

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.007

直冷式空冷机组燃料 BTU 实时校正方法研究

郝晓辉, 刘鑫屏

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

摘要: 煤质的频繁变化严重影响着直冷式空冷机组的特性和效率。火电厂来煤不稳定且实际煤种发热量很难实时准确的得到, 给机组协调控制系统的设计带来很大困难。对此, 针对直冷式空冷机组研究了一种基于模型的燃料 BTU 校正方法, 用机组负荷实际值与机组模型负荷预测值的比值来反映实际煤种发热量与设计煤种发热量的关系, 实时校正进入锅炉的燃料量, 消除入炉煤质变化对机组协调控制系统的影响。经仿真实验和实际数据验证: 在煤质频繁波动情况下协调控制系统控制品质良好, 煤质稳定情况下不会对协调控制产生影响; 得到的 BTU 校正系数不受模型输入信号的影响, 能实时准确反映实际煤发热量的变化。该方法可行且有效, 可适应现场煤质频繁变化的情况。

关键词: 直冷式空冷机组; 煤发热量; BTU 校正

中图分类号: TK323

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0032-05

Study on Real-time Correction Method of Fuel BTU for Direct Air-cooling Unit

HAO Xiaohui, LIU Xinping

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The frequent changes of coal calorific value seriously affect the characteristics and efficiency of direct air-cooling unit. Source instability of coal in thermal power plant and difficulty in getting the actual calorific value of coal real-time and accuracy brings great difficulties for the design of unit coordinated control system. Therefore, A model-based fuel BTU correction method for direct air-cooling unit is studied. The ratio between the actual value of the unit load and the forecast load of the unit model is used to reflect the relationship between the calorific value of the actual coal and design of calorific value of coal. Therefore, the fuel quantity entering the boiler is corrected in real time and the influence of coal calorific value variation on the unit coordinated control system is eliminated. Through simulation experiment and actual data validation, the coordination control system has good control quality in the case of frequent coal calorific value fluctuation and there is no effect when coal calorific value is stable. What's more, the obtained BTU correction coefficient is not affected by the input signal of model, which can accurately reflect the actual coal calorific value changes in real time. This method is feasible and effective and it can be adapted to the frequent changes of coal quality in the field.

Key words: direct air-cooling unit; coal calorific value; BTU correction

直冷式空冷机组在不同负荷阶段、不同环境工况下, 入炉煤发热量的变化直接影响机组特性和效率^[1]。目前, 火电厂来煤不稳定且大多数燃用煤种均偏离设计煤种, 严重影响着控制指标的品质和系

统的稳定性^[2-5]。对于机组控制系统来说, 入炉煤质实时的变化影响着锅炉的燃烧状态, 进而影响燃料控制系统。因此, 燃料发热量校正回路(燃料 BTU 校正)是机组燃料控制系统设计中的一重要内容^[6]。

燃料 BTU 校正的基本思想是: 根据实际煤发热量与设计煤种发热量的偏差来对燃料量进行补偿^[7]。本文针对直冷式空冷机组, 研究了一种基于机组负荷-压力动态模型的燃料 BTU 校正方法, 实时校正锅炉的燃料量, 进而消除入炉煤质变化对

收稿日期: 2016-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2012CB215200); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS145)

作者简介: 郝晓辉(1992), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事数据融合技术研究工作(e-mail)1360716194@qq.com。

机组协调控制系统的影响。通过与传统 BTU 校正方法对比和对基于机组模型的燃料 BTU 校正方法进行机理分析,来说明该方法的特点,最后利用机组实际运行数据来进一步验证该方法的优点及实际应用中的有效性。

1 传统 BTU 校正方法

煤发热量有高位发热量和低位发热量之分,高位发热量与低位发热量的区别在于燃料燃烧产物中的水呈液态还是气态,水呈液态为高位发热量,水呈气态为低位发热量。在电厂中煤在锅炉中进行燃烧,锅炉中的温度超过水蒸气的凝结温度,因此本文提到的煤发热量均为煤的低位发热量。

传统煤种热值校正系数 BTU 是根据实际功率通过燃料量和负荷之间的对应关系,计算出理论燃料量^[8]。接着对理论燃料量与实际燃料量的偏差进行积分运算,得到的结果即为 BTU 校正系数^[9]。但该方法存在一定的局限性,如:不能适应煤种的频繁变化,积分参数确定存在困难,BTU 输出易超出上限,启、停磨时扰动大等等。

通常超临界机组燃料 BTU 校正根据锅炉的负荷指令和热负荷(主蒸汽流量)之间的偏差,对发热量信号进行修正。当煤的发热量偏离设计煤种发热量时,这个偏差就会存在,但煤发热量不变,汽机调门发生扰动时同样会影响主蒸汽的流量进而导致负荷指令与热负荷之间出现偏差。这种方法存在的问题是难以区分偏差是由煤发热量变化引起还是由其他扰动导致,一般认为只要偏差存在即是实际煤发热量值偏离设计值,在实际应用过程中会使系统不稳定。

电厂中采用的另外一种 BTU 校正方法是通过定期采样在实验室内化验得到燃料发热量,与设计煤种发热量之间进行适当换算,最后由运行人员手动直接修正锅炉主控指令。这种方法可以保证燃料控制系统的稳定,但由于采样化验时间较长,修正指令存在严重滞后的问题。当煤质频繁变化时,无法实时的校正燃料量的输入。

由上述列举的传统的 BTU 校正方法可见,这些方法并不能在很好的适应煤质频繁波动的情况下保证燃料控制系统的稳定及其他控制指标的品质。

2 机组模型

文献[10]中,在对空冷装置、汽轮机回热加热

系统特性分析的基础上,结合水冷机组负荷-压力动态模型,引入汽轮机效率修正后建立了空冷机组的负荷-压力非线性动态模型,此类典型模型可以描述为:

$$r_m = e^{-\tau s} u_B \quad (1)$$

$$T_f \frac{dr_B}{dt} = -r_B + r_m \quad (2)$$

$$C_b \frac{dp_d}{dt} = -K_3 p_i u_T + K_1 r_B \quad (3)$$

$$p_i = p_d - K_2 (K_1 r_B)^{1.5} \quad (4)$$

$$T_i \frac{dN_E}{dt} = -N_E + K_3 K_4 p_i u_T \quad (5)$$

$$T_n \frac{dK_4}{dt} = -K_4 + (0.958 + 0.00278 p_e)^{-1} \quad (6)$$

$$p_1 = \frac{p_i u_T}{100} \quad (7)$$

式中: u_B 为燃料量, kg/s; u_T 为汽轮机调门开度, %; p_e 为排汽压力, kPa。 p_i 为机前压力, MPa; N_E 为机组负荷, MW; τ 为制粉系统延迟时间, s; r_m 为实际进入磨煤量, kg/s; T_f 为制粉系统惯性时间, s; r_B 为锅炉燃烧率, kg/s; C_b 为锅炉蓄热系数, MJ/MPa; K_3 为汽轮机增益; K_1 为燃料增益; p_d 为汽包压力, MPa; K_2 为过热器压降系数; T_i 为汽轮机惯性时间, s; K_4 为汽轮机效率修正系数; T_n 为环境因素影响汽轮机效率的惯性时间, s; p_1 为汽轮机调节级压力, MPa。

式(1)和式(2)用来描述制粉系统的纯延迟和惯性,式(3)为锅炉能量平衡方程,式(4)描述的是过热器差压特性,式(5)为修正后的汽轮机能量平衡方程,式(6)用来计算汽轮机效率修正系数 K_4 ,式(7)用来描述汽轮机调节级压力。

式(1)~式(6)对应的模型结构如图1所示。图中 $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 和 $F_3(t)$ 均为一阶惯性环节; $F(x)$ 和 $F_1(x)$ 分别拟合式(4)和式(6)中的幂函数。

模型中静态参数可由机组设计参数确定,动态参数需要利用燃料量及汽机高压调门扰动实验确定。在确定模型中参数后,模型输入参数即可计算得到机组负荷和机前压力的预测值。

3 基于模型的燃料 BTU 校正方法

在机组实际运行过程中,实际煤种发热量与设计煤种发热量相等时,机组实际负荷值与由机组负

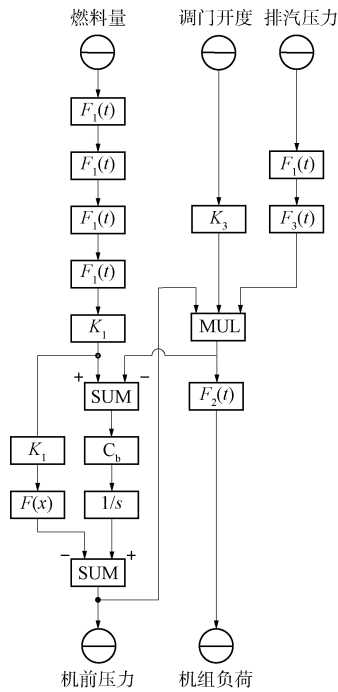


图1 机组模型结构

Fig. 1 The Structure of unit model

荷-压力模型得到的机组负荷预测值近似相等；当实际煤种发热量偏离设计煤种时，机组负荷实际值随实际煤种发热量等比例变化。机组负荷实际值 N_E (MW) 与机组负荷预测值 N_{Es} (MW) 的比值等于实际煤种发热量 Q_{ar} (MJ/kg) 与设计煤种发热量 Q_{ars} (MJ/kg) 的比值，即为 BTU 校正系数。对应的关系如式(8)所示。

$$\frac{N_E}{N_{Es}} = \frac{Q_{ar}}{Q_{ars}} \quad (8)$$

在控制系统设计中，依据机组模型和模型的输入信号，实时得到机组负荷预测值，利用机组负荷实际值除以机组负荷预测值得到 BTU 校正系数，从而实现实时校正锅炉的燃料量，消除煤发热量变化对整个控制系统的影响。

基于模型的燃料 BTU 校正方法，调整的是进入锅炉的实际燃料量，其作用与机组协调控制系统中锅炉主控调整燃料量相同，若两者同时参与调整，将会使系统产生耦合，导致系统不稳定。因此，在控制系统设计时，BTU 校正逻辑中应加入低通滤波器，使得 BTU 校正的频率范围低于锅炉主控调节指令的频率范围，保证控制系统稳定运行。

近年来对机组负荷-压力动态模型研究的深入，使得基于模型的 BTU 校正方法可以忽略燃料量、

汽轮机调门开度和排汽压力对机组负荷预测值的影响，只考虑煤种实际发热量对负荷预测值的影响，可以有效的减小校正信号的误差。

相对于传统的 BTU 校正方法，基于模型的燃料 BTU 校正方法，能根据实际煤种发热量的变化，实时校正进入锅炉的燃料量；能很好的适应煤质频繁波动的情况，保证整个控制系统的稳定。

4 实验验证

4.1 仿真验证

在这里，进行变煤质模拟实验，即模拟煤发热量发生突变的情况下，该基于模型燃料 BTU 校正方法的正确性。通过改变负荷-压力动态模型中的燃料增益 K_1 来间接实现煤发热量的改变^[11]。

当煤发热量发生突变时，机组实际负荷随着发热量的改变而改变，如图2和图3所示。在 $t=200$ s 时，煤发热量由 $19.42 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 突变至 $17.05 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；同时机组负荷由最初的 600 MW 经过一个响应过程最后稳定在 534.5 MW。

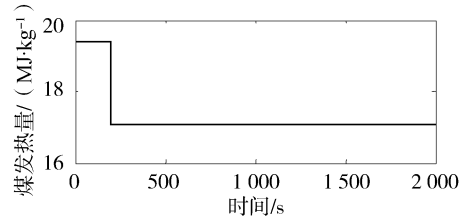


图2 煤发热量变化曲线

Fig. 2 The curve of coal calorific value

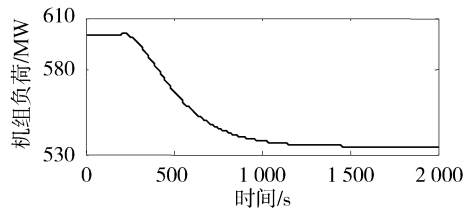


图3 机组负荷变化曲线

Fig. 3 The curve of unit load

实际煤种发热量与设计煤种发热量之比为 $17.05/19.42 \approx 0.88$ ；机组负荷实际值与机组负荷预测值之比为 $534.5/600 \approx 0.89$ 。可见，由机组负荷比值得到的 BTU 校正系数同由煤种发热量比值得到的近似相等。因此，机组负荷实际值与机组负荷预测值的比值能够反映煤发热量的变化，得到的 BTU 校正系数能准确反映实际情况。

4.2 实例验证

针对 DTII 电厂 600 MW 直冷式空冷机组, 模型中参数可根据设计参数和扰动实验确定^[12-13]。模型可描述为:

$$r_m = u_B(t - 25) \quad (9)$$

$$130 \frac{dr_B}{dt} = -r_B + r_m \quad (10)$$

$$3\,500 \frac{dp_d}{dt} = -0.398 p_t u_T + 7.68 r_B \quad (11)$$

$$p_t = p_d - 0.003\,36 r_B^{1.5} \quad (12)$$

$$11 \frac{dN_E}{dt} = -N_E + 0.398 K_4 p_t u_T \quad (13)$$

$$21 \frac{dK_4}{dt} = -K_4 + (0.958 + 0.002\,78 p_e)^{-1} \quad (14)$$

$$p_1 = 0.01 p_t u_T \quad (15)$$

控制系统中投入燃料 BTU 校正的逻辑, 截取现场的实时运行数据, 检验该 BTU 校正方法的有效性。工况 I: 取煤质频繁变化情况下, 机组的实时运行数据, 机组负荷的实际值和预测值如图 4 中所示; 对应的 BTU 校正系数如图 5 中所示, 机前压力实际值与预测值如图 6 中所示。

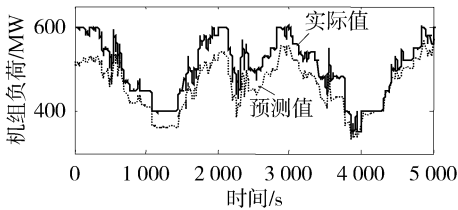


图 4 工况 I 机组负荷对比曲线
Fig. 4 Load curves of condition I

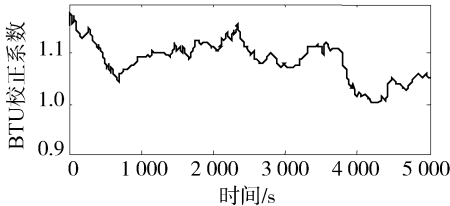


图 5 工况 I BTU 校正系数
Fig. 5 BTU correction coefficient of condition I

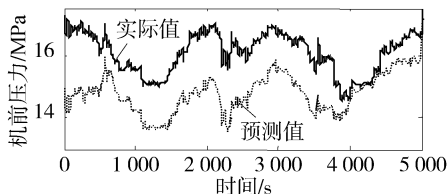


图 6 工况 I 机前压力对比曲线
Fig. 6 Turbine pressure curves of condition I

图 4 中模型负荷预测值同机组负荷实际值的变化趋势一致且均低于机组负荷实际值; 得到的 BTU 校正系数变化范围在 1.00 ~ 1.15 之间。图 6 中模型的预测值与机前压力实际值变化趋势一致, 机组机前压力控制品质较好, 验证了该 BTU 校正方法的有效性。

工况 II: 取煤质较稳定情况下机组的实时运行数据, 机组负荷的实际值和预测值如图 7 中所示, 对应的 BTU 校正系数如图 8 中所示; 机前压力实际值与预测值如图 9 中所示。

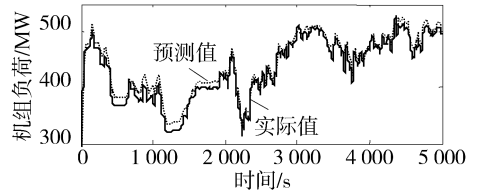


图 7 工况 II 机组负荷对比曲线
Fig. 7 Load curves of condition II

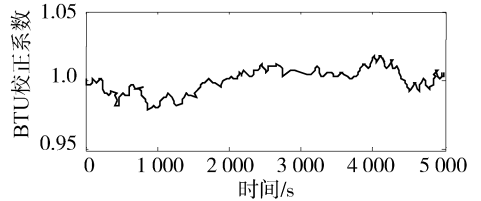


图 8 工况 II BTU 校正系数
Fig. 8 BTU correction coefficient of condition II

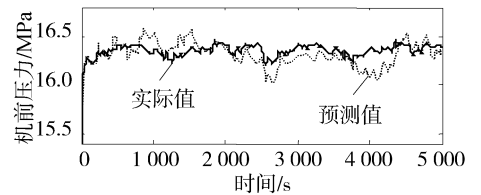


图 9 工况 II 机前压力对比曲线
Fig. 9 Turbine pressure curves of condition II

图 7 和图 9 中机组负荷预测值与机组负荷实际值、机组机前压力预测值与实际值曲线基本保持一致。图 8 中 BTU 校正系数在 0.97 ~ 1.03 之间, 基本保持不变, 与实际工况相符; BTU 校正系数接近于 1 表明实际煤种的发热量与设计煤种发热量近似相等。

空冷机组排汽压力的波动会对协调控制系统带来影响。工况 I 和工况 II 中排汽压力基本不变。在此, 截取排汽压力波动较大时的运行数据进行验证。工况 III: 取排汽压力急剧下降, 煤质较稳定时

的运行数据,排汽压力变化曲线如图 10 所示;机组负荷的实际值和预测值如图 11 中所示,对应的 BTU 校正系数如图 12 中所示,机前压力实际值与预测值如图 13 中所示。

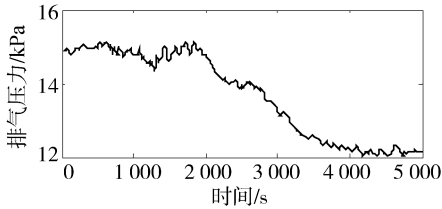


图 10 工况 III 排汽压力

Fig. 10 Exhaust steam pressure of condition III

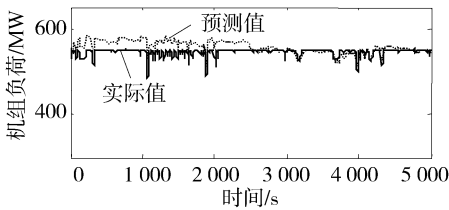


图 11 工况 III 机组负荷对比曲线

Fig. 11 Load curves of condition III

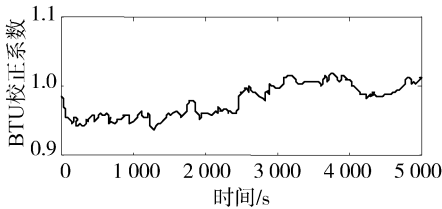


图 12 工况 III BTU 校正系数

Fig. 12 BTU correction coefficient of condition III

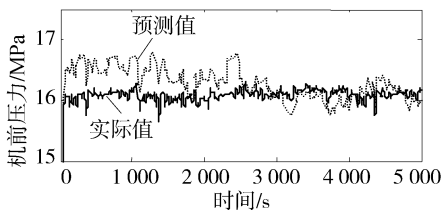


图 13 工况 III 机前压力对比曲线

Fig. 13 Turbine pressure curves of condition III

在排汽压力变化较大的情况下,图 11 和图 13 中机组负荷和机前压力控制品质良好。BTU 校正系数在 0.95 ~ 1.05 之间,与实际煤质稳定的情况符合。

5 结论

针对直冷式空冷机组,采用基于模型的燃料 BTU 校正方法,用机组负荷实际值与模型负荷预测

值的比值得到实时的 BTU 校正系数。可以根据实际煤种的变化,实时调节进入锅炉的给煤量,消除煤发热对整个协调控制系统的影响,通过实验验证得到如下结论:

1) 在煤质频繁波动情况下,机组负荷和机前压力的模型预测值与实际值变化趋势一致且控制品质良好表明该 BTU 校正方法可行且有效;在煤质稳定的情况下 BTU 校正系数基本保持不变,不会影响控制系统。

2) 机组负荷和机前压力的模型预测值能很好的跟踪实际值的变化,表明基于模型的 BTU 校正方法不受模型输入的影响,只与实际煤种发热量有关,能有效的表示实际煤种发热量与设计煤种发热量的关系。

参考文献:

- [1] 倪敏,魏向国,张明法.超临界空冷机组协调控制中新型热值校正方法的研究与应用[J].热力发电,2014,43(1):46-51,56.
- [2] 杨婷婷,曾德良,王玮,等.大型燃煤发电机组煤质实时校正方法[J].电站系统工程,2010,26(5):7-10.
- [3] 郭瑞君,秦成果,张澎涛,等.基于热值校正的适应煤质变化协调控制系统研究[J].内蒙古电力技术,2010,28(4):5-8.
- [4] 张小勇,郭晓玲,张晓红.燃煤热值对流化床锅炉经济性对比分析[J].电站系统工程,2013(4):80-81.
- [5] 林德平.600 MW 亚临界机组劣质煤掺烧试验研究[J].广东电力,2015,28(9):37-42.
- [6] 钱成龙.火电机组协调控制系统先进控制策略及实现研究[D].南京:东南大学,2013:2-10.
- [7] 刘友宽,潘巾杰,田沛,等.煤质自适应校正方案建模仿真[J].热力发电,2014,43(1):99-105.
- [8] 蒋欣军,王煜伟,周晓韡.新型串级热值校正技术在直流锅炉配煤掺烧中的应用[J].锅炉技术,2013,44(6):65-69.
- [9] 张锐锋,安波,李小军,等.基于模型煤发热量软测量的 BTU 校正方法分析[J].热力发电,2015,44(11):43-47.
- [10] 田亮,刘鑫屏,刘吉臻.直冷式空冷机组的负荷-压力动态模型及其特性分析[J].动力工程学报,2008,28(5):727-730.
- [11] 田亮,曾德良,刘鑫屏,等.500 MW 机组简化的非线性动态模型[J].动力工程,2004,24(4):522-525.
- [12] 田亮,曾德良,刘吉臻.简化的 330 MW 机组非线性动态模型[J].中国电机工程学报,2004,24(8):180-184.
- [13] 武现聪.基于状态观测器的热工参数软测量方法研究[D].保定:华北电力大学,2014:28-30.