

定功率条件下低压省煤器对机组热经济性的影响

庞乐

(华电电力科学研究院 浙江 杭州 310030)

摘要: 本文基于热耗变换系数的理论,进行数学推导,建立了定功率条件下低压省煤器对机组热经济性影响的数学计算模型。对低压省煤器热经济性原理和热耗变换系数法在低压省煤器中的应用进行研究,以国产300 MW 机组热力系统为例,分别计算了75%、100% THA 下的节能量。研究表明,在100% THA 和75% THA 负荷运行时,低压省煤器机组热耗率分别降低39.88 kJ/(kW·h)和33.95 kJ/(kW·h),供电煤耗分别降低1.44 g/(kW·h)和1.19 g/(kW·h)。低压省煤器吸收的热量输入到给水回热系统后对机组循环吸热量将产生影响,可以为优化低省水侧管道连接提供参考。

关键词: 定功率法; 低压省煤器; 机组热经济性; 热耗变换系数

中图分类号: 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.017

引言

当前,电站锅炉排烟温度偏高现象非常普遍^[1],其主要原因是电站锅炉往往掺烧褐煤或采用纯烧褐煤。由于褐煤热值低、水分大,使燃用煤种严重偏离设计煤种,导致锅炉排烟温度偏高;另外,炉膛与空气预热器漏风增大、受热面灰污等也会造成排烟温度升高。当排烟温度超过设计值20℃时,会引起机组热效率降低0.6%~0.8%,标准煤耗率上升2~3 g/(kW·h)^[2]。

在国家节能减排及指标倒逼的政策刺激下,燃煤电厂纷纷安装低压省煤器(以下简称“低省”)以充分利用锅炉余热,降低电厂能耗指标。低省一般与汽轮机低压加热器并联布置,抽取部分凝结水利用锅炉尾部烟气加热升温后在除氧器入口处与主凝结水汇合,使低压回热抽汽量减少,排挤抽汽回到汽轮机继续做功^[3]。由于汽轮机在相同的吸热量下,能发出更大的功率,因而机组实际热耗率降低。

如何客观评价低省的热经济性,是决定其是否

安装的关键所在。各文献一般都采用等效焓降法计算安装低省后汽轮机做功的增加量^[4~6],然后折算到煤耗上。但是,等效焓降法是在定流量的条件下,计算做功能力的增加,与一般节能改造降耗以定功率下煤耗的降低量为评价指标不一致,需要进行折算处理,存在一定程度的近似;另外,等效焓降法没有考虑低省抽水对抽汽汽流的影响^[2],因此,用等效焓降法评价低省的热经济性存在一定的不足之处。本文根据电厂的实际运行情况,采用热耗变化系数法对低省的热经济性进行理论分析^[7],其可在定功率的条件下计算由于低压回热系统热量的输入使汽轮机吸热的减少量即汽轮机热耗率的降低量,其指标具有通用可比性,便于核算改造投资的回收周期。该方法能更直观地评价低省的改造效果,并且没有进行任何简化处理,其计算结果也更为真实。

1 定功率下机组热经济性分析模型

1.1 热耗变换系数理论

热耗变换系数是反映电厂热力系统中抽汽品质的一个参数,是能量转移变换的比例系数,其定义式如下:

$$\varepsilon_i = - \left(\frac{\partial(Q_m + Q_{in})}{\partial \Delta Q_i} \right)_{P=\text{常数}} \quad (1)$$

式中: Q_m 、 Q_{in} —主蒸汽、再热蒸汽吸热量(两者之和为循环吸热量),kJ/h; ΔQ_i —从第*i*级抽汽输入或输出的微小热量,kJ/h; P —汽轮机发出的功率,kW。

式(1)表明:在汽轮机发出的功率不变的情况下,从外界输入一个微小的热量到热力系统中,汽轮机循环吸热量减少;相反,若从汽轮机热力系统中输出一个微小的热量到外界,其循环吸热量将增大。热耗变换系数的意义就是从外界输入到热力系统或从热力系统输出到外界单位热量后汽轮机循环吸热量的变化量,是汽轮机热耗量对热力系统边界受到

收稿日期:2015-10-23; 修订日期:2015-11-10

作者简介:庞乐(1984-),男,湖北崇阳人,华电电力科学研究院工程师。

能量扰动的反映。在定功率情况下,各抽汽段蒸汽的品位不同,热耗变化系数也不同,其数值介于 0 ~ 1 之间,其中主蒸汽为 1,低压缸排汽为零。

这里引出“热耗变换系数”时认为进出热力系统的热量是微小的,在低省热经济性计算中,并不意味着其变化量必须是微小量。根据文献 [2 ~ 3] 的论证,加装低省对汽轮机相对内效率和真空的影响可以忽略不计,这说明抽汽被排挤回汽轮机重新做功时,汽轮机的膨胀过程线基本保持不变。因此,利用热耗变换系数法计算低省的热经济性,其反映的是从某级加热器输入的热量按当前的热耗变换系数折算到整个循环的吸热量变化。低省投入运行时,热力系统是一个稳定的换热过程,也就不必限定其输入热力系统的热量必须是微小的。

1.2 热耗变化系数的计算方法

根据文献 [7] 的推导,得出热耗变换系数、主循环热效率和抽汽效率之间的关系式如下:

$$\varepsilon_i = \frac{\eta_i}{\eta_M} \quad (2)$$

式中: η_i —抽汽效率,%; η_M —主循环效率,%。

3 个参数只要确定了任意 2 个,就能通过式 (2) 的关系式得出第 3 个,下面介绍主循环效率和抽汽效率的计算方法。

1.2.1 主循环效率的计算

主循环效率是指汽轮机发出功率与循环吸热量的比值,其计算公式为:

$$\eta_M = \frac{P}{Q_m + Q_{rh}} \quad (3)$$

式中: P —汽轮机的功率, kW;

其中,

$$Q_m + Q_{rh} = D_0 \{ (q_m + q_{rh}) - [\alpha]^T [q_{rh}] \} \quad (4)$$

式中: q_m —从给水到主蒸汽的焓升, kJ/kg; q_{rh} —再热冷段到再热热段的焓升, kJ/kg; $[\alpha]$ —抽汽份额, %。

$$[\alpha] = \left[\frac{D_1}{D_0}, \frac{D_2}{D_0}, \dots, \frac{D_n}{D_0} \right] \quad (5)$$

式中: D_1, D_2, \dots, D_n —各级加热器的抽汽量, t/h。

$$P = D_0 \{ (h_0 - h_c + \sigma) - [\alpha]^T [h^\sigma] \} \quad (6)$$

式中: h_0 —主蒸汽焓, kJ/kg; h_c —低压缸排汽焓, kJ/kg; $[h^\sigma]$ —各级抽汽做功不足组成的矢量。

1.2.2 抽汽效率的计算

汽轮机抽汽效率是指抽汽回热系统中,排挤抽汽的做功量与需要加入热量的比值,为叙述方便,将某引进型 300 MW 机组抽汽回热系统编号如图 1 所

示,相应的抽汽级数与加热器编号相同。

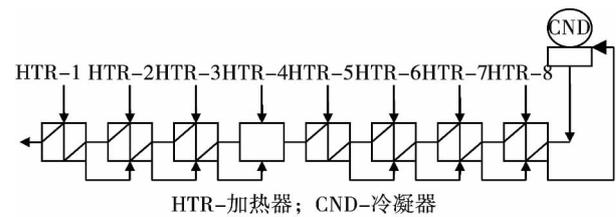


图 1 某 300 MW 机组回热系统简图

Fig. 1 Simplified diagram of the recuperative system of a 300 MW unit

在回热系统中,给水依次通过各台加热器与抽汽换热,其中 4 号加热器为混合式即除氧器,其它的加热器为表面式,给水在加热器中的焓升为:

$$\Delta h_i = \bar{h}_i - \bar{h}_{i-1} \quad (7)$$

式中: \bar{h}_i —第 i 级加热器的出口水焓, kJ/kg;

回热抽汽在加热器中放热凝结为疏水,其放热量为:

$$q_i = h_i - \bar{h}_{si} \quad (8)$$

式中: q_i —抽汽在加热器中释放出的热量, kJ/kg;

h_i —第 i 级抽汽焓, kJ/kg; \bar{h}_{si} —第 i 级加热器疏水焓,其中对于除氧器 $\bar{h}_{s4} = \bar{h}_5$, kJ/kg。

回热抽汽的疏水向下一级加热器中释放的热量为,

$$\begin{cases} \bar{q}_{s8} = \bar{h}_{s8} - \bar{h}_0 & (i = 8) \\ \bar{q}_{si} = \bar{h}_{si} - \bar{h}_{si+1} & (1 \leq i \leq 7) \end{cases} \quad (9)$$

各级抽汽效率为:

$$\eta_i = \frac{h_{i \text{ eq}}}{q_i} \quad (1 \leq i \leq 8) \quad (10)$$

式中: η_i —第 i 级抽汽效率,%; $h_{i \text{ eq}}$ —第 i 级抽汽的等效焓降, kJ/kg。

其中各级抽汽的等效焓降为:

$$\begin{cases} h_{i \text{ eq}} = h_i - h_{i+1} + h_{i+1 \text{ eq}} - \eta_{i+1} q_{si+1} & (3 \leq i \leq 7, i \neq 4) \\ h_{4 \text{ eq}} = h_4 - h_5 + h_{5 \text{ eq}} - \eta_5 \Delta h_5 & (i = 4) \\ h_{8 \text{ eq}} = h_8 - h_c & (i = 8) \end{cases} \quad (11)$$

由于 1、2 级抽汽排挤入汽轮机后,由于再热的作用重新回到锅炉吸热,其计算公式为:

$$h_{2 \text{ eq}} = h_2 - h_3 + q_{rh} + h_{3 \text{ eq}} - \eta_3 \bar{q}_{s3} \quad (12)$$

$$h_{1 \text{ eq}} = h_1 - h_2 + h_{2 \text{ eq}} - \eta_2 \bar{q}_{s2} \quad (13)$$

2 定功率下低压省煤器节能计算方法

某电厂低压省煤器布置如图2所示,该低压省煤器与5号、6号低压加热器并联,抽取其入口部分凝结水经低省与锅炉尾部烟气进行热交换升温后,在5号低加出口处和主凝结水合并进入除氧器。

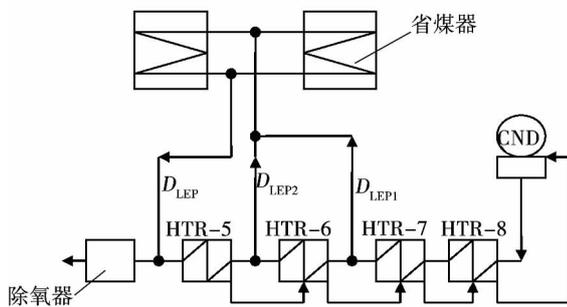


图2 低压省煤器连接方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of the connection modes of the low pressure economizers

低省抽取5号、6号低加出口凝结后,进入这两个低加的凝结水量变少,相同的凝结水温升所需要的抽汽量就变少,从而排挤抽汽进入汽轮机继续做功。根据热耗变化系数法理论,低省的作用实质是从外界向5号、6号低加输入了一定的热量,在发出功率不变的情况下,汽轮机循环吸热量减少。设从低省输入到5号、6号低加和除氧器的热量分别为 Q_5 、 Q_6 、 Q_4 ,则:

$$Q_5 = (D_{LPE1} + D_{LPE2}) \cdot (\bar{h}_5 - \bar{h}_6) \quad (14)$$

式中: D_{LPE1} —从6号低加入口抽取的凝结水量,kg/h; D_{LPE2} —从5号低加入口抽取的凝结水量,kg/h。

$$Q_6 = D_{LPE1} \cdot (\bar{h}_6 - \bar{h}_7) \quad (15)$$

$$Q_4 = D_{LPE} \cdot (h_{LPE} - \bar{h}_5) \quad (16)$$

式中: D_{LPE} —低省回水量,为 D_{LPE1} 和 D_{LPE2} 之和,kg/h; h_{LPE} —低省回水焓,kJ/kg。

当 $h_{LPE} > \bar{h}_5$ 时,相当于外界向除氧器输入热量 Q_3 ,除氧器抽汽也将被排挤回汽轮机继续做功,相应的使循环吸热量减少;当 $h_{LPE} < \bar{h}_5$ 时,相当于除氧器向外界输出热量 Q_3 ,那么就需要增加抽汽量来维持除氧器热平衡,相应的使循环吸热量增加;当 $h_{LPE} = \bar{h}_5$ 时,低省对除氧器没有影响。

根据热耗变换系数理论,当外界向系统输入热

量 Q 时,在汽轮机输出功率不变的情况下,其循环吸热量减少 εQ ,设在安装低省前,汽轮机输出功率 P 时,其循环吸热量为 Q_0 , $Q_0 = Q_m + Q_{th}$,那么在安装低省后,汽轮机输出同样的功率,其循环吸热量为 Q'_0 ,那么:

$$\Delta Q_0 = Q_0 - Q'_0 = (\varepsilon_6 Q_6 + \varepsilon_5 Q_5 + \varepsilon_4 Q_4) \quad (17)$$

式中: ΔQ_0 —循环吸热减少量,kJ/h。

考虑到低压省煤器的安装导致锅炉排烟阻力增加,造成锅炉引风机的出力增大,使引风机的电耗增加,另外管道泵也会增加一定的电耗^[8]。设由于低省的安装,使厂用电率的增加量为 $\Delta \eta_a$ 。

那么机组供电煤耗的减少量为:

$$\Delta b_n = \frac{1}{29.3076 \eta_g \eta_b \eta_p W} \left[\frac{Q_0}{1 - \eta_a} - \frac{Q_0 - \Delta Q_0}{(1 - \eta_a - \Delta \eta_a)} \right] \quad (18)$$

式中: η_g —发电机效率,%; η_b —锅炉效率,%; η_p —管道效率,%。

3 应用实例

以某热电厂国产N300-16.7/537/537型机组为例进行分析,该机组为亚临界、一次中间再热、高中压合缸,双缸双排汽、单轴、反动、凝汽式机组,具有八段非调整抽汽对应相应的加热器,其原始工质设计参数从略,低省布置如图2所示。

用上面叙述的方法计算抽汽效率、主循环效率和热耗变换系数,结果汇总如表1所示。

表1 抽汽热耗变换系数计算结果

Tab.1 Calculation results of the convertible coefficients of the steam extraction heat rates

参数	四抽	五抽	六抽	七抽	八抽
主循环效率 η_M	0.455 6	0.455 6	0.455 6	0.455 6	0.455 6
100%负荷 抽汽效率 η_i	0.303 4	0.221 1	0.169 7	0.125 9	0.071 5
热耗变换系数 ε_i	0.665 8	0.485 2	0.372 5	0.276 4	0.156 9
主循环效率 η_M	0.448 2	0.448 2	0.448 2	0.448 2	0.448 2
75%负荷 抽汽效率 η_i	0.295 9	0.216 4	0.164 0	0.118 9	0.066 5
热耗变换系数 ε_i	0.660 2	0.482 9	0.366 0	0.265 4	0.148 3

由表1计算结果可知,随着抽汽参数的提高,热耗变换系数逐渐增大,从外界向回热系统输入相同的热量,在高参数段输入会使循环吸热的减少量更大,这就说明在满足参数要求的前提下,低省吸收的

热量应尽量输出到汽机回热系统的高参数段。热耗变换系数在低负荷时较小,说明随着负荷的降低,外界输入的热量对循环吸热的影响也逐渐减少,所以低省在高负荷时节能效果更佳。

根据实际运行情况,采集75%THA和100%THA 2个工况的实际运行数据,利用本文的方法计算低省节能量,其结果如表2所示。

表2 低省节能量计算结果

Tab. 2 Calculation results of the amount of energy saved by using the low pressure economizers

参数	75% THA	100% THA
发电机功率 W/MW	225	300
低省入口流量 $D_{\text{LEP1}}/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	52.72	128.61
低省入口流量 $D_{\text{LEP2}}/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	30.35	26.45
低省入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	83.54	86.98
低省出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	129.95	130.15
省煤器出口水焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	547.16	547.99
循环吸热减少量 $\Delta Q_0/\text{kJ} \cdot 10^3 \cdot \text{h}^{-1}$	7 638.13	11 962.55
热耗率减少量/ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})$	33.95	39.88
锅炉效率/ $\%$	91.06	91.56
厂用电率/ $\%$	5.45	5.02
厂用电率增量 $\Delta \eta_a/\%$	0.049 0	0.043 1
供电煤耗减量 $\Delta b_n/\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})$	1.19	1.44

由于作为电厂考核指标的供电煤耗,包含锅炉效率和厂用电率的影响,在不同负荷下,这两个参数不同,本文采用试验的方法获取该两数据如表2所示,并考虑到由于低省的安装使厂用电率的增加量。计算结果表明,该机组在安装低省后,在100%THA负荷运行时使供电煤耗降低1.44 g/(kW·h),在75%THA负荷运行时使供电煤耗降低1.19 g/(kW·h),节能效果较为显著。

4 结 论

通过上述计算分析,得到以下三点结论:

(1) 通过本文提供的计算方法,可以确定各抽汽段的热耗变换系数,得出低压省煤器吸收的热量输入到回热系统后对机组循环吸热量的影响,便于优化低省水侧管道连接;

(2) 在定功率下,采用热耗系数法计算出机组在安装了低压省煤器后,在不同负荷下的热经济性。在100%THA和75%THA负荷运行时,使机组热耗率分别降低39.88 kJ/(kW·h)和33.95 kJ/(kW·h),供电

煤耗分别降低1.44 g/(kW·h)和1.19 g/(kW·h);

(3) 采用热耗变换系数法可以得出在定功率下低压省煤器的热经济性,便于对比评价机组改造效果,而通过等效焓降法得到的是定流量下的机组热经济性,其结果可比性不强。

参考文献:

- [1] 牛树赞,孙奉仲.利用低压省煤器实施300 MW CFB 锅炉排烟余热利用改造[J].电站系统工程,2013,29(1):24~26.
NIU Shu-yun, SUN Feng-zhong. Flue gas waste heat utilization and reconstruction of a 300MW CFB boiler implemented by making use of low pressure economizers[J]. Power Plant System Engineering, 2013, 29(1): 24~26.
- [2] 安恩科,马健越.加装低压省煤器对汽轮机相对内效率的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(10):1492~1496.
AN En-ke, MA Jian-yue. Effect of the additional installation of low pressure economizers on the relative internal efficiency of a steam turbine[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(10): 1492~1496.
- [3] 黄新元,孙奉仲,史月涛.火电厂热系统增设低压省煤器的节能效果[J].热力发电,2008,37(3):56~58.
HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao. Energy-saving effectiveness achieved by additionally installing low pressure economizers in the thermodynamic system of a thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(3): 56~58.
- [4] 吕太,张子建,张素娟.600 MW 锅炉低压省煤器水侧连接优化选择[J].热能动力工程,2013,28(4):368~372.
LU Tai, ZHANG Zi-jian, ZHANG Su-juan. Optimized choice of the connection at the water side of the low pressure economizer of a 600 MW boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(4): 368~372.
- [5] 温山,阎维平,常建刚,等.双级低压省煤器技术及其经济性分析[J].热力发电,2013,42(2):7~11.
WEN Shan, YAN Wei-ping, CHANG Jian-gang, et al. Two-stage low pressure economizer technology and its economic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(2): 7~11.
- [6] 张红方,王勇,田松峰,等.基于等效焓降法的低压省煤器系统经济性分析[J].节能技术,2011,29(169):457~461.
ZHANG Hong-fang, WANG Yong, TIAN Song-feng, et al. Cost-effective analysis of a low pressure economizer system based on the equivalent enthalpy drop method[J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(169): 457~461.
- [7] 郭民臣,魏楠,杨勇平.热耗变换系数、抽汽效率与主循环效率[J].电机工程学报,2001,21(10):83~87.
GUO Min-chen, WEI Nan, YANG Yong-ping. Heat rate convertible coefficient, steam extraction efficiency and main cycle efficiency[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2001, 21(10): 83~87.
- [8] 任彦,赵宁,陈晓峰.火力发电厂低压省煤器系统的节能效果研究[J].热能动力工程,2013,28(4):372~377.
REN Yan, ZHAO Ning, CHEN Xiao-feng. Study of the energy-saving effectiveness of a low pressure economizer system in a thermal power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(4): 372~377.

(刘瑶 编辑)

gies will be the cement kiln co-disposal technology and the chain grate furnace disposal technology respectively, of which the corresponding mass concentrations of dioxins will vary in a range from 1.05 to 4.68 ng/m³ and from 0.11 to 1.63 ng/m³ respectively and the total toxicity equivalent I-TEQ will fall in a range from 0.0066 to 0.0095 ng I-TEQ/m³ and from 0.010 to 0.060 ng I-TEQ/m³ respectively, all of which being better than the corresponding national standards for the emissions. **Key words:** incineration of municipal solid wastes, cement kiln co-disposal, dioxins, optimization

定功率条件下低压省煤器对机组热经济性的影响 = **Influence of a Low Pressure Economizer on the Thermal Cost-effectiveness of Its Unit at a Constant Power Output** [刊, 汉] / PANG Le (Huadian Electric Power Science Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 100 ~ 103

Based on the heat rate convertible coefficient theory, a mathematical derivation was performed and a mathematical model for calculating the influence of a low pressure economizer on the thermal cost-effectiveness of its unit at a constant power output and applications of the low pressure economizer thermal cost-effectiveness theory and the heat rate convertible coefficient method in low pressure economizers were investigated. With the thermal system of a domestically-made 300 MW unit serving as an example, the quantities of energy saved were calculated respectively at the 75% and 100% load under the condition of the turbine heat acceptance (THA). It has been found that when operating at the 75% and 100% load under the condition of the turbine heat acceptance (THA), the heat rates of the low pressure economizer unit can decline by 39.88 kJ/(kW·h) and 33.95 kJ/(kW·h) respectively and the power supply coal consumption rate can decrease by 1.44 g/(kW·h) and 1.19 g/(kW·h) respectively. The magnitude of the influence of the heat quantity absorbed by the low pressure economizer on the heat quantity absorbed in the cyclic processes of the unit after having being input into the thermal system of the steam turbine was obtained, thus facilitating to optimize the connection with the pipelines at the water side of the low pressure economizer. **Key words:** constant power method, low pressure economizer, thermal cost-effectiveness of a unit, heat rate convertible coefficient

绝缘子表面积污规律的数值模拟研究 = **Study of the Numerical Simulation of the Law Governing the Foul Deposition on the Surface of an Insulator** [刊, 汉] / ZHANG Lin, YUAN Zhu-lin (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), GAO Song (Electric Power Science Academy, Jiangsu Provincial Electric Power Company, Nanjing, China, Post Code: 211103), WANG Yong-wei (College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing, China, Post Code: 210044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 104 ~ 112

To investigate the law governing the foul deposition on the surface insulators in transmission lines, with model XWP2-160 insulators serving as the object of study and by employing the CFD method, a numerical simulation was