

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.009

# FCB 功能火电机组辅机选型技术研究

吴家凯, 黄涛

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 具有 FCB 功能火电机组在设计方面有其特殊要求, 通过对机组 FCB 工况稳态和瞬态过程研究发现, 与常规火电比较, 其主要差异在于高低压旁路阀的容量配置、给水泵的容量确定及驱动汽轮机的汽源保证、除氧器的储水容量选择和加热汽源保证、高压加热器的加热汽源保证等辅机设计选型方面。通过多个工程设计经验总结, 确定了这些辅机的正确选型方法, 确保机组能安全可靠实现 FCB 功能, 该方法和措施对其他要求具备 FCB 功能机组的设计有重要参考意义。

**关键词:** FCB 功能; 瞬态分析; 设备选型

**中图分类号:** TM621

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2018)01-0059-04

## Research on Equipment Selection Technology of FCB Function Power Plant

WU Jiakai, HUANG Tao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** For the thermal power plant with FCB function, there are special requirements on design. By researching FCB transient and steady process, in contrast to normal power plant, we found out the important selection differences of bypass valve capacity, feedwater pump capacity and driving-turbine steam supplying, deaerator water storage capacity and heating-steam supplying, high pressure heater heating- steam supplying etc. Based on several engineering design experience, we determined the correct selection of these auxiliary equipments. Thus, power plant can be realized FCB function safely and reliably. The method has important reference value for the design of FCB function power plant.

**Key words:** FCB function; transient analysis; equipment selection

根据电网的要求, 部分火电机组需具备 FCB (FAST CUT BACK, 快速甩负荷) 功能。FCB 功能<sup>[1-3]</sup>是指锅炉-汽机-发电机-主变压器-外电网重要联接环节中任一环节设备故障时, 故障环节之前的各环节具备继续运行, 当故障消除后能快速恢复正常运行的能力。典型情况是当外网或主变出线故障时只跳主变出口电气开关而不联跳锅炉, 锅炉快速减负荷至不投油最低稳燃负荷运行, 汽机发电机转为带厂用电运行, 待外网或主变出线故障短时解除后机组可快速并网并升负荷发电的能力。

FCB 功能可大大节省机组因此类故障而重新启停整个机组的费用和时间, 并为电网快速恢复供电能力起到重要保障作用<sup>[4]</sup>。但是, 具有 FCB 功能的火电机组在设计上有其特殊要求, 需对机组 FCB 工况稳态和瞬态过程深入研究, 寻找到正确选型旁路阀、给水泵和除氧器等重要辅机的方法才能成功实现该功能。

### 1 FCB 瞬态过程分析

机组 FCB 过程可分为三个阶段, 即开始 FCB 到 FCB 稳态运行的瞬态阶段、FCB 稳态运行阶段和重新并网升负荷阶段。对于电厂主辅设备及系统而言, 开始 FCB 到 FCB 稳态运行的瞬态阶段比较复杂, 对旁路阀、给水泵及除氧器的设计选型等有

收稿日期: 2017-06-20 修回日期: 2017-08-16

基金项目: 中国能建广东院科技项目“电站汽轮机辅机换热设备选型设计规程”(ER03961W)

其特殊要求,而FCB稳态运行阶段和重新并网升负荷阶段与常规无FCB功能机组的正常启动过程类似。

以某电厂为例,开始FCB到FCB稳态运行的瞬态阶段,主要过程是当DEH接受到甩负荷信号后,甩负荷预测逻辑LDA立即关闭高调门GV和中调门IV,以防汽轮机超速。同时,高、低旁路阀立即打开释放余热,高排逆止阀关闭,高排通风阀立即打开抽真空。然后,低压缸排汽喷水阀打开,高、中压疏水阀打开。在此期间,汽轮机转速将飞升到3 100 r/min左右。

汽轮机转速随时间变化曲线<sup>[1]</sup>如图1所示:

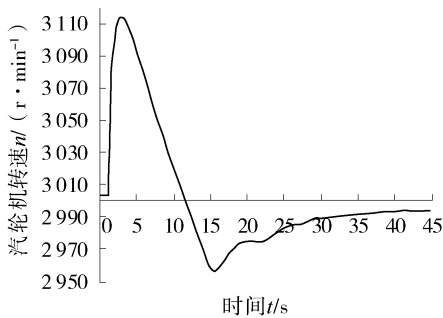


图1 FCB瞬态汽轮机转速随时间变化曲线

Fig. 1 FCB transient turbine speed versus time curve

甩负荷后(发电机主油开关断开)延迟7.5 s,中调阀IV逐步打开到带厂用电对应开度。当冷再热压力低于0.828 MPa(a)时,高调门GV打开,维持汽机3 000 r/min。为了防止蒸汽小流量时高压缸过热,高压缸流量应尽快增大以达到并网要求的5%负荷,并网后延迟1 min关闭高排通风阀,这样就进入到FCB的稳态运行阶段。

在FCB瞬态过程中,给水泵除了向锅炉正常供水外,还需为所有旁路阀和凝汽器等提供大量的减温水,而同时由于汽轮机主汽门的关闭导致汽动给水泵小汽机失去驱动汽源,需紧急切换到小汽机的备用冷段汽源,才能保证给水泵的供水能力。同时,由于除氧器和所有加热器失去了汽轮机抽汽汽源,为避免锅炉进水温度的大幅降低,有利于FCB后锅炉汽温及负荷的控制,加热汽源为冷段蒸汽的高加需维持运行,除氧器供汽需由抽汽紧急切换到冷段,而其他高低加将停止运行。

当电网外网或主变出线故障排除后,机组可按正常启动顺序升负荷到目标负荷水平,即重新并网

升负荷阶段。

## 2 FCB功能边界条件

快速甩负荷功能有多个重要边界条件,在机组设计阶段需确定:

1)应确定FCB发生时机组负荷运行的范围<sup>[5]</sup>。通常,该运行范围是锅炉不投油最低稳燃负荷至机组100%额定负荷之间,在此机组运行负荷范围内如产生了FCB动作的触发条件,则锅炉能快速减负荷转入带厂用电运行。

2)应确定FCB过程中锅炉安全阀的动作要求。如设计合同无特殊要求,一般原则为过热器安全阀不允许动作,但过热器出口PCV阀可开启排汽;再热器安全阀允许在FCB发生的过渡阶段动作,排除多余蒸汽;而在FCB稳定运行的阶段过热器PCV阀及再热器安全阀均不允许开启。

3)应确定汽机带厂用电运行的方式。根据不同的汽机技术流派,机组低负荷运行时高、中低压缸同时运行带厂用电;或高调门关闭,汽机中调门进汽,由中低压缸运行带厂用电。

4)应确定FCB稳定阶段锅炉维持负荷水平。一般将FCB稳定阶段锅炉维持负荷水平确定在不投油最低稳燃负荷或稍高负荷水平。

## 3 FCB功能机组辅机选型

基于FCB功能机组在FCB瞬态过程的复杂性和特殊性,经对该过程深入分析后发现,与常规火电厂设计相比,主要差异在于高低压旁路阀的容量配置、给水泵的容量确定及驱动汽轮机的汽源保证、除氧器的储水容量选择和加热汽源保证、高压加热器的加热汽源保证等辅机设计选型方面,具体差异如下论述。

### 3.1 高压旁路容量选择

为实现FCB功能,汽轮机高压旁路的容量有两种选择:

1)全容量(100% BMCR)<sup>[6]</sup>高压旁路阀。

采用全容量(100% BMCR)高压旁路阀可全部替代锅炉过热器出口安全阀,同时具有旁路阀和锅炉过热器安全阀功能,可简化排放系统、减少初投资、并可回收更多的工质。

2)部分容量高压旁路阀。当采用部分容量高压旁路阀时,其容量根据经验可选择60%~70% BM-

CR, 剩下的 30% ~ 40% BMCR 容量由锅炉过热器 PCV 阀承担。

### 3.2 低压旁路容量选择

低压旁路容量选择应考虑以下因素:

1) 满足在 FCB 稳定运行阶段汽机中调门进汽参数要求。在 FCB 稳定运行阶段, 锅炉负荷为最低稳燃负荷或稍高, 此时的再热蒸汽参数根据汽机厂热平衡图要求, 一般均较低, 可根据此时的汽机中调门前要求的温度、压力及此时再热器安全阀不开启的条件核算出低旁在此工况流量(即 A 值)。

2) 根据常规机组凝汽器(或空冷机组的空冷凝汽器)可接收的容量反算 FCB 瞬时工况和 FCB 稳定运行工况的最大低旁流量。按机组 100% 额定负荷工况、最不利环境条件及应维持的最高低压缸排汽背压, 可得出此时凝汽器(或空冷机组的空冷凝汽器)的最大接收排汽量, 反算至低旁入口流量(要考虑低旁喷水、三级减温减压器喷水、低压缸排汽、在运行的高加疏水、高排通风量等)(即 B 值)。

3) 计算 FCB 过渡阶段, 即锅炉为 100% 额定负荷、汽机为带厂用电、再热器安全阀不开启, 此时低旁需通过的蒸汽流量(即 C 值)。

当工程项目要求 FCB 过渡阶段和 FCB 稳定运行阶段均不允许锅炉再热器安全阀动作时, 低压旁路容量应取 A 值和 C 值的较大值。

当工程项目要求 FCB 过渡阶段锅炉再热器安全阀允许动作, 而 FCB 稳定运行阶段不允许锅炉再热器安全阀动作时, 低压旁路容量应按 A 值选取。

### 3.3 给水泵容量选择

若要应对锅炉 100% BMCR 工况下发生 FCB 的极端情况下的供水量, 给水泵的容量会配置过大, 将导致给水泵长期处于偏离最高效率点较远处运行, 运行效率低。为避免这种情况, 根据工程经验, 推荐不管高旁为 100% BMCR 容量设置还是部分容量设置时, 给水泵的总流量取 105% BMCR(直流锅炉)给水量与 100% TRL 给水量加上高旁减温水量之和的大者, 或者 110% BMCR(汽包锅炉)给水量与 100% TRL 给水量加上高旁减温水量之和的大者。

### 3.4 给水泵汽轮机的汽源保证

当机组采用汽动给水泵时, 应考虑发生 FCB 时, 给水泵的汽源快速切换<sup>[7]</sup>, 其汽源可采用高旁

阀下游管道供汽, 其中的管路切换阀应为快开型, 在 FCB 触发后, 同高旁一样连锁快开。为确保给水泵汽轮机的汽源供应快速而平稳过渡, 给水泵汽轮机进汽阀推荐采用内切换方式。而且, 由于 FCB 过程中锅炉对给水量的需求除了正常供水量外还应供应减温水量, 因此此路汽源带给水泵汽轮机时应能达到汽泵的额定出力。

### 3.5 高压加热器的汽源切换

FCB 发生后, 从主汽轮机本体的抽汽都会丧失, 为减少锅炉进水温度的大幅降低, 有利于 FCB 后锅炉汽温及负荷的控制, 改善 FCB 后锅炉的水动力工况, 同时也尽量增加高旁后蒸汽的用户, 回收更多的热量及工质, 故汽源为冷再热蒸汽的 2 号高压加热器仍应维持运行。考虑到汽轮机防进水控制要求及 FCB 工况 2 号高加的蒸汽量需求大于正常工况 2 段抽汽量, 因此, 除了 2 号高加的正常抽汽管线外, 推荐单独设置从冷段至 2 号高加的蒸汽供应管线和阀门来满足 FCB 的要求。由于 3 号高压加热器已退出, 2 号高加至 3 号高加的逐级自流疏水不再可用, 故须迅速切换 2 号高压加热器疏水为紧急疏水至凝汽器, 由紧急疏水调节阀连续调节 2 号高加的疏水水位。

### 3.6 除氧器选型

#### 3.6.1 除氧器水箱容量

FCB 发生后, 随着低旁及凝汽器(或排汽装置)入口三级减温器的投入, 凝泵出口凝结水至除氧器的流量大幅减小, 同时给水泵出口流量因高旁减温水的投入而加大, 造成除氧器水位的瞬时急剧下降, 当低于低低水位时给水泵将停止运行。故需核算除氧器在 FCB 过渡阶段的水量平衡, 核算时除氧器水箱的储水量应按正常水位和低低水位间容积核算, 而不能按除氧器有效容积来核算, 因有效容积指正常水位和出水管顶端间容积。必要时可适当加大除氧器的水箱容积, 满足 FCB 工况除氧器中的水量平衡要求。

#### 3.6.2 除氧器的汽源切换

FCB 发生后, 低压加热器由于汽轮机抽汽丧失退出运行。使进入除氧器的水温大幅下降, 除氧器加热用汽量急剧增加, 而其正常抽汽的工作汽源已消失, 故需立即将汽源切换至高旁阀后蒸汽, 保证除氧器的用汽要求, 同时也确保给水泵前置泵入口的汽蚀余量, 防止发生汽蚀。高旁阀后蒸汽至除氧

器宜设置单独供汽管路, 直接从冷段接至除氧器, 其上设置快开压力调节阀, FCB 瞬时连锁快开; 或者按 FCB 过渡工况除氧器的加热蒸汽量需要设计冷段至辅助蒸汽的管道和辅助蒸汽至除氧器的加热蒸汽管道, 冷段蒸汽通过辅助蒸汽管道向除氧器供汽。因 FCB 时除氧器加热汽量远大于正常运行时加热蒸汽量, 故除氧器安全阀的容量应按 FCB 时最大加热蒸汽量相应配置。

## 4 结论

与常规火电厂相比, 具备 FCB 功能机组在实施 FCB 过程中参数变化复杂, 对主要辅机的设计选型有其特殊要求, 经深入分析研究发现, 主要差异在于高低压旁路阀的容量配置、给水泵的容量确定及驱动汽轮机的汽源保证、除氧器的储水容量选择和加热汽源保证、高压加热器的加热汽源保证等辅机设计选型方面, 并确定了这些辅机的正确选型方法, 从源头上保证了项目最终实现机组 FCB 功能, 为后续同类 FCB 功能项目的设计提供重要参考。

### 参考文献:

- [1] 冯伟忠. 900 MW 超临界机组 FCB 试验 [J]. 中国电力, 2005, 38(2): 74-77.  
FENG W Z. FCB test for 900 MW supercritical units [J]. Electric Power, 2005, 38(2): 74-77.
- [2] 冯伟忠. 1 000 MW 超超临界机组 FCB 试验 [J]. 中国电力, 2008, 41(10): 62-66.  
FENG W Z. FCB test on 1 000 MW ultra-supercritical power generation unit [J]. Electric Power, 2008, 41(10): 62-66.
- [3] 冯伟忠. 大机组实现 FCB 的现实性及技术分析 [J]. 上海电力, 2007(3): 246-251.  
FENG W Z. The realism and technical analysis of implementing FCB for the large coal-fired power units [J]. Shanghai Electric Power, 2007(3): 246-251.
- [4] 沈丛奇, 周新雅, 姚峻. 火电机组 FCB 功能及其在电网恢

复中的应用 [J]. 上海电力, 2007(3): 251-254.

SHEN C Q, ZHOU X Y, YAO J. FCB function of coal-fired power units and its application in power grid restoration [J]. Shanghai Electric Power, 2007(3): 251-254.

- [5] 郭鑫. 大型发电机组 FCB 功能的探讨 [J]. 华北电力技术, 2010(2): 22-23.

GUO X. Discussion of FCB function of large power generation set [J]. North China Electric Power, 2010(2): 22-23.

- [6] 王立地, 林苗丹. FCB 工况下 100% 汽轮机旁路合理性探讨 [J]. 电力技术, 2010, 19(11): 39-44.

WANG L D, LIN M D. Discussion on the rationality of the 100% capacity of steam turbine bypass under FCB conditions [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(11): 39-44.

- [7] 谭金. 国产超临界机组实现快速切负荷的若干技术问题探讨 [J]. 广东电力, 2010, 23(10): 50-53.

TAN J. Discussion of technical problems in FCB on home made supercritical units [J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(10): 50-53.

### 作者简介:



WU J K

吴家凯(通信作者)

1976-, 男, 广东湛江人, 高级工程师, 学士, 主要从事电力热机设计工作 (e-mail) wujiakai@gedi.com.cn。



HUANG T

黄涛

1963-, 男, 吉林扶余人, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事电力热力系统及安装设计研究工作 (e-mail) huangtao@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

## 我国首个海上风电 EPC 总承包建设项目顺利完成测风塔桩基施工作业

2018年3月6日, 中国能建广东院 EPC 总承包承建的广东粤电湛江外罗海上风电项目顺利完成测风塔桩基施工。该项目位于广东省湛江市徐闻县新寮岛及外罗以东的近海区域, 总装机容量为 200 MW。项目建成后, 年上网电量超 5 亿千瓦时, 每年可节省燃煤消耗约 17 万吨, 减排二氧化碳约 35 万吨、二氧化硫 280 吨, 对我国促进节能减排、优化调整能源结构具有积极意义。

(中国能建广东院)