

# 火电机组FCB设计及试验分析

李鹏,赵启成

(中国电力建设工程咨询中南有限公司,武汉 430000)

**摘要:**具有FCB功能的机组对电网和电厂都有着重大作用。对高/低压旁路和高排通风阀的配置选型、除氧器的有效容积及汽源切换、给水泵运行调节、再热压力的选择等汽轮机主要环节进行了研究。结合沙特某亚临界660 MW机组的FCB试验数据,对汽轮机各主要系统参数进行了分析。结果表明机组可以实现FCB的功能,并验证了设计选型,为今后机组FCB系统设计和电厂运行提供了经验。

**关键词:**火电机组;FCB;设计;PCV阀

**中图分类号:**TK 262

**文献标志码:**A

**文章编号:**1674-1951(2018)12-0001-03

## 0 引言

随着电网规模的不断扩大,其影响力也不断增强。2001年美国加州和2008年2月美国佛罗里达州的大面积停电,给当地人民的生活造成了很大影响<sup>[1]</sup>;2008年我国南方因冰雪天气引起的电网大范围瘫痪,让过半数的中国人度过了一个异常“难忘”的春节。人们对电网安全重要性的认识在不断增强。

除加强电网建设以增加其可靠性外,发电厂机组快速甩负荷带厂用电(FCB)功能的建设也引起了越来越高的关注。FCB功能对提高电网的安全性有着极大的作用,也大大降低了自备电厂的投资<sup>[1]</sup>。

## 1 FCB工况概述

### 1.1 FCB工况定义

FCB指在电力系统故障或电厂内部故障造成发电机突然甩去部分负荷或全负荷的情况下,锅炉在保证不停炉的前提下快速减少负荷并稳定燃烧,待事故消除后迅速恢复机组正常运行<sup>[1]</sup>。

### 1.2 FCB工况功能

FCB可维持带厂用电“孤岛运行”或者“停机不停炉”,其主要功能如下<sup>[2]</sup>。

(1)对电网:有助于电网在最短时间内恢复正常,减少停电事故造成的损失。

(2)对电厂:有助于发电机组的正常停运,同时减少停机次数,提高电厂的经济安全性。

(3)对铝厂、钢厂等自备电站:在工艺设备发生故障时,维持孤网运行,故障排除后,快速恢复全厂供电,最大程度上减少停电造成的损失。

### 1.3 FCB工况下的控制流程

在FCB全过程中,过热器和再热器安全阀不开启;在FCB工况投入初期(过渡状态),汽机主蒸汽(以下简称主汽)阀快速关闭,汽机旁路快速打开;如果锅炉负荷不能相应快速降低,主汽压力会升高,这时锅炉过热器出口压力调节阀(PCV阀)会短暂打开,排放一定量的蒸汽;随着锅炉负荷降低,主汽压力恢复正常,PCV阀关闭;FCB工况稳定运行期间,PCV阀都是关闭的,不能排放蒸汽。

## 2 主要热力系统设计

### 2.1 汽机旁路系统

(1)高压旁路(以下简称高旁)阀一般按照60%锅炉最大连续蒸发量(BMCR)设置<sup>[2]</sup>,锅炉过热器出口PCV阀系统按40%BMCR主汽量设置,这样可以确保100%的蒸汽通流量,确保FCB工况投入初期锅炉过热器安全阀不打开。许多欧洲国家以核电和水电作为基本负荷,用大型火电厂调峰,常采用100%BMCR的高旁。

(2)低压旁路(以下简称低旁)容量按高旁出口流量配置,包括高旁减温水量。

(3)高、低旁采用液动旁路。高旁具有快开功能;低旁具有快开和快关功能。

### 2.2 除氧器

FCB瞬时除氧器出水与进水工质存在差值。FCB会造成除氧器水位急剧下降,故要求除氧器具有一定水容积。适当增加水箱容积,增加投资不大,但可以有效提高FCB瞬时机组安全性。除氧器有效容积可为在除氧器凝结水断水时,满足BMCR工况运行8min的给水流量。除氧器有效容积此时为正常水位与低水位间容积差。

FCB工况时汽机四段抽汽已经解列。除氧器加

热汽源为再热冷段,从辅汽联箱引接管道至除氧器的加热蒸汽管道。再热冷段至辅汽联箱管道和辅汽至除氧器管道上设置快开调节阀。辅汽联箱本身就有稳压的作用,快开调节阀全部打开仅需要 2 s,而一般调节阀设计开度不大于 75%,所以系统完全可以满足 FCB 瞬态加热要求。而且该系统简单,投资较少。

### 2.3 给水泵

对于汽动给水泵,正常汽源为四段抽汽,当 FCB 瞬态时,需要切换到备用汽源再热冷段,控制较复杂<sup>[3]</sup>;若采用电动给水泵则不存在切换问题,有利于 FCB 工况瞬态的机组稳定运行。

### 2.4 高压缸排汽通风阀

机组投入 FCB 带厂用电运行时,中压缸带厂用负荷运行<sup>[2]</sup>。在汽轮机高压缸排汽管路设置高压缸排汽通风阀(以下简称高排通风阀)。高排通风阀的设计通风流量应满足高压缸不超温,防止机组高排通风阀超温跳闸。高排通风阀应直接接入排汽装置或凝汽器,接口处应设置减温消能装置。

### 2.5 末端冷却装置

机组外部负荷甩掉时,低旁阀打开,进入末端冷却装置(空冷或水冷凝汽器)的热量瞬间激增,此时需校核热量增加时机组背压变化,需确保不因背压升高引起跳机。

### 2.6 再热压力选取

FCB 工况设计的关键是再热压力的选取。由于甩负荷带厂用电负荷率较低(一般为 5% 到 10%),所需进汽量小。若再热蒸汽压力过(以下简称再热压力)低,蒸汽比容增大,则必须增加低压旁路系统容量以维持低旁额定流量,导致投资增加,布置困难;若再热压力过高,则中压调节阀(以下简称中调阀)开度较小。再热压力为 1.5 MPa, 3.0 MPa 时中调阀开度与流量的关系曲线如图 1 所示:中调阀开度较小时,流量变化很大,易造成负荷波动大;为了稳定负荷、降低再热汽压力,增大阀门开度,此时流量对阀门开度敏感性较差。

FCB 工况设计的再热压力通常选取 1.2 MPa。

### 2.7 运行方式选择

鉴于 FCB 运行时机组处于低负荷运行,应优先选择中/低压缸进汽、高压缸不进汽的运行方式,以提高机组运行安全性,其优点如下。

(1) 高压缸不进汽使高压缸高温部件金属温度与蒸汽温度间无负匹配,避免产生大的热应力。

(2) 高压缸不进汽做功可增大中压缸进汽流量,直接增加低压排汽流量,有利于低压冷却。

(3) 高压缸不进汽,只需调节中调阀开度即可控制转速、负荷,调节方式简单。

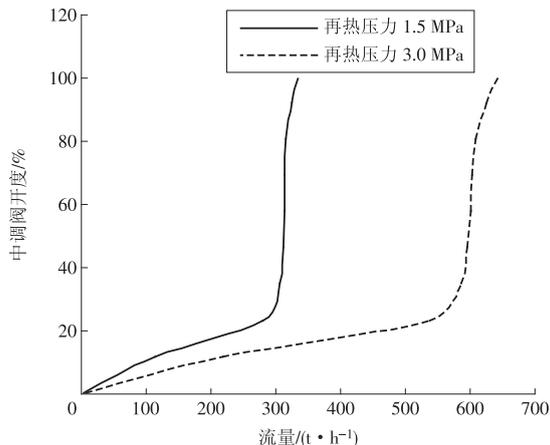


图 1 中调阀开度与流量关系曲线

### 2.8 汽轮机入口参数要求

为避免中压进汽部分金属温度与蒸汽温度间负匹配太大,应控制中压蒸汽的温度:前期温差越小越好,最高不超过 40℃;机组稳定后蒸汽温度可降至机组极热态启动时的温度,温降率控制在 2℃/min 以内。

## 3 FCB 工况时机组的运行控制调节

### 3.1 FCB 投运至稳定运行的过渡阶段

FCB 过渡阶段,锅炉、汽机及相关辅机均处在负荷及参数急剧变化的阶段,通过相关的调节手段,保证机组不报警跳机,锅炉安全阀不打开,使机组达到 FCB 稳定运行的参数条件。

FCB 工况发生时,汽机数字电液控制系统(DEH)快速关闭,高压调节阀(以下简称高调阀)和中调阀延时 2 s,同时将协调控制方式切换为转速调节;若 2 s 后转速持续超过 3 000 r/min,则超速保护控制(OPC)动作;待 OPC 动作恢复后,中调阀重新打开;此后由 DEH 通过比例-积分-微分(PID)控制器对转速进行控制,维持机组在 3 000 r/min 运行。

FCB 稳定运行阶段,汽机采用中压缸进汽带厂用电负荷,自动调节中调阀带厂用电运行,维持汽机转速 3 000 r/min,并通过高排通风阀维持高压缸温度不过热。

### 3.2 FCB 结束阶段

按汽机中压缸启动程序,即可并网升负荷至满负荷。

## 4 FCB 工况案例分析

截至目前,沙特 660 MW 亚临界机组、兰溪 600 MW 超临界机组、伊朗 ARAK 325 MW 亚临界、印尼龙湾 300 MW 亚临界机组等已成功完成了 FCB 功能试验。以沙特 660 MW 亚临界机组 FCB 试验为例进行试验分析,其典型时刻分散控制系统(DCS)显示值见表 1。

表 1 沙特 660 MW 亚临界机组 FCB 试验典型时刻汽机参数

统计点/个	试验时间	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	负荷/MW	主汽压力/MPa	主汽温度/℃	主汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )
1	15:32:12	3 602	657.5	16.7	526.7	2 108.9
44	15:41:27	3 611	660.1	16.7	527.7	2 115.4
45	15:41:40	3 778	39.7	17.1	527.7	2 036.0
51	15:42:57	3 628	44.7	16.6	529.2	1 555.7
218	16:18:51	3 606	34.5	13.0	531.9	967.8
600	17:40:59	3 602	237	12.1	542.5	900.0

高调阀开度/%	中调阀开度/%	高旁阀后压 力/MPa	再热压 力/MPa	高旁阀开 度/%	低旁阀开 度/%
83.9/93.3/13.9/71.9	99.8/99.7	3.9	3.7	0.0	0.05
84.9/93.4/14.5/72.9	99.8/99.7	3.9	3.7	0.0	0.02
-0.7/-0.5/-1.1/-0.8	-4.5/-0.3	4.2	3.9	75.0	55.7
-0.7/-0.6/-1.2/-0.9	14.0/14.0	2.9	2.8	97.6	81.4
-0.3/-0.3/-0.9/-0.7	16.9/16.9	1.3	1.2	58.3	90.8
31.3/37.8/10.7/26.8	99.7/99.9	1.6	1.5	0.67	0.0

注:统计点间隔为 13 s。

机组从 15:41:27(第 44 个统计点)开始进行试验,在接下来一个统计点(13 s)内,4 个高调阀和 2 个中调阀迅速关闭,高、低旁阀迅速打开,同时转速由 3 611 r/min 增加到 3 778 r/min;主汽压力由 16.7 MPa 升高到 17.1 MPa;汽机负荷由额定迅速降低至 39.7 MW。大约进行 7 个统计周期(91 s)后:转速经过调速控制下降至 3 628 r/min;主汽压力开始下降

至 16.6 MPa;中调阀开度至约 14%;汽机负荷小幅升至 44.7 MW。经过一段时间的调整,机组达到 FCB 工况稳定运行状态,在 16:18:51 时:转速稳定在额定 3 600 r/min 左右;中调阀开度至约 16%;再热压力为 1.2 MPa。

整个试验过程机组主要参数变化趋势如图 2 所示。由图 2 可以看出,在 FCB 工况投入初期(过渡状

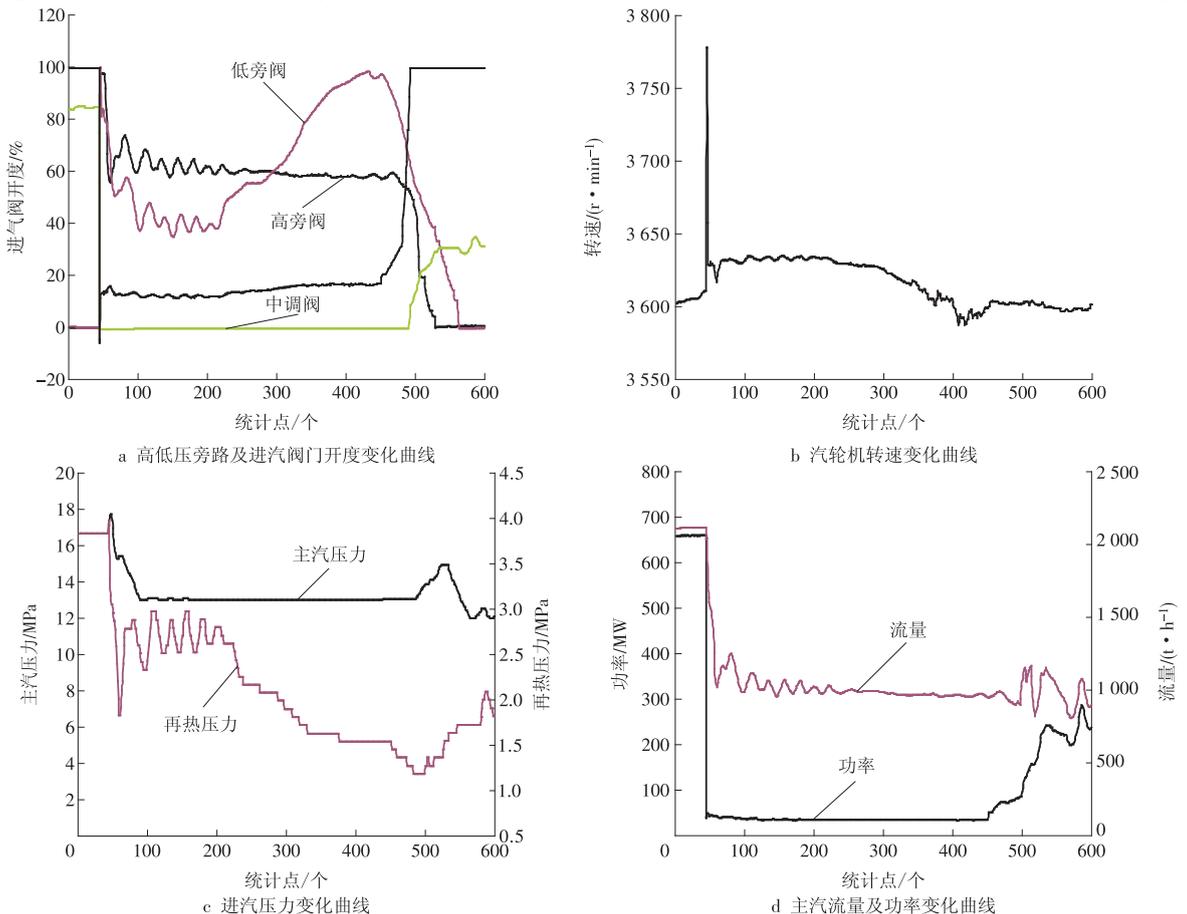


图 2 机组 FCB 过程中主要参数变化趋势

(下转第 7 页)

计算一次,在下次计算之前维持上一次的的评价、计算结果。如每日 07:00 计算一次补水率,假设本次计算结果不超出 10% 评价为 I 级,则在下一次评价补水率之前,补水率这一项的评价结果一直为 I。

具体算例数据见表 7,取某日 07:00 数据进行评价。

表 7 泄漏状况上传参数评价范例

项目	参数
瞬时补水量/(t·h <sup>-1</sup> )	98
24 h 累计补水量(每日 07:00)/t	1 296
补水泵运行台数	1
24 h 累计热网流量(每日 07:00)/t	296 420
补水率计算结果/%	0.44
回水压力/MPa	0.36

对 4 项参数进行评价,根据评价标准、补水量评级为 I,补水泵台数评级为 I,回水压力和补水率的评级也均为 I,三者最大等级为 I,最终泄漏状况上传参数这一子项的评价等级为 I。

若对于补水泵间歇补水运行,当前时刻可能未完成补水泵一个周期的运行,周期内的补水量统计数值不完整,因此选择补水泵上一个运行周期内的累计补水量与当前周期内的现有累计补水量取大者与参考值进行比较。

## 7 结束语

通过调研与分析,本文建立了一个完整的基于上传参数的供热系统泄漏状况评价体系,评价体系能够利用补水量等参数的变化对供热系统泄漏状况进行等级评价并给出意见及建议。

评价体系的参数的阈值为供热人员的经验总结,缺少对故障数据的分析研究,带有明显的主观

(上接第 3 页)态),汽机高调阀和中调阀快速关闭,高、低旁阀快速打开,主汽压力升高,转速飞升;而后中调阀打开,中压缸进汽,机组做功;经过短暂的调整,转速恢复额定,主汽压力、主汽流量和功率经过振荡调整后维持稳定,达到稳定状态。

沙特 660 MW 亚临界机组的 FCB 试验中:当统计点为 45~300 个,再热压力为 3.00~1.50 MPa,再热阀开度为 11% 左右,负荷和流量处于波动状态;当统计点为 320~450 个时,机组处于稳定厂用电状态,再热压力为 1.17 MPa 左右,再热阀开度约为 16.9%。试验验证了再热压力选取的正确性。

## 5 结束语

通过对汽轮机主要系统的设计选型,并结合试

性。在此体系的结构基础上对故障数据进行整理,分析故障时参数变化量的特性,是完善评价体系的一个有效的途径与发展方向。

## 参考文献:

- [1] 邹平华,雷翠红,王威. 热网故障与提高热网可靠性的措施[J]. 暖通空调,2008,38(11):7-12.
- [2] 单立军. 供热管网泄漏检测方法探讨[J]. 区域供热,2014(6):91-94.
- [3] 张志清. 供热管网泄漏故障诊断的思考[J]. 中国高新技术企业,2017(8):91-94.
- [4] 董壮进. 供热管网系统泄漏与堵塞的诊断[J]. 煤气与热力,2000,20(3):192-194.
- [5] 雷翠红. 供热管网泄漏故障诊断的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(本文责编:齐琳)

## 作者简介:

傅强(1977—),男,黑龙江海林人,工程师,从事供热领域和电能表计量方面软件研发、工业控制和系统集成等方面的工作(E-mail:fuqianghrb@163.com)。

柳耀文(1971—),男,山东掖县人,工程师,从事供热领域软件研发、工业控制和系统集成,工业控制和系统集成等方面的工作(E-mail:727378210@qq.com)。

周添(1993—),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,从事暖通专业研究工作(E-mail:1044286341@qq.com)。

刘海波(1980—),男,黑龙江集贤人,工程师,从事供热领域软件研发、工业控制和系统集成,工业控制和系统集成等方面的工作(E-mail:18516674@qq.com)。

赵加宁(1956—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,从事建筑节能、建筑室内环境及其评用等方面的工作(E-mail:zhaojn@hit.edu.cn)。

周志刚(1978—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,从事供热系统可靠性与故障诊断研究、智能供热、系统参数辨识与优化运行研究方面的工作(E-mail:hit\_zzg@163.com)。

验数据的分析,验证了机组 FCB 功能的可行性。其他 FCB 机组设计时可以借鉴。

## 参考文献:

- [1] 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,2007,20(3):251-254.
- [2] 高升,郭荣,肖伯乐. 一类超临界机组的 FCB 功能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(A02):297-301.
- [3] 冯伟忠. 900 MW 超临界机组 FCB 试验[J]. 中国电力,2005,38(2):74-77.

(本文责编:陆华)

## 作者简介:

李鹏(1984—),男,湖北襄阳人,工程师,硕士,从事火电厂热力系统研究(E-mail:lip200509@163.com)。