchang. Application of frequency converter in thermal power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(5):136-138.
- [4] 崔艳华,马宏忠. 变频调速技术在火力发电厂风机与泵中的应用[J]. 能源技术与管理,2009(2):108-110.  
CUI Yanhua, MA Hongzhong. The application of frequency control technology in fan and pump system in power plants[J]. Energy Technology and Management,2009(2):108-110.
- [5] 崔力. 变频器在火电厂辅机传动系统的应用现状与经济性评价[J]. 电力设备,2003,4(3):36-40.  
CUI Li. Application status and economical evaluation of frequency converter in auxiliary drive system of thermal power plant[J]. Electrical Equipment,2003,4(3):36-40.
- [6] CARLSON R. The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps[J]. IEEE Transaction on Industry Applications,2000,36(6):1725-1733.
- [7] 张和平,杨忠民,胡伟,等. 火电机组风机高压变频改造项目的节能预算与效果测试[J]. 电力设备,2006,7(5):13-15.  
ZHANG Heping, YANG Zhongmin, HU Wei, et al. Energy-saving budget and effect test of HV frequency conversion retrofit for fan of thermal power generator unit[J]. Electrical Equipment,2006,7(5):13-15.
- [8] 李芳芹,任建兴. 变频技术在电厂泵与风机系统中应用的节能分析[J]. 上海电力学院学报,2005,21(1):17-20.  
LI Fangqin, REN Jianxing. Analysis of energy-conservation on application of variable frequency technology in pump and fan system in power plants[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2005,21(1):17-20.
- [9] 杜欣慧,王孝. 风机变频节能及节能预算方法的研究[J]. 山西焦煤科技,2008(1):20-22.  
DU Xinhui, WANG Xiao. Research on variable frequency speed control of fans and budget method for energy saving[J]. Shanxi Coking Coal Science and Technology,2008(1):20-22.
- [10] 林永,吴自强,杨彬. 风机泵类变频调速节能的一种拟合计算方法[J]. 变频世界,2004(11):48-52.  
LIN Yong, WU Ziqiang, YANG Bin. A curve fitting method of calculating energy-saving on pumps with frequency-varying system[J]. The World of Inverters,2004(11):48-52.
- [11] 邓德兵,王在东,高伟,等. 660 MW 机组凝结水泵变频改造实验分析[J]. 华中电力,2007,20(2):35-38.  
DENG Debing, WANG Zaidong, GAO Wei, et al. Performance test analysis of condensate pump with variable frequency speed in 660 MW coal-fired power unit[J]. Central China Electric Power,2007,20(2):35-38.
- [12] 黄文建. 管路特性对水泵变速调节节能效果的影响[J]. 重庆职业技术学院学报,2004,13(4):90-91.  
HUANG Wenjian. The influence of pipeline feature on the energy-conservation effect of water pump speed-change governing[J]. Journal of Chongqing Vocational and Technical Institute,2004,13(4):90-91.
- [13] TIMOTHY J C, NICHOLAS G L, EDWARD J T. Adjustable speed drives applied to large AC induction motor and pump systems[C]//Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium. Houston, USA: [s.n.], 2008:75-80.
- [14] 吴剑恒,叶金勤. 变频技术在泵及风机节能改造中的应用分析[J]. 节能,2008(5):33-36.  
WU Jianheng, YE Jinqin. The application and analysis of conversion technique about the pump and fans in energy-saving reform[J]. Energy Conservation,2008(5):33-36.
- [15] 谭萍. 300 MW 机组凝结水泵节能改造[J]. 广东电力,2008,21(11):50-54.  
TAN Ping. Energy-conservation transform for condensate pumps of 300 MW units[J]. Guangdong Electric Power,2008,21(11):50-54.

(编辑:康鲁豫)

#### 作者简介:

汪书苹(1977-),女,安徽安庆人,工程师,博士,研究方向为变频调速节能的分析与研究(E-mail:wsp04@mails.tsinghua.edu.cn);

盛明珺(1980-),男,青海西宁人,工程师,研究方向为发电系统的电气绝缘检测技术;

胡丹(1981-),男,安徽宿州人,工程师,硕士,研究方向为电力系统电能质量的分析与研究。

## Energy-saving analysis and calculation of HV frequency conversion retrofitting for fan and pump

WANG Shuping, SHENG Mingjun, HU Dan

(Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The energy-saving principle and effect of different regulation modes are compared based on the study of their performance curves and pipeline characteristic curves before and after retrofitting. Theoretical calculation of energy-saving effect for different operating conditions is investigated from the whole system of variable-frequency speed regulation for fans and pumps. Its correctness and feasibility are validated with the test and practical operating data of an energy-saving retrofitting project for fans and pumps of power plant.

**Key words:** fan and pump; high voltage frequency conversion; energy-saving; regulation