

[变频器]

国产高压变频器运用及节能分析

文/中冶集团铜锌有限公司巴基斯坦山达克铜金项目 尤家安

针对JCS 6K-400型国产高压变频器在电厂锅炉引风机上的运用及变频调速改造，对实际运行参数进行了实测、计算、分析、比较，验证了其操作灵活、运行平稳，不仅平均节能效果达39.6%，年节电价值50余万元，而且还改善了风机和电动机的运行工况，降低了维修费用，延长了设备的使用寿命，为该技术国产化的持续精进提供了来自生产一线的实测参考。

目前高压变频技术日渐成熟，与国外同类产品的差距在缩小，应用在老旧设备节能改造效果显著已得到充分肯定。变频器在火电厂高压配置方案中，高一高电压源模式，即高压交流电输入变频器后不通过任何降压环节将其整流并送入高压H桥路变换后，且又不用任何升压环节而直接输出的变频器，得到广泛认可。电厂锅炉在电力生产过程中，需要对风量和风煤比进行调整来控制炉膛内的燃烧情况，从而满足发电供汽负荷的需要。用机械法调整风量的锅炉引风机之转速是恒定不变的，当锅炉蒸发量需要随负荷变化调整

时，引风机的风量与压力是通过改变引风机入口的风量调节挡板开度大小来实现。风量调节挡板在运行中长期不在全开位置，故节流损耗非常大，电动机长期运行在额定转速，大量能耗损失在风量调节挡板上，调节挡板周围的通流面积形成节流损失区，造成电动机运行效率降低，电能浪费，引风机入口风量调节挡板示意图见图1所示。为降低能耗和生产成本，75 t/h循环流化床锅炉采用JCS 6K-400高压变频器对引风机进行变频调速节能改造，使引风机转速实现无级变速控制，以解决风量控制自动化和能源浪费问题。

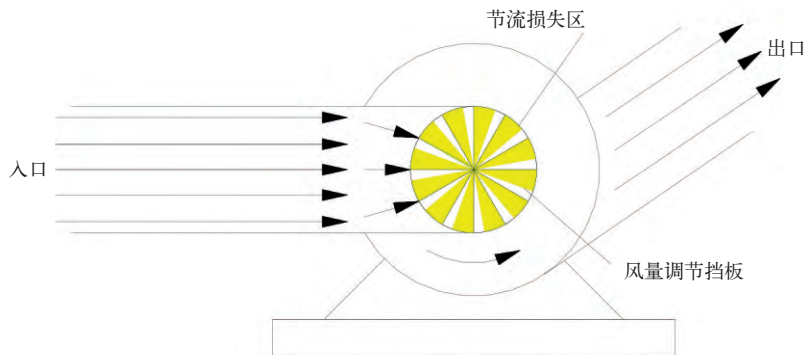


图1 引风机入口风量调节挡板示意图

JCS 6K-400高压变频器原理简介

JCS 6K-400高压变频器，特点是采用了直接

串联高压变频器技术，就是将多只IGBT（绝缘栅双极晶体管）相互串联适应不同电压输出的功率

单元，“这种结构的优点是可利用较为成熟的低压变频电源的电路拓扑、控制策略和控制方法，不需要输入、输出变压器，输出效率比较高”。IGBT直接串联高压单元主电路见图2所示。

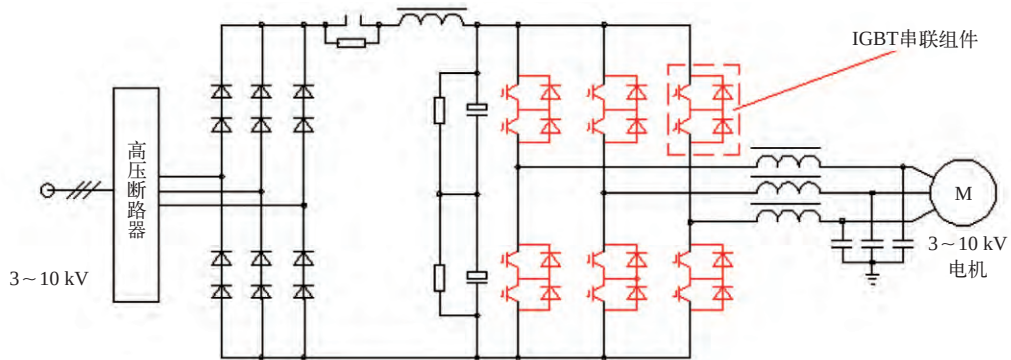


图2 IGBT直接串联高压单元主电路图

其主电路见图3所示，由交流高压整流电路、高压直流滤波电路、高压逆变电路（变频、调压）、输出滤波电路及制动单元等几部分构成，直接进行高电压逆变（高—高电压源模式），无输入、输出变压器模块化设计，各项保护功能齐全。根据共模电压的定义，“共模电压（也叫零序电压），是指电动机定子绕组的中心点和地之间的电压”，共模电压危害比较大，“如果叠加在变频器某部件上的共模电压超过规定值，就对变频器产生干扰，甚至引起设备故障的发生”，为了有效滤除有害谐波，在输出端还增加了共模电抗器，各项保护功能配置完善。

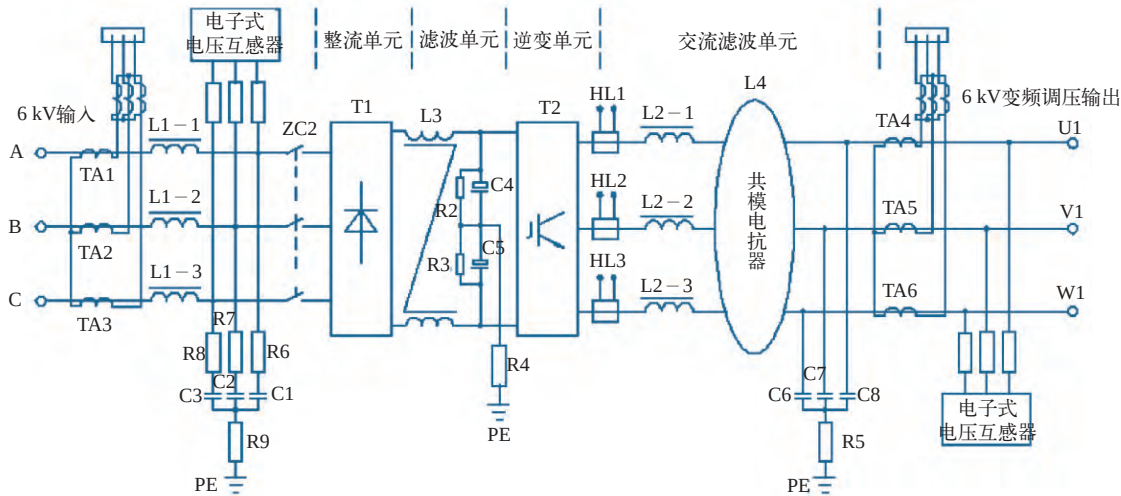


图3 高压变频柜主接线图

根据实测数据计算分析高压变频器节电效果 分别经过24 h现场连续测试记录，数据对比见表1
(1) 风量调节挡板控制和变频器调速控制， 所示。

表1 24 h测量记录数据对比

时间	风量调节挡板控制模式			变频器调速控制模式		
	电压/kV	电流/A	$\cos\theta_1$	电压/KV	电流/A	$\cos\theta_2$
1:00	6	39	0.85	6	33	0.95
2:00	6	39	0.85	6	33	0.95
3:00	6	39	0.85	6	33	0.95
4:00	6	39	0.85	6	34	0.95
5:00	6	39	0.85	6	34	0.95
6:00	6	39	0.85	6	34	0.95
7:00	6	39	0.85	6	35	0.95
8:00	6	39	0.85	6	35	0.95
9:00	6	39	0.85	6	35	0.95
10:00	6	39	0.85	6	35	0.95

时间	风量调节挡板控制模式			变频器调速控制模式		
	电压/kV	电流/A	$\cos\theta_1$	电压/KV	电流/A	$\cos\theta_2$
11:00	6	40	0.85	6	37	0.95
12:00	6	40	0.85	6	37	0.95
13:00	6	41	0.85	6	38	0.95
14:00	6	41	0.85	6	38	0.95
15:00	6	42	0.85	6	40	0.95
16:00	6	42	0.85	6	40	0.95
17:00	6	40	0.85	6	37	0.95
18:00	6	40	0.85	6	37	0.95
19:00	6	39	0.85	6	36	0.95
20:00	6	39	0.85	6	36	0.95
21:00	6	39	0.85	6	35	0.95
22:00	6	39	0.85	6	35	0.95
23:00	6	39	0.85	6	34	0.95
0:00	6	39	0.85	6	33	0.95

节电效果计算分析如下

1) 根据离心式风机的相似定律, 有以下关系:

$$\frac{q}{q_1} = \frac{n}{n_1} \quad (\text{风量})$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2, \quad \frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 \quad (\text{风压})$$

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 \quad (\text{风机轴功率})$$

所以有:

$$f \text{ (频率)} \propto n \text{ (转速)} \propto Q \text{ (风量)}$$

$$f \text{ (频率)} \propto n \text{ (转速)} \propto H_2 \text{ (风压)}$$

$$f \text{ (频率)} \propto n \text{ (转速)} \propto N_3 \text{ (风机轴功率)}$$

由 $\frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3$ 可得:

$$\text{负荷率 } P_p = I_p / I_g \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{节电率 } \Delta_{\text{rhm}} = [1 - (f_q / f_e)^3] \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{轴功率 } P_q = P_g \times (f_q / f_e)^3 \quad (3)$$

P_p 为负荷率; I_p 为变频器输入电流 (A); I_g 为 (工频) 满负荷电流 (A); Δ_{rhm} 为节电率; 电动机型号: Y400-54-6-S; 额定功率: 400 kW; 额定电流: 47.7 A。

f_q 为变频器输出频率 (Hz); f_e 为额定频率 (Hz); P_q 为轴功率 (kW); P_g 为 (工频) 满功率 (kW); 额定电压: 6 000 V; 额定转速: 986 r/min; 效率: 98%; 变频器效率: 98%。

在锅炉运行负荷高峰时, 风机入口调节挡板开度在 70%~75% 就可满足风量需要, 此时电动机的工频运行电流为 42 A, 即最大运行工况风量下的电流 (而不是电动机的额定电流), 其电动机输入功率为: $P_g = 3 \times U_e \times I_g \times \cos\theta_1$ (工频) $= 3 \times 6 \times 42 \times 0.85 \approx 371 \text{ kW} < \text{电动机额定功率 } 400 \text{ kW}$ 如果保持锅炉运行所需风量不变, 风量调节挡板全部打开后, 采用变频控制。将表 1 实测数据分段取平均值, 并分别代入式 (1)、式 (2)、式 (3),

得到引风机在变频控制时节能计算结果, 计算的参数电压和电流值取自于变频器输入端, 因为变频器输入功率 $P =$ 风机轴功率 $P_q +$ (变频器及电动机损耗), 在这里为了便于分析忽略变频器和电动机的损耗 $P \approx P_q$, 计算结果见表 2 所示。

表 2 变频控制节能参数

(工频) 锅炉满负荷时 电动机输入电流 I_g /A	42						
(变频) 变频器 输入电流 I_p /A	40	38	37	36	35	34	33
负荷率 P_p (%)	95.2	90.5	88.1	85.7	83.3	81	78.6
频率 f_q /Hz	47.6	45.3	44.1	42.9	41.7	40.5	39.3
变频器输入功率 $P \approx P_q$ (%)	86.3	74.4	68.6	63.2	58	53.1	48.6
节电率 Δ_{rhm} (%)	13.7	25.6	31.4	36.8	42	46.9	51.4

工频运行模式 (风量调节挡板控制): 虽然电动机的额定功率是 400 kW, 但是锅炉 100% 负荷时电动机的实际输入功率只有 371 kW。

变频运行模式 (调速控制): 当锅炉满负荷运行时, 变频器输入功率 (电流) 只是工频运行时功耗 371 kW 的 86.3%; 运行经验表明, 锅炉满负荷时风量的 60% 位置上, 是锅炉安全稳定运行的最低风量线, 也就是说无论是工频运行模式还是变频运行模式均不能低于此风量线, 否则炉膛内易产生正压对低负荷工况运行极不安全。由表 2 可以看出, 变频调速节能效果非常显著, 特别是在低负荷区段。

2. 节电量计算

根据一天内风机变频调速运行的实际情况, 数据见表 1 所示。

(1) 在 11:00~20:00 等 9 h 为负荷高峰, 其工况为变频调速运行, 变频器输入电流平均值为 $I_p = 37.6 \text{ A}$ 。

由此可知当前变频运行实际负荷率为:

$$P_p = I_p / I_g \times 100\% = 37.6/42 \times 100\% = 89.5\%$$

在此工况下变频器平均运行频率将为:

$$50 \text{ Hz} \times 89.5\% \text{ (实际负荷率)} = 44.8 \text{ Hz}$$

依据离心式风机的轴功率与频率的三次方近似成正比的相似定律,其变频调速节电率为:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{rhm}} &= [1 - (f_q/f_e)^3] \times 100\% \\ &= [1 - (44.8 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})^3] \times 100\% = 28.1\% \end{aligned}$$

另外,变频器的效率为98%,电动机的效率为98%,按年300天运行节电量为:

$$371 \text{ kW} \times 89.5\% \times (28.1\% - 4\%) \times 10 \text{ h} \times 300 \text{ 天} \approx 24 \text{ 万kW}\cdot\text{h}$$

(2) 在23:00~06:00等8 h为负荷低谷,其工况为变频调速运行,变频器输入电流平均值为 $I_p = 33.5 \text{ A}$ 。

由此可知当前变频运行实际负荷率为:

$$P_p = [I_p / I_g] \times 100\% = 33.5/42 \times 100\% = 80\%。$$

在此工况下变频器平均运行频率将为:

$$50 \text{ Hz} \times 80\% \text{ (实际负荷率)} = 40 \text{ Hz}$$

依据离心式风机的轴功率与频率的三次方近似成正比的相似定律,其变频调速节电率

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{rhm}} &= [1 - (f_q/f_e)^3] \times 100\% \\ &= [1 - (40 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})^3] \times 100\% = 48.8\% \end{aligned}$$

另外,变频器的效率为98%,电动机的效率为98%,按年300天运行节电量为:

$$371 \text{ kW} \times 80\% \times (48.8\% - 4\%) \times 10 \text{ h} \times 300 \text{ 天} \approx 40 \text{ 万kW}\cdot\text{h}$$

(3) 在07:00~10:00、21:00~22:00等6个小时为一天的平均负荷,其工况为变频器调速运行,变频器输入电流平均值为 $I_p = 35 \text{ A}$ 。

由此可知当前变频运行实际负荷率为:

$$P_p = [I_p / I_g] \times 100\% = 35/42 \times 100\% = 83.3\%。$$

在此工况下变频器平均运行频率将为:

$$50 \text{ Hz} \times 83.3\% \text{ (实际负荷率)} = 41.7 \text{ Hz}$$

依据离心式风机的轴功率与频率的三次方近似成正比的相似定律,其变频调速节电率

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{rhm}} &= [1 - (f_q/f_e)^3] \times 100\% \\ &= [1 - (41.7 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})^3] \times 100\% = 42\% \end{aligned}$$

另外,变频器的自身损耗为3%,按年300天运行节电量为:

$$371 \text{ kW} \times 83.3\% \times (42\% - 4\%) \times 10 \text{ h} \times 300 \text{ 天} \approx 35 \text{ 万kW}\cdot\text{h}$$

(4) 变频运行全年节电量 = 24 + 40 + 35 = 99万kW·h

当前平均电价: 0.53元/kW·h

全年节电价值: 0.53 × 99 = 52万元

全年平均节电率为:

$$(28.1\% + 48.8\% + 42\%) / 3 = 39.6\%$$

结束语

通过对引风机的变频调速改造,可以使引风机随着锅炉负荷的变化无级调节其转速,有助于提高生产效率和机组自动化水平。经过较长时间的运行检验,该产品性能稳定可靠、功能齐全、技术先进,验证了国产自主开发的高压变频器在技术上已经处于世界先进水平。采用变频调速技术后,可以有效降低风机的振动和噪声,使引风机和电动机在启动时免受冲击,特别是减轻了风机叶轮、轴瓦、电动机轴承等的磨损,减少了风机和电动机维护量,降低了维修费用,延长了设备的使用寿命。电动机定子绕组大多数时间是在额定电压以下运行,定子绕组相对提高了绝缘水平,改善了风机和电动机的运行工况,变频调节风量节电效果显著,特别是在低负荷区段节电量随负荷下降而提高,功率因数的提高降低了大马拉小车带来的无功功率损耗,降低了企业生产成本,在高压变频改造领域具有极大的推广价值。EA

(收稿日期: 2015.09.25)

(编辑: 白文亭)

(上接第56页)

电的措施受限于电网层面特高压以及智能电网的建设,另一方面,目前用于提高风电电能质量的尝试较少,而要提高风电自身竞争力,还是要采取风储结合,风气互补等方式。而风储结合高昂的价格将限制其发展,从而使风储结合停留在为解决弃风限电不得不采取的技术手段。

通过有计划的国家引导、构建智能电网、完

善的电力市场情况将进一步促进风火置换、风电供热、风储结合技术的发展和运用,合理的使用应对措施,将保障电网运行的安全稳定,同时逐步提高清洁能源的上网比例。因此解决弃风限电需要国家和企业共同面对。EA

(收稿日期: 2015.10.11)

(编辑: 白文亭)