

某火电机组汽电双驱引风机系统辅机故障 控制仿真及试验分析

李展¹, 成振松², 尤默¹, 金英爱³

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 山东石油化工学院, 山东 东营 257061;
3. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了研究某火电机组风烟系统采用汽电双驱型引风机系统, 不同设备故障条件下机组相应的控制策略, 依据热力学原理及设备固有属性, 并搭建了相应的动力学模型, 对发电机跳闸、小汽轮机跳闸、引风机与小汽轮机同时跳闸3种故障下的控制策略进行分析。最后, 通过3次实际试验验证了控制策略及模型仿真结论的正确性。研究表明: 在发电机跳闸时, 可以通过调门快速动作到一定开度来保证机组的安全运行; 在小汽轮机跳闸或引风机与小汽轮机同时跳闸时, 可以通过保证机组的水煤比、风煤比等参数实现机组的减负荷运行。

关键词: 汽电双驱型; 3种故障; 控制策略; 试验验证

中图分类号: TK223.26 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2023.09.021

[引用本文格式] 李展, 成振松, 尤默, 等. 某火电机组汽电双驱引风机系统辅机故障控制仿真及试验分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 174-182. LI Zhan, CHENG Zhen-song, YOU Mo, et al. Auxiliary failure control simulation and test analysis of a steam-electric dual-drive induced draft fan system for a thermal power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 174-182.

Auxiliary Failure Control Simulation and Test Analysis of a Steam-electric Dual-drive Induced Draft Fan System for a Thermal Power Unit

LI Zhan¹, CHENG Zhen-song², YOU Mo¹, JIN Ying-ai³

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045;
2. Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying, China, Post Code: 257061;
3. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun, China, Post Code: 130022)

Abstract: In order to study the corresponding control strategy of unit under different equipment failure conditions when the smoke system of a thermal power unit adopted the steam-electric dual-drive induced draft fan system, according to the relevant thermodynamic principles and the inherent properties of the equipment, the corresponding dynamic models were built, and the control strategies under the three types of faults including generator trip, small turbine trip, induced draft fan and small turbine trip simultaneously are analyzed. Finally, three practical tests verify the correctness of the control strategy and model simulation conclusion. The research results show that when the generator trips, the safe operation of the unit can be ensured by the quick action of the control valve to a certain opening; when the small steam turbine trips or the induced draft fan trips with the small steam turbine at the same time, the unit load reduction operation can be realized by ensuring the unit water to coal ratio, air to coal ratio and other parameters.

Key words: steam-electric dual-drive type, three faults, control strategy, test verification

收稿日期: 2022-08-07; 修订日期: 2022-10-13

基金项目: 英国皇家工程院牛顿基金中英校企合作项目(UK-CIAPP\201)

Fund-supported Project: British Royal Academy of Engineering Newton Fund Sino-British School-Enterprise Cooperation Project (UK-CIAPP\201)

作者简介: 李展(1990-), 男, 华北电力科学研究院有限责任公司工程师。

引言

火电厂采用汽电双驱型引风机可以大大减少引风机耗电量,进而有效减少电厂辅机总耗电量,降低火电厂的碳排放,提高火电厂的效率。

近年来,国内围绕汽电双驱型引风机系统有一些研究。郭俊山等人^[1]以某600 MW机组为例进行研究,结果表明,汽动引风机机组比电动引风机机组具有更好的经济性;杨春等人^[2]对电动机、小汽轮机以及汽电双驱3种不同驱动方案进行比较,结果表明,采用汽电联合驱动方案可以显著提高机组收益率;姚君等人^[3]提出汽电双驱型引风机可以实现降低厂用电及高效供热的完美结合,大大提高电厂的经济性。吕凯等人^[4]基于“汽电双驱”的思路提出了多种燃煤发电机组的优化设计方案,证明采用汽电双驱系统可以增强对复杂多变的电力形势的适应能力。刘荀等人^[5]对汽电双驱型引风机供热系统进行分析,给出了机组的热平衡模型。倪磊等人^[6]通过仿真及试验分析得出了汽电双驱型引风机异步电动机的各项参数并制出了样机。

近些年国内专家、学者主要围绕汽电双驱引风机热力系统方面做了一些研究,但目前还无人针对工程中实际使用的汽电双驱型引风机在故障情况下的动力学模型及其控制策略进行分析。

本文通过搭建汽电双驱型引风机系统中的发电机跳闸、小汽轮机跳闸、引风机与小汽轮机同时跳闸3种故障形式的仿真模型,对其相应的控制策略进行分析,并通过实际试验验证了本文提出的模型及控制方法的正确性。

1 系统方案

某火电机组风烟系统采用了汽电双驱型引风机的设计,其系统图如图1所示。在机组低负荷运行时通过电动机即可驱动引风机正常运行,当机组负荷高于40%额定负荷时需要启动小汽轮机驱动引风机运行。同时,小汽轮机也可通过电动机/发电机的6 kV开关提供厂用电。小汽轮机额定转速为5 220 r/min,经过变速离合器(齿轮箱)后引风机的额定转速变为750 r/min,并通过引风机动叶调节炉膛负压。

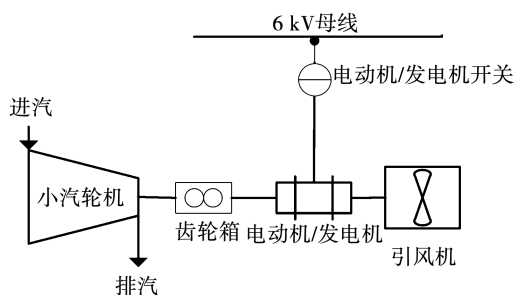


图1 汽电双驱型引风机系统

Fig.1 Steam-electric dual-drive induced draft fan system

2 发电机跳闸控制方案研究

当电动机/发电机的6 kV开关在某一故障情况下跳开甩负荷后,需根据6 kV开关跳开原因进行不同处理。如果6 kV开关是由于电机本体故障跳开,则应联锁跳闸小汽轮机,触发引风机故障减负荷动作即可。否则,可保持引风机动叶开度不变,迅速将小汽轮机调门关到一定开度并将转速设定到额定转速维持一定的时间,待机组平稳后再投入负压自动。而调门超驰开度需要根据调门前压力、主汽温度、所带负荷等因素综合决定,并预估小汽轮机转速在甩负荷情况下的飞升程度。为了减少小汽轮机调门的节流作用,小汽轮机调门在机组正常运行后会由阀位控制转为深度滑压控制,即调门前压力、温度变为负荷的单值函数,则在小汽轮机甩负荷后,可以只考虑负荷与调门开度两个影响因素对小汽轮机飞升转速及负压的影响。为研究此问题,建立汽电双驱型引风机小汽轮机系统甩负荷模型。

2.1 汽电双驱引风机系统理论模型分析

汽电双驱引风机系统模型主要包括小汽轮机汽缸容积模型、小汽轮机转子模型、引风机动力学模型和炉膛负压动力学模型。汽缸容积模型主要对蒸汽做的机械功进行计算,转子模型主要是对转子的受力和转动过程进行模拟,引风机动力学模型主要对引风机小汽轮机甩负荷后的转速进行模拟,炉膛负压动力学模型为转速对炉膛负压影响的模型。

2.1.1 小汽轮机汽缸容积模型

根据小汽轮机调节阀的特性可以得到小汽轮机的容积方程^[7]:

$$\frac{\Delta P_p(s)}{\Delta P(s)} = 1 / (1 + \frac{V \rho_0}{Q_0} s) = \frac{1}{1 + T_s} \quad (1)$$

$$T = \frac{L\rho_0 A}{A v_0 \rho_0} = \frac{L}{v_0} \quad (2)$$

式中： ΔP_p —容积内蒸汽功率变化率； ΔP_2 —小汽轮机调阀开度变化率； s —拉普拉斯变化算子； V —小汽轮机气缸容积， m^3 ； ρ_0 —额定状态下蒸汽密度， kg/m^3 ； Q_0 —额定蒸汽流量， m^3/s ； T —气缸的容积时间常数， s ； L —进汽管道长度， m ； A —进汽管道的横截面积， m^2 ； v_0 —蒸汽的流动速度， m/s 。

2.1.2 小汽轮机转子动力学模型

依据力学原理，小汽轮机转子动力学方程为：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_s - M_f - M_1 - P_z \quad (3)$$

$$T_a \frac{d\Delta w}{dt} = \Delta M_s - \Delta M_f - \Delta M_1 - \Delta M_z - \beta \Delta w \quad (4)$$

式中： M_s —进入小汽轮机中的蒸汽转矩， $N \cdot m$ ； M_f —摩擦力矩， $N \cdot m$ ； M_1 —引风机负载力矩， $N \cdot m$ ； P_z —发电机功率， kW ； ω —小汽轮机转子的角速度， rad/s ； ΔM_s —蒸汽轴功率的变化率； ΔM_f —摩擦力矩功率变化率； ΔM_1 —引风机负载反转矩功率变化率； ΔP_z —小汽轮机发电机功率变化率； Δw —转子角速度变化率； β —小汽轮机转子的自平衡系数； T_a —转子飞升时间常数， s 。

引风机负载力矩 M_1 计算式为：

$$M_1 = \frac{p_{out} + F_r}{3.6 \times 10^6 \eta_e} (Q_p + Q_s) \quad (5)$$

式中： p_{out} —引风机出口压力， Pa ； F_r —管道阻力， Pa ； η_e —引风机折算全压效率； Q_p —锅炉一次风流量， m^3/h ； Q_s —锅炉二次风流量， m^3/h 。

对式(4)进行拉氏变换后得：

$$T_a \cdot s \cdot \Delta W(s) = \Delta M_s(s) - \Delta M_f(s) - \Delta M_1(s) - \Delta P_2(s) - \beta = \Delta n \quad (6)$$

依据式(1)、(5)、(6)即可建立对汽电双驱引风机在甩负荷情况下的动态模型。

2.1.3 炉膛负压动力学模型

炉膛负压调节有变速调节或引风机动叶调节两种方式。小汽轮机变速调节炉膛负压时，由于首先要通过小汽轮机调门开度控制小汽轮机转速的变化，进而达到调节负压的目的。这将导致变速调节负压的滞后时间较长，负压波动大，不易控制。所以，在机组正常运行下炉膛负压仅通过动叶进行调节，但当小汽轮机甩负荷时可以迅速将引风机动叶调节切到手动控制模式并保持开度不变。同时，将小汽轮机转速设定到额定转速，防止出现负压震荡。

搭建转速对负压的影响模型，如图2所示。图中，被控对象的特性参数可以通过热态工况下的扰动试验获得。

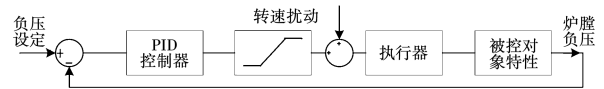


图2 转速扰动对负压影响的传递函数模型

Fig.2 Transfer function model of effect of speed disturbance on negative pressure

小汽轮机转速对负压影响的传递函数模型可简化为：

$$G(s) = \frac{6 e^{-2s}}{1 + 10s} \quad (7)$$

2.2 仿真模型搭建

以上述的模型分析为基础，小汽轮机热态工况下甩负荷综合模型如图3所示。

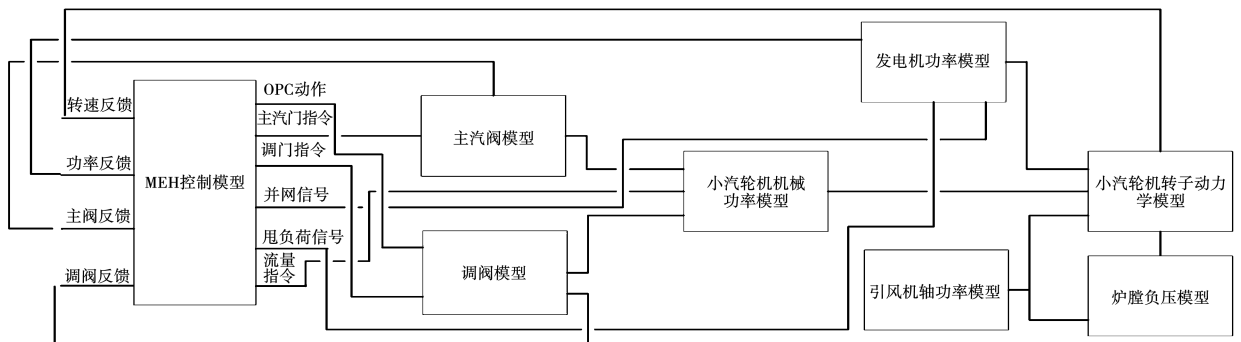


图3 汽电双驱型引风机动力学模型

Fig.3 Dynamics model of steam-electric dual-drive induced draft fan

2.3 仿真模型分析

选取 50% 负荷进行仿真分析,结果如图 4 ~ 图 7 所示。从图 4 中可以看出,小汽轮机调门在 410 s 时刻触发甩负荷,调门超驰度为 5%。那么在初始时刻引风机转速上升及炉膛负压下降量都较小,但在时间为 413 s 时,由于调门进汽量太小,蒸汽做功能力不足,导致小汽轮机转速下降量较大,炉膛出现较大正压,容易造成跳机。从图 5 可以看出,当超驰度为 10% 时,相较于图 4,在初始时刻,小汽轮机转速略有上升,炉膛负压下降量略有增大,但下一周期炉膛负压、小汽轮机转速都更趋向于理想值,机组整体稳定性较图 4 有所提高。

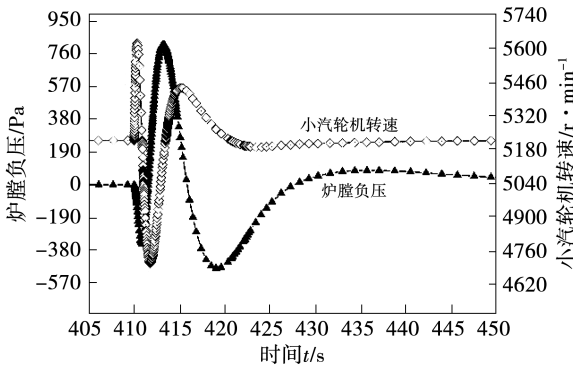


图 4 50% 负荷下调门超驰度 5% 时,炉膛负压和小汽轮机转速变化

Fig. 4 Change of boiler negative pressure and small steam turbine's rotating speed at 50% load and 5% valve excess

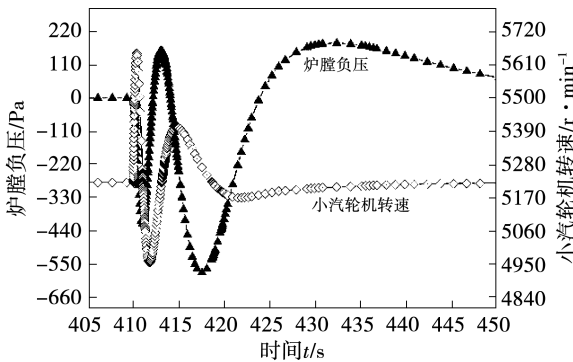


图 5 50% 负荷下调门超驰度 10% 时,炉膛负压和小汽轮机转速变化

Fig. 5 Change of boiler negative pressure and small steam turbine's rotating speed at 50% load and 10% valve excess

从图 6、图 7 可以看出,如果调门在初始时刻开度较大,会造成小汽轮机转速在初始时刻升高太大,

负压第 1 周期下降较大,同样会造成机组跳闸。

炉膛负压随调门开度的变化如图 8 所示。从图 8 可以看出,在 50% 负荷点时甩负荷,调门开度超驰到 10% 左右时,负压的变化量最小,波动幅度也最小。

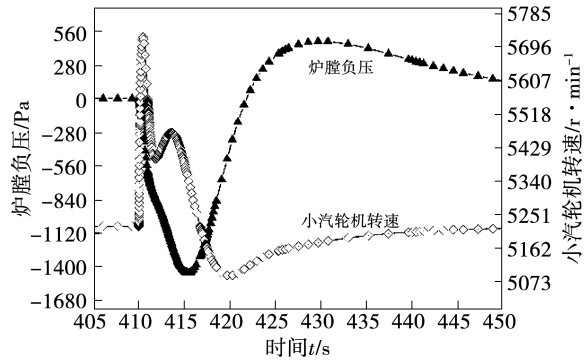


图 6 50% 负荷下调门超驰度 20% 时,炉膛负压和小汽轮机转速变化

Fig. 6 Change of boiler negative pressure and small steam turbine's rotating speed at 50% load and 20% valve excess

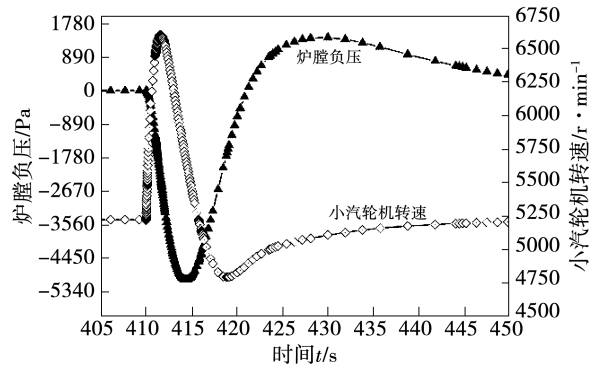


图 7 50% 负荷下调门超驰度 40% 时,炉膛负压和小汽轮机转速变化

Fig. 7 Change of boiler negative pressure and small steam turbine's rotating speed at 50% load and 40% valve excess

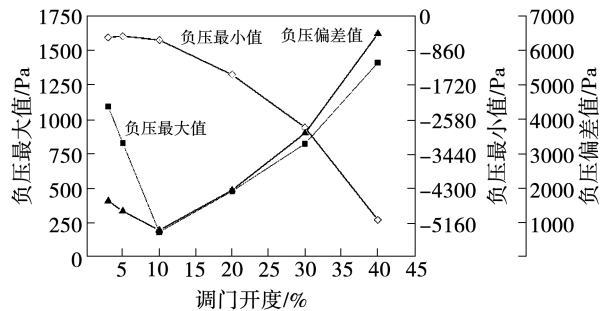


图 8 炉膛负压随调门开度的变化

Fig. 8 Change of boiler negative pressure with valve opening

为寻找不同负荷下最优的调门阀位超驰值,经多次仿真得出机组在多个负荷下甩负荷时的最优开度曲线,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,负荷越高最优调门开度越小。在实际试验中,可以以此为依据经过热态扰动试验及仿真结果,确定开度最优值。同时,可以将调门前压力、温度做为修正量,只有这样才能保证甩负荷时机组安全运行。

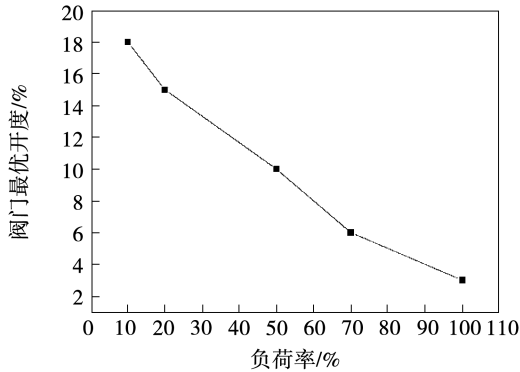


图 9 调门最优开度值
Fig. 9 Optimal valve opening

3 引风机小汽轮机跳闸控制方案研究

当引风机小汽轮机跳闸后,离合器会自动脱开链接,发电机会自动变为电动机,带动引风机运行。当机组总负荷小于 75% 则不需要进行减负荷,反之进行小汽轮机故障减负荷。为了对辅机故障下机组的运行情况进行分析,以整个机组为对象,建立不同辅机故障下的仿真模型。

3.1 辅机故障仿真模型

工程上可以将直流燃煤锅炉机组简化为一个三进三出的热力学模型,给水一次性通过省煤器、水冷壁、汽水分离器和过热器直接变为过热蒸汽,没有明显的汽、水分界点。

根据锅炉燃烧的质量平衡方程得^[8]:

$$V_b \frac{d\rho_1}{dt} = Q_w - Q_h \quad (8)$$

式中: V_b —锅炉受热面总容积, m^3 ; ρ_1 —锅炉汽水在受热面平均密度, kg/m^3 ; Q_w —省煤器入口不饱和水流量, kg/s ; Q_h —高温过热器出口过热蒸汽流量 kg/s 。

锅炉受热面中介质的能量平衡方程为:

$$V_b \frac{d(\rho_1 h_1)}{dt} = Q_w h_w - Q_h h_s + \lambda C \quad (9)$$

式中: h_1 —介质在整个汽水流程中的平均焓, kJ/kg ;

h_w —省煤器入口的给水平均焓, kJ/kg ; h_s —过热汽出口蒸汽平均焓, kJ/kg ; C —锅炉总的燃煤量, kg/s ; λ —燃煤总的传热系数。

$$p_1 - p_2 = \frac{Q_h^2}{k_1} \quad (10)$$

式中: p_1 —汽水分离器的出口蒸汽压力, Pa ; p_2 —高温过热器的出口蒸汽压力, Pa ; k_1 —管道的阻力系数。

假设在机组运行期间水煤比保持一致,则焓值的变化为:

$$h_w - h_s = \frac{\lambda C}{Q_w} k_2 \quad (11)$$

假设忽略汽轮机及锅炉的蒸汽损失,则机组的输出功率:

$$N_e = k_3 (Q_w h_w - Q_h h_s) \quad (12)$$

式中: k_2 —蒸汽焓值转换系数; k_3 —汽轮机效率。

依据以上机组主汽压力、主汽温度、功率的机理分析,可以建立机组锅炉侧的燃烧模型。参考小汽轮机转子动力学及机械功率模型,建立机组级的汽轮机动力学模型。再选择不同的辅机故障模式,搭建机组辅机故障减负荷热力系统模型,如图 10 所示。

3.2 仿真模型分析

根据上述的机理模型可以得出,主蒸汽压力是反映机组能量是否平衡的标志,机组能量平衡指产生的蒸汽流量和进入汽轮机做功的流量保持平衡,即保持水、煤量在一定范围。此外,主汽温度主要由焓值决定,而焓也主要由水煤比决定。如果要保证机组能正常运行,则只需保证水煤量在某一安全范围运行即可。当发生小汽轮机故障减负荷后,可在当前的基础上迅速跳闸 1 台磨煤机,即快速减少煤量的输入,负荷随动,水及送风量等重要参数依据相应的曲线进行增减,维持机组的水煤比稳定。

图 11 为小汽轮机故障减负荷仿真曲线。当时时间为 300 s 时发生小汽轮机故障减负荷,随后在当前的燃料量基础上快速将给煤量减少到 75% 额定负荷对应的量值,同时给水、风量经过一定的惯性时间,逐步减少到与燃料量相应的值。依据上面的机理分析可以得出此时的主汽温度、主汽压力和功率的变化趋势,大约在 340 s 时主汽压力、温度和功率保持稳定。发生小汽轮机故障减负荷时,经过快速减负荷,实现机组不跳闸而稳定运行。

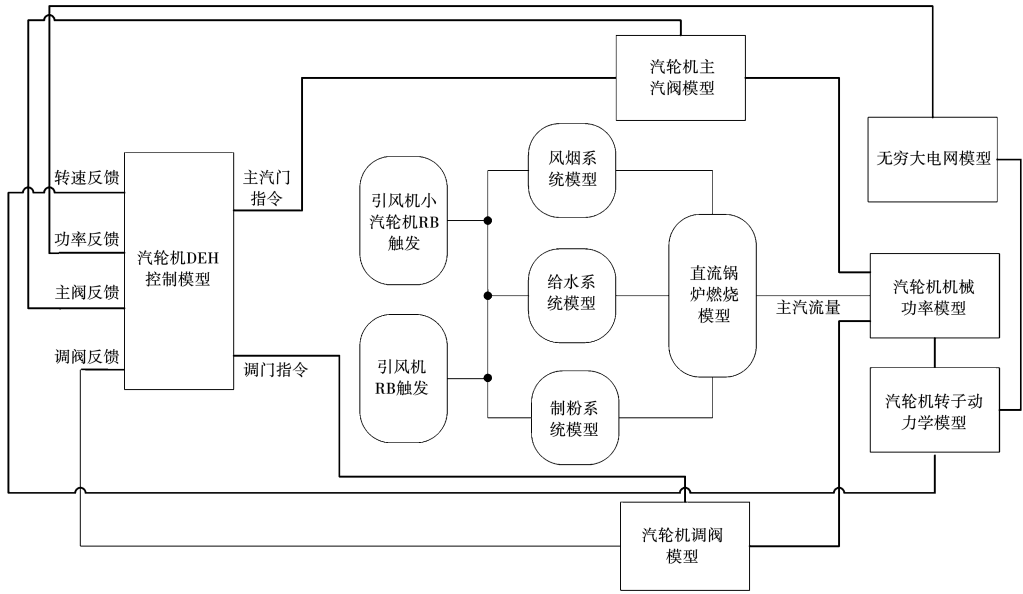


图 10 不同辅机故障下减负荷热力系统模型

Fig. 10 Thermal system model of load reduction caused by faults of different auxiliary machines

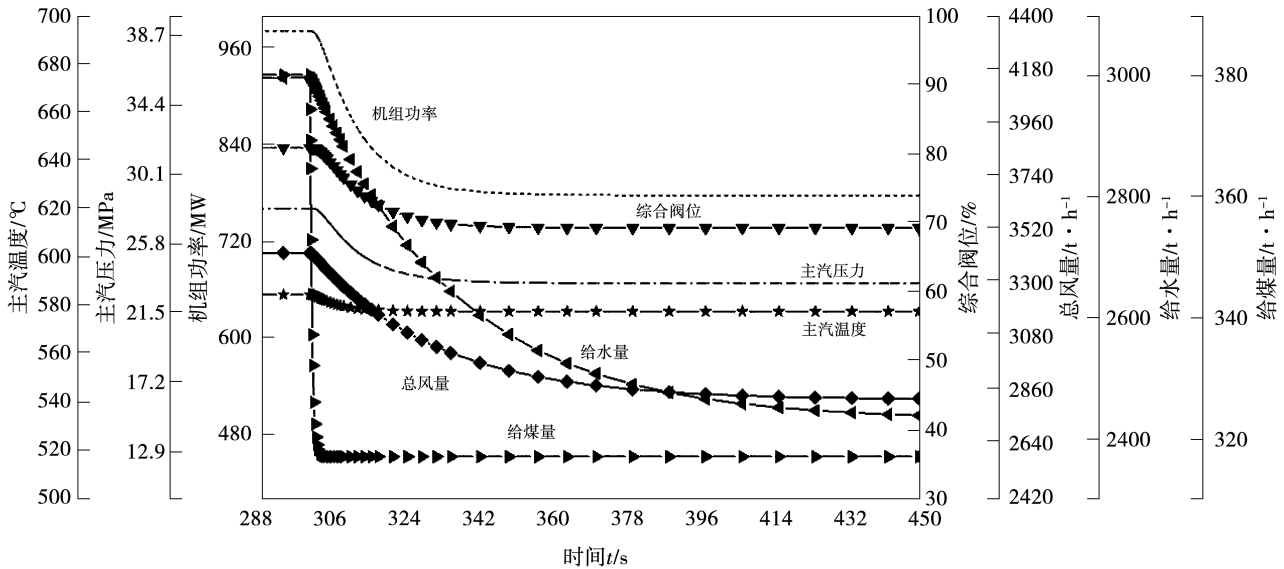


图 11 小汽轮机故障减负荷仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of induced draft fan pushed by small steam turbine under runback condition

4 引风机跳闸控制方案研究

当因引风机本体故障造成引风机故障减负荷时,可以参考小汽轮机故障减负荷的控制方法。从锅炉的能量守恒法则得出,当发生引风机故障减负荷时需要快速将机组负荷减少到 50%,即为单侧引风机辅机出力的最大值。图 12 为引风机故障减负荷时的仿真曲线。从曲线上看,在 300 s 时发生

引风机故障减负荷,然后在当前燃料量基础上每隔 10 s 跳闸 1 台磨煤机,最后保留一半的给煤量。同时,主汽压力、功率和给水量都在引风机故障减负荷后缓慢下降,大约在 340 s 时保持稳定。由于燃料的快速下降,主汽温度在开始前 35 s 下降了 10 °C,在 335 s 时主汽温度开始上升,并逐步恢复到试验前温度。

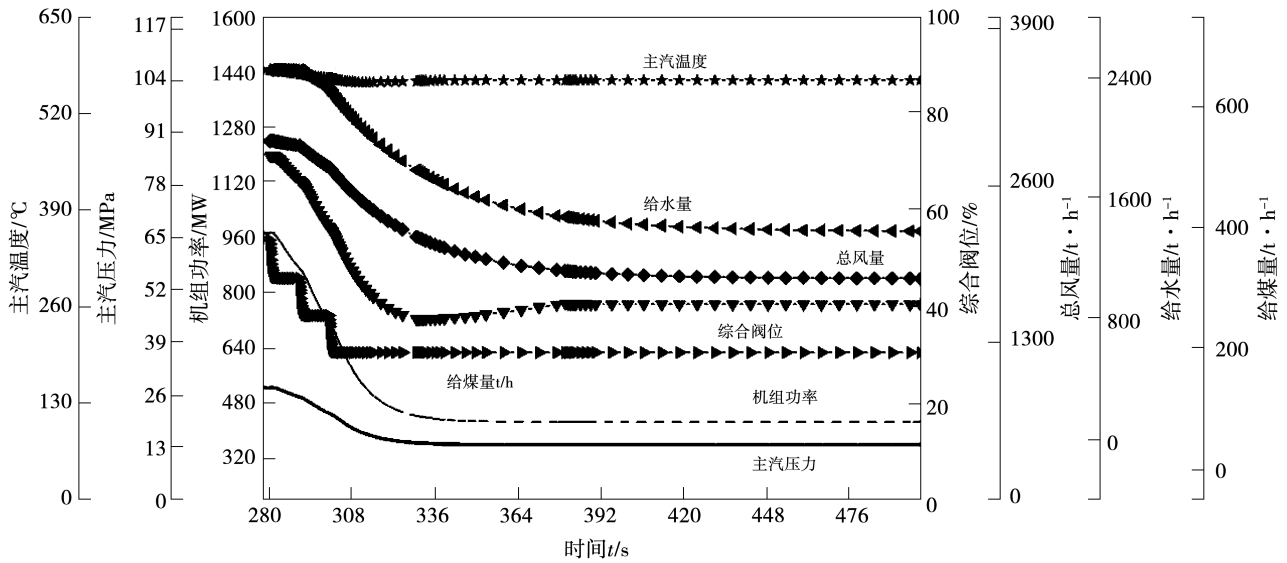


图 12 引风机故障减负荷仿真曲线

Fig. 12 Simulation curves of induced draft fan pushed by motor under runback condition

5 试验分析

某火电机组引风机系统进行了小汽轮机热态甩负荷试验,即在 90% 负荷时人为断开发电机出口 6 kV 断路器。依据上面的仿真分析得出,在小汽轮机发电机甩负荷时,将小汽轮机转速目标值设定为 5 220 r/min,引风机动叶不参与调节,试验结果如图 13 所示。从图中可以看出,小汽轮机在发生热态甩

负荷后,依据图 8 的较优超驰开度,将小汽轮机综合阀位超驰到 4% 左右,在经过上下震荡多次调节后,小汽轮机转速稳定到 5 220 r/min 左右。试验期间机组功率、主汽压力和主汽温度均保持稳定状态。小汽轮机转速最高升为 6 190 r/min,最低 5 058 r/min;炉膛负压最高为 500 Pa、最低为 -1 250 Pa,机组整体运行稳定。

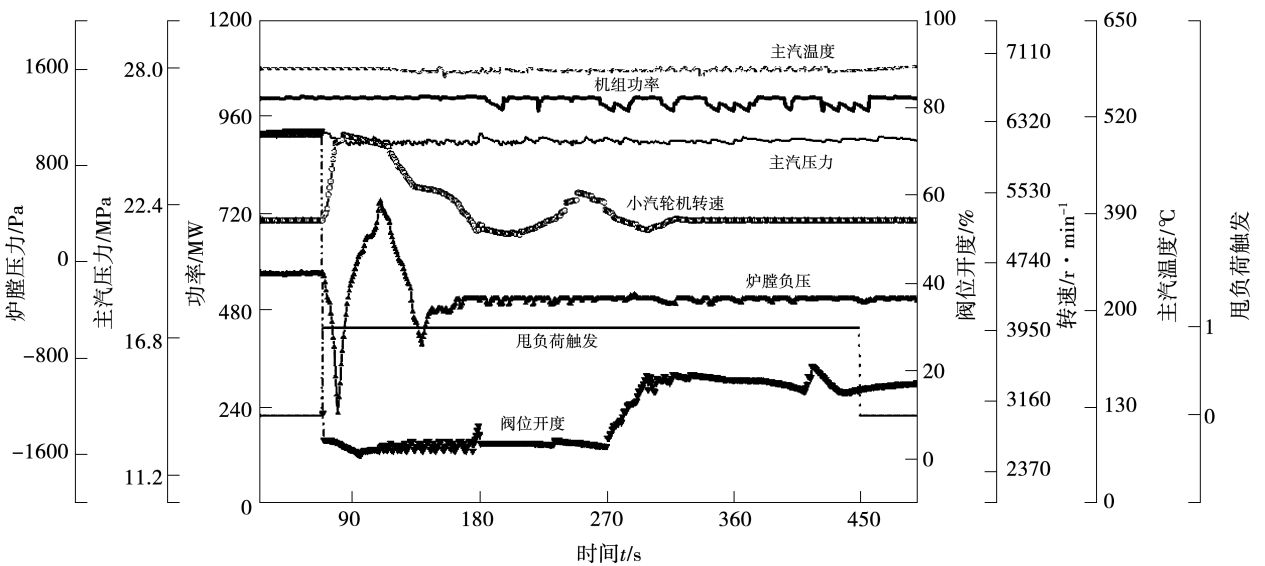


图 13 小汽轮机热态甩负荷试验参数变化曲线

Fig. 13 Parameter change curve of induced draft fan pushed by small steam turbine under load shedding

在 18:08 (0 s) 时进行了小汽轮机故障甩负荷试验,如图 14 所示。即在机组为 90% 负荷时,炉膛负压、风量、煤、给水系统运行稳定,运行人员就地手动按下小汽轮机跳闸按钮,触发小汽轮机故障甩负荷。小汽轮机转速逐渐降低到 0,引风机在电动机的带动下,电流快速增加后又逐渐下降。最上层磨煤机跳闸,给煤量迅速减少,总风量及给水量经过惯性环节后缓慢下降,最后负荷稳定在 70% 左右,负

压稳定在 -120 Pa 左右,主蒸汽压力由 27 MPa 降低到 24 MPa。由于锅炉蓄热量较小,燃料量迅速减少及给水下降较缓导致主汽温度在开始时的前 3 min 下降较快,约下降 15 °C。后期,由于给水量逐渐稳定后,温度又逐渐恢复。在 400 s 时给煤量降到 260 t/h,总风量降到 2 700 t/h,给水量降到 1 872 t/h,负荷保持稳定。

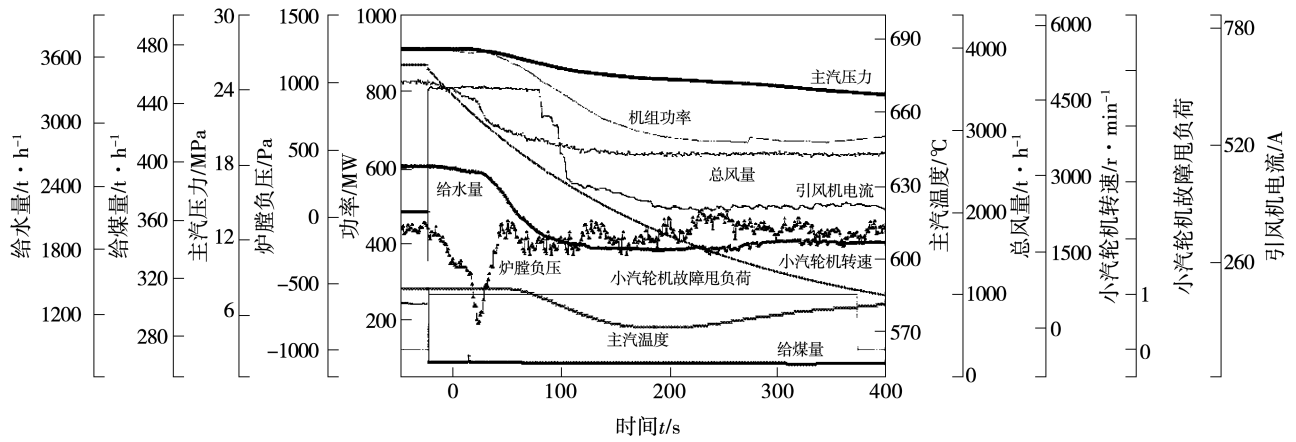


图 14 小汽轮机故障甩负荷试验参数变化曲线

Fig. 14 Parameter change curve of induced draft fan pushed by small steam turbine under runback condition

在 19:41 (0 s) 时进行引风机故障甩负荷试验。在 90% 负荷时,炉膛负压、主汽温度、压力、总风量、给水量和燃料量保持稳定。跳闸引风机 A,触发引风机 A 故障甩负荷,如图 15 所示。此时,引风机 A 转速逐渐降为 0 r/min,引风机 B 动叶逐渐开到 100%,机组跳闸上层的 2 台磨煤机,保留 3 台磨运

行。随后,主汽压力设定值跟踪滑压曲线设定值逐渐下降到 17 MPa,然后保持稳定。主汽温度和小汽轮机故障甩负荷时趋势相同,都是先降低后上升。给水、总风量跟踪负荷曲线逐渐降到 1 580 和 2 240 t/h,功率逐渐稳定在 577 MW 左右。

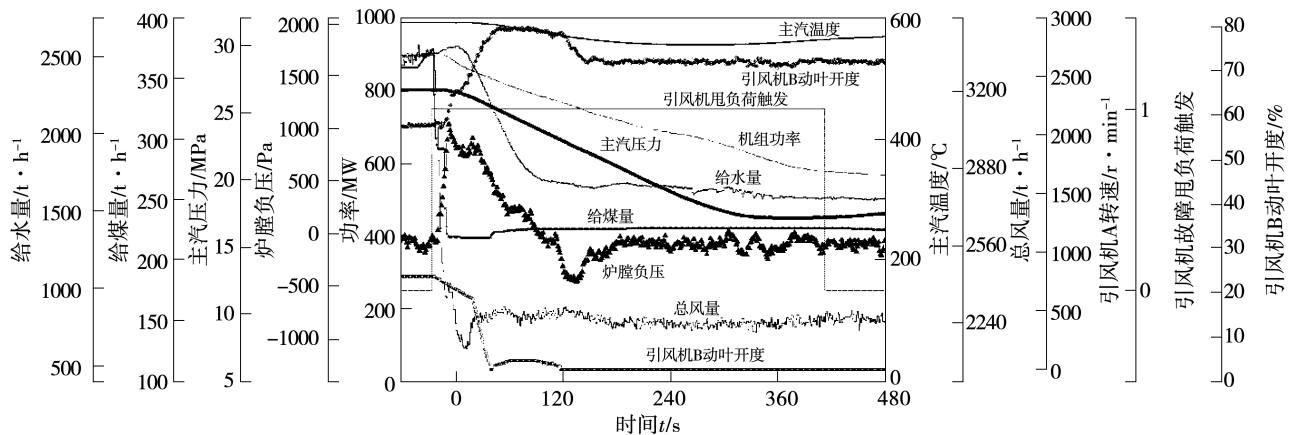


图 15 引风机故障甩负荷试验参数变化曲线

Fig. 15 Parameter change curve of induced draft fan pushed by motor under runback condition

6 结 论

通过对机组的热力系统进行分析研究,建立了汽电双驱引风机的系统动力学模型及机组故障减负荷动力学模型,通过仿真分析及试验,得出以下结论:

(1) 当引风机发电机发生故障甩负荷时,在同一负荷下,如果调门开得太小,在开始时刻,引风机转速上升较小,负压下降较小。但下个周期往往会因为小汽轮机进汽量太小,蒸汽做功能力不足,导致转速下降量较大,炉膛出现较大正压。如果调门在初始时刻开度较大,就会造成小汽轮机转速飞升太大,负压开始下降较大,同样也会造成跳机事故。

(2) 经过多次仿真试验,当发电机发生故障甩负荷时,小汽轮机调门最优开度值随着负荷的升高呈下降趋势。在实际工程试验中,还需考虑调门前压力、温度的修正,以达到最优的实验效果,维持机组的安全运行。

(3) 从小汽轮机故障甩负荷及引风机故障甩负荷仿真及试验可以看出,当机组发生故障快速减负荷时,汽水侧控制好水煤比及量,风烟侧控制好风煤比及量,只有这样才能保证主汽压力、温度、负压等机组重要参数的稳定。

参考文献:

- [1] 郭俊山,郑威,韩悦,等. 600 MW 机组汽动引风机经济性评价[J]. 热能动力工程,2018,33(10):101-106.
GUO Jun-shan,ZHENG Wei,HAN Yue,et al. Economic evaluation of steam-driven induced draft fan of 600 MW unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33 (10): 101-106.
- [2] 杨春,杨德荣,王灵梅,等. 660 MW 火电机组轴流式引风机驱动系统分析[J]. 节能技术,2019,37(6):509-513.
YANG Chun,YANG De-rong,WANG Ling-mei,et al. Driving system of axial flow induced draft fan for 660 MW thermal power unit

[J]. Energy Conservation Technology,2019,37(6):509-513.

- [3] 姚君,蒯琪蒙,施刚夜,等. 高效灵活“汽电双驱”引风机技术及工程应用[J]. 电力勘测设计,2020(4):11-14,50.
YAO Jun,LIN Qi-meng,SHI Gang-ye,et al. High efficient and flexible "steam and electric dual driven" induced draft fan technology and its engineering application[J]. Electric Power Survey & Design,2020(4):11-14,50.
- [4] 吕凯,王妍,王春燕,等. 基于“汽电双驱技术”的大型燃煤发电机组优化方法[J]. 热科学与技术,2021,20(4):372-379.
LYU Kai,WANG Yan,WANG Chun-yan,et al. Optimization method for large-scale coal-fired power plant based on steam-electric dual drive technology[J]. Journal of Thermal Science and Technology,2021,20(4):372-379.
- [5] 刘荀. 汽电双驱引风机灵活高效供热系统设计与优化[D]. 北京:华北电力大学,2020.
LIU Xun. Design and optimization of flexible and efficient heat supplying system of induced-draft-fan with steam electric double drive[D]. Beijing:North China Electric Power University,2020.
- [6] 倪磊. 汽电双驱机组异步电动机-发电机设计与研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
NI Lei. Research and design of asynchronous motor-generator in steam-electric dual drive unit[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2020.
- [7] 王立健,何青,李国庆. 汽轮机甩负荷对转子寿命损耗的仿真分析研究[J]. 中国电力,2018,51(10):150-155.
WANG Li-jian,HE Qing,LI Guo-qing. Study on the simulation of rotor life loss after unit load shedding[J]. Electric Power,2018,51(10):150-155.
- [8] 郑跃,刘禾,宫奎元. 一种基于主汽压预测的火电机组负荷控制方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2013,40(4):37-42.
ZHENG Yue,LIU He,GONG Kui-yuan. A load control method of thermal power unit based on predictive main steam pressure[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2013,40(4):37-42.

(丛敏编辑)