

# 变流器控制的背压式抽汽汽轮机应用研究

张杰<sup>1</sup>, 唐丽婷<sup>2</sup>

(1. 西安益通热工技术服务有限责任公司, 西安 710000;

2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 西安 710077)

**摘要:** 以中国首台投产的变流器控制的BEST(背压式抽汽汽轮机)小机在超超临界二次再热机组中的应用为研究对象, 描述了BEST小机的控制运行方式, 并针对BEST小机在调试过程中出现的问题进行了分析, 如变流器控制方式下超负荷、BEST小机甩负荷时给水流量波动大、BEST小机从小汽轮机电液控制系统方式切换至变流器控制时跳闸等。通过运行参数及控制方式的调整, 如提高小机背压、减缓小机调门动作幅度及增加转速信号采集时间等, 最终有效解决了问题, 使BEST小机进入节能高效的调门全开控制方式。在后期机组变负荷过程中, 小机给水流量、抽汽回热系统及小发电机功率均能正常匹配, 可为同类新建机组提供参考。

**关键词:** 背压式抽汽汽轮机; 变流器; 小发电机; 超负荷; 甩负荷

**DOI:** 10.19585/j.zjdl.202307014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application research and optimization of back pressure extraction steam turbine controlled by converter

ZHANG Jie<sup>1</sup>, TANG Liting<sup>2</sup>

(1. Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The application of the first converter controlled BEST (back pressure extraction steam turbine) in the ultra-supercritical secondary reheat unit is studied as the object. The control operation mode of the BEST is described, and the problems in the commissioning process of the BEST, such as the overload in converter control mode, the great fluctuation of feed water flow produced by the load dump of BEST, and the trip of BEST controlled from MEH (micro electro-hydraulic control system) mode to converter mode, are analyzed. By the adjustment of operation parameters and control modes, such as improving the back pressure of BEST, retarding the regulating valve movement range of BEST and increasing the acquisition time of speed signal and so on, finally the problems are effectively solved, making the BEST into energy-efficient regulating valve full control mode. Afterwards, in the process of turbine changing to load, feed water flow and extraction system and small generation power are properly matching, which can provide reference for similar new units.

**Keywords:** back pressure extraction steam turbine; converter; small generator; overload; load dump

## 0 引言

目前超超临界二次再热机组因其高效节能已被广泛应用<sup>[1]</sup>, 但因抽汽回热系统蒸汽温度压力较高, 加热器中过热蒸汽与给水存在很大的传热温差, 不可逆损失使回热系统热能有效利用率下降<sup>[2]</sup>, 较高的蒸汽又对换热器产生了较大的热应力, 缩短了设备使用寿命<sup>[3]</sup>。为此提出并应用双机回热BEST(背压式抽汽汽轮机)小机。BEST小机进汽来自主汽轮机超高压缸排汽, 部分蒸汽经做功后引入抽汽系统加热高压加热器, 降低了蒸

汽的高过热度对回热系统的影响, 使回热焓升的分配更加均匀<sup>[4-6]</sup>。在此基础上, 引入带变流器控制方式的BEST小机, 正常运行期间小机进汽调门全开, 降低节流损失, 可进一步提高机组效率<sup>[7]</sup>。正常运行期间, 超高压缸排汽驱动小机做功, 带动给水泵运行, 在满足给水量要求后的剩余功率将通过变流器转换为同轴小发电机的发电功率并输送至厂用电<sup>[8-9]</sup>。小机排汽最终进入7号低压换热器, 将热量传递至凝结水回收。目前国内已有部分电厂(如广东陆丰甲湖湾电厂)成功应用了双机抽汽回热系统的BEST小机, 对其运行

方式和经济性进行研究分析后,发现其可将循环能效和通流效率提高至90%以上。而本文所述的带变流器控制的BEST小机因其运行期间调门全开,且通过同轴小发电机提供部分厂用电,其效率将会得到更高提升。目前在国内提倡节能减排、提质增效的大环境下,对其运行方式及故障分析处理的研究很有必要。

带变流器控制的BEST小机在国内外还属于首次应用,目前并无经验可循。由于系统设计复杂且关联性强,小机转速、给水流量、背压,小发电机功率的参数控制难度增加<sup>[10]</sup>。本文以常规小汽轮机为模型,结合变流器控制模式的特性,对收集的数据及运行趋势进行分析对比,挖掘出变流器控制的BEST小机的控制模式及特有问题的分析研究,相关经验对后期投产的同类机组具有示范意义和参考价值。

## 1 BEST小机及系统简介

### 1.1 现阶段BEST机组的典型配置

目前国内BEST小机的配置有两种模式。第1种是2018年投产的陆丰甲湖湾电厂BEST小机,小机工作汽源来自高压缸排汽,额定进汽压力为6.0 MPa,额定进汽温度为353℃。小机本体回热抽汽设计为三抽一排,即带载3、4、5号高压加热器,排汽经混合集箱排放至6号低加,供电煤耗为268.55 g/kWh。小机不带小发电机,正常运行期间通过MEH(小汽轮机电液控制系统)阀控方式控制转速,阀门不全开。此类型小机在运行期间转速控制稳定,仅提供抽汽加热并维持汽泵要求转速即可。第2种是2021年投产的华能瑞金电厂二期BEST小机,小机工作汽源来自超高压缸排汽,额定进汽压力为12.26 MPa,额定进汽温度为448.9℃。小机本体回热抽汽设计为五抽一排,即带载2、3、4、5号高压加热器和除氧器,排汽经混合集箱排放至7号低加,综合发电煤耗为249.7 g/kWh。此小机配置了变流器控制的小发电机,在正常运行阶段进汽调门全开。与第一种配置相比,第二种配置的蒸汽初参数更高,回热级数多利用效率更高,且进汽调门全开,无节流损失,小机剩余功率转化为小发电机的发电功率,效率明显提高,但系统较复杂,运行时小机转速

需与小发电机功率匹配。

### 1.2 设备简介

华能瑞金电厂2×1 000 MW新建工程3号机组汽动给水泵组采用的是双机回热抽汽系统的BEST小机(以下简称“小机”),由上海汽轮机厂制造。小机配有小发电机,小发电机配有变流器。正常运行时小机进汽来自超高压缸排汽,小机进汽调门全开,跟随主机滑压运行。小机驱动给水泵组后的多余功率通过小发电机发电进行消纳平衡。此时,小机转速由变流器控制。当小发电机发生故障时,控制方式切换为常规调门节流控制的MEH控制方式。小机进汽主调门具备独立快速的调节转速功能,并能与小发电机功率调节相互配合使用。小机的主要设计参数如表1所示。

表1 小机主要设计参数

Table 1 Main design parameters of BEST

参数	数值
额定功率/MW	51.47
额定进汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	732.88
小机汽源	超高压缸排汽
额定进汽压力/MPa	12.26
额定进汽温度/℃	448.9
额定背压/MPa	0.8
小机排汽流向	7号低加
回热抽汽级数	5抽1排
小机各段回热抽汽/MPa	9.1/6.2/4.0/2.4/1.3/0.8
进汽控制方式	MEH/变流器

变流器是使电源系统的电压、频率、相数和其他电量或特性发生变化的电器设备。应用于BEST小机时表现为小机启动初期,由于蒸汽量不足,需要从母线吸收电能使小发电机变成电动机拖动小机及汽泵运行向锅炉上水。当小机进汽量充足切换为阀门全开方式时,多余的能量经小发电机发电,通过变流器向外输出功率。整个运行工况电机转速为同一方向,电动与发电时仅电磁转矩反向。变流器接收来自DCS(分散控制系统)的转速指令,采用转速与转矩电流内环控制策略,实现对机组的调速控制。

### 1.3 系统流程

小机工作汽源来自主机超高压缸排汽,小机有5级抽汽(定义为机组的2—6级抽汽),分别供给2—5号高压加热器和除氧器。小机的排汽供至

7号低压加热器,在进入7号低压加热器前设计有蒸汽混合集箱。混合集箱主要调整小机的排汽参数,当小机背压超高限或压比小于规定限值时<sup>[11]</sup>,通过溢流阀排汽至8号低加。当背压低并通过8号抽汽至7号低加补汽时,控制小机排汽压力为0~0.8 MPa,排汽压比大于1.04。汽动给水泵组轴系配置为:前置泵—齿轮箱—给水泵—小机—高速同步电机。小机的系统流程如图1所示。

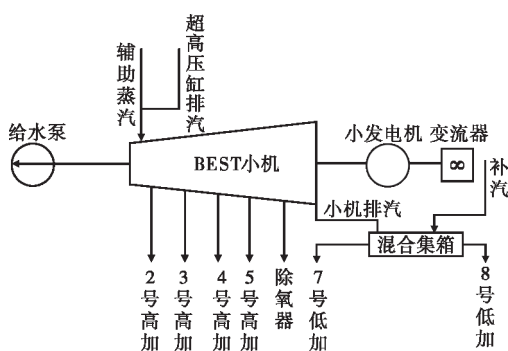


图1 小机系统流程

Fig.1 Flow chart of BEST system

### 1.4 运行模式

小机设计有两路汽源,分别在启动和正常运行时使用。启动时汽源为辅助蒸汽,工作时汽源为主机超高压缸排汽。

启动阶段:小机使用辅助蒸汽通过常规的MEH控制方式冲转升速至1 000 r/min,进行低速暖机,直到小机内缸内壁金属温度大于等于150℃时低速暖机结束。再次升速有两种启动方式选择:

1)电动机启动方式。通过变流器电动机方式拖动升速至2 400 r/min,升速过程中小机进汽调门开度不变,辅助蒸汽始终作为缸体的冷却蒸汽,防止缸体鼓风发热<sup>[12]</sup>。待超高压缸排汽压力大于辅助蒸汽压力时,切换小机汽源至主机超高压缸排汽,小机进入变流器控制模式。

2)小机启动方式,即常规的MEH控制方式。通过辅助蒸汽直接冲转升速至2 400 r/min,待超高压缸排汽压力大于辅助蒸汽压力时,切换小机汽源至主机超高压缸排汽,小机进入变流器控制模式。

大部分电厂的辅助蒸汽汽源参数设计较低,一般选择第一种电动机启动方式。当锅炉点火升温升压,且一次冷再蒸汽压力高于辅助蒸汽压力

后,开始切换汽源至工作汽源,一次冷再蒸汽至小机进汽电动门全开,小机进汽调门缓慢全开,此时小机自动切换至变流器控制方式,汽泵转速接受来自DCS的指令保持不变,随着一次冷再蒸汽参数上升,小电动机出力缓慢下降,直到小电动机出力降至0 MW后通过变流器自动转变为发电模式,变流器接受DCS发出的汽泵转速指令,通过控制转矩电流控制汽泵转速,多余的蒸汽能量通过小发电机消纳平衡,转变为小发电机的功率,小发电机出口连接至厂用电。

## 2 试运过程出现的问题

### 2.1 变流器控制期间小发电机超负荷

变流器在运行期间有故障保护功能,当发生小机目标转速与实际转速偏差大于50 r/min、变流器负荷超出限制、控制单元电气故障、小发电机甩负荷等情况时会自动切换至MEH控制。变流器超限保护是小发电机自身设计特性,即在某一转速下小发电机的发电功率不能超过对应的负荷上限值,若小机剩余功率增加,转速会出现上升趋势,此时变流器会自动提高转矩电流,克服转速上升,表现为小发电机的发电功率增加,若转矩电流继续增大,将无法保障设备安全运行。同时也表明小机的功率和小发电机的剩余功率没有正常匹配,系统运行偏离设计工况。小机转速与剩余功率设计曲线如图2所示。

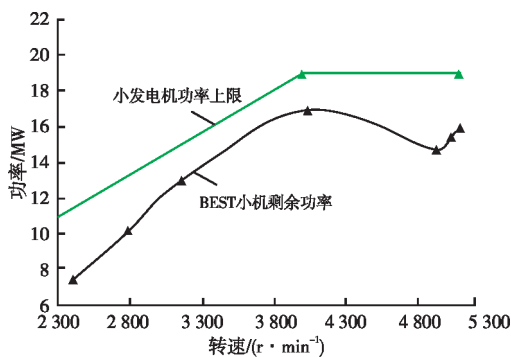


图2 小机转速与剩余功率特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of rotate speed and surplus power for BEST

#### 2.1.1 运行期间小发电机功率超限

机组启动时,小机通过辅汽暖机及变流器拖动方式启动汽泵升速至2 400 r/min向锅炉上水,

锅炉点火升温升压,汽轮机冲转并网,一次冷再蒸汽温度达到412℃、压力达到5.57 MPa时,小机汽源从辅助蒸汽切换至一次冷再蒸汽,小机进汽调门全开后,切换至变流器控制方式。为提高给水温度,逐渐投入高压加热器,切换完成后,小机主要运行参数如表2所示。

表2 小机主要运行参数

Table 2 Main operation parameters of BEST

参数	数值
机组负荷/MW	390
小机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 032
进汽温度/℃	413
进汽压力/MPa	5.57
调门开度/%	100
小发电机功率/MW	14.5
小发电机功率上限/MW	14.8
排汽温度/℃	129
排汽压力/MPa	0.26
给水温度/℃	271

从表1中可以看出,机组负荷390 MW时,小发电机功率逐渐上升14.5 MW,此时负荷值达到14.8 MW,已接近上限值。为防止电流过大造成设备损坏,变流器有负荷上限保护。该负荷上限与小机的转速呈一定的关系,当转速在4 000 r/min及以上时,最大出力限制为19 MW;当转速在4 000 r/min以下时,最大出力限制值与小机转速呈线性下降关系。

机组升负荷期间,为了增加给水流量,缓慢关闭汽泵再循环时,小发电机功率上升至15 MW,达到上限值,变流器负荷上限保护动作,小机控制方式自动切换至MEH方式,调门开度关小至24%,小发电机发电负荷降至13 MW。汽泵转速维持不变。其动作趋势如图3所示。

### 2.1.2 原因分析

小机正常运行期间,拖动前置泵、汽泵及小发电机,进汽调门全开时处于变流器控制方式,小发电机的剩余功率无法调节,只受转速、进汽流量、进汽温度、背压、排汽温度等这些因素的影响,在不考虑小机散热损失的情况下,可以得出:

$$P_T = P_F + P_B + P_G + P_M \quad (1)$$

式中:  $P_T$  为小机轴功率;  $P_F$  为给水泵功率;  $P_B$  为

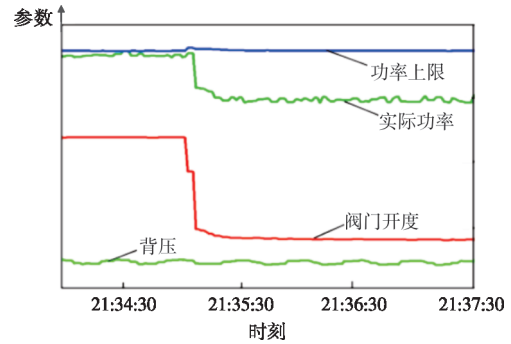


图3 变流器负荷超限动作趋势

Fig.3 Trend diagram of overload for converter

前置泵功率;  $P_G$  为小发电机功率;  $P_M$  为机械损失功率。

根据当前工况,给水泵和前置泵在转速不变的情况下功率不变,机械损失功率主要是轴承摩擦阻力。在小机进汽调门全开的变流器控制方式下,只有降低小机的轴功率,才能降低小发电机的剩余功率。汽轮机轴功率计算公式为:

$$N = G\Delta H_s \frac{\eta}{3600} \quad (2)$$

式中:  $N$  为功率;  $G$  为蒸汽流量;  $\Delta H_s$  为等熵焓降;  $\eta$  为内效率。

当前小机的运行工况是投入部分抽汽加热高压加热器提高给水温度,小机排汽进入7号低压加热器经事故疏水进入凝汽器。其中蒸汽焓降包括了抽汽焓降和排汽焓降,焓降过大是导致小机轴功率增大的主要原因。因此,尝试通过运行方式的改变,减少小机至高压加热器的抽汽量,增加小机排汽量提高小机背压以降低蒸汽焓降的方式来改变小机的轴功率<sup>[13-14]</sup>。对于双机回热抽汽机组中带变流器控制的背压式小机,打破常规的高、低压加热器投入顺序,先投入7号低压加热器,建立小机背压,小机本体抽汽系统暂不投入,待小机成功切换至变流器控制模式后再投入高压加热器,防止变流器超负荷现象的发生。

### 2.1.3 提高小机背压的方法

机组启动带负荷后,在变流器控制方式投入前,暂不投入小机本体高加抽汽系统,关闭小机排汽至凝汽器,打开小机排汽至7号低压加热器,关闭7号低加危急疏水,逐渐建立7号低压加热器正常水位,小机排汽背压逐渐增加。对比之前的小机排汽运行方式,小机排汽压力为0.26 MPa,

通过调整, 使小机排汽压力上升至 0.43 MPa。

本机组中压缸仅抽出一路蒸汽供 8 号低压加热器, 低压缸分别抽出多路蒸汽供 9—12 号低压加热器, 均用于加热凝结水。机组带负荷后, 投入 8—12 号低压加热器, 使凝结水温度提高, 并调整循环水进水量来降低凝结水的过冷度。7 号低压加热器凝结水温度上升后, 小机排汽温度与凝结水温度偏差变小, 根据水蒸气饱和温度特性, 凝结水温度升高, 凝结速率变缓, 小机排汽背压升高。通过以上方式的调整, 与之前凝结水温度比对, 7 号低压加热器凝结水温度从 58 °C 上升至 126 °C。

### 2.1.4 控制后的结果

经过以上方式的调整, 小机排汽压力明显提高, 在切换至变流器控制方式过程中, 小发电机最大功率为 11.68 MW, 当负荷上限为 15 MW 时, 切换过程转速及负荷稳定平稳, 未超出负荷上限。切换过程如图 4 所示。

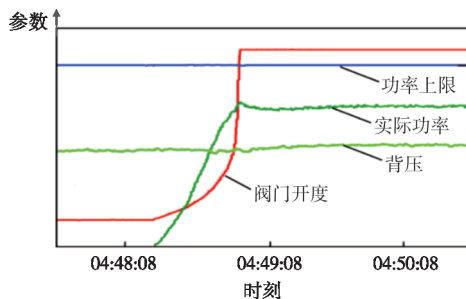


图 4 MEH 控制切换至变流器控制过程趋势

Fig.4 Trend diagram of control mode switching from MEH control to converter control

切换完成后, 小机进汽调门全开, 蒸汽量增加, 此时再依次投入高压加热器, 提高给水温度, 使抽汽回热系统全面正常运行。切换完成后主要参数如表 3 所示。

需要说明的是, 此种方式解决了小发电机超负荷无法切换至变流器运行的问题, 但也使机组在低负荷运行阶段给水温度偏低, 蒸发量减小, 使锅炉再热汽温度偏高。机侧可通过增大除氧器加热, 尽量提高给水温度, 炉侧使用再热汽减温水控制汽温, 快速通过低负荷阶段。

## 2.2 小发电机甩负荷试验给水流量波动大

### 2.2.1 小发电机甩负荷试验要求

小机运行期间带载小发电机, 一旦小发电机

表 3 变流器控制方式运行参数

Table 3 Operation parameters of converter control mode

参数	数值
机组负荷 MW	391
小机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 113
小机负荷上限/MW	15.01
小机实际负荷/MW	11.68
小机进汽压力/MPa	5.24
小机背压/MPa	0.43
小机排汽温度/°C	142
7 号低加凝结水温度/°C	116
小机进汽调门开度/%	99

甩负荷, 必须检验小机调节功能是否满足要求, 防止小机超速且要求调节系统运行平稳<sup>[15]</sup>。不同于常规汽轮机, 小机在甩负荷后还要拖动给水泵运行并提供高压加热器蒸汽, 以满足给水流量和给水温度平稳。

### 2.2.2 第一种甩负荷试验方案

在小发电机解列后, 调门指令迅速执行 0%, 并延时关闭 1 s, 抽汽系统逆止门迅速关闭, 根据 DCS 要求的转速指令恢复至动作前转速。试验趋势如图 5 所示。

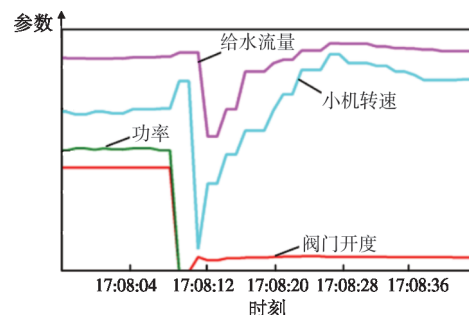


图 5 第一种甩负荷试验方案运行趋势

Fig.5 Trend diagram of the first test scheme of load shedding

由图 5 可知, 在小发电机功率为 15 MW 时, 小机甩负荷时瞬时最大转速为 4 170 r/min, 最小为 3 829 r/min, 最终稳定在 4 070 r/min, 动态超调量为 2.45%。但观察给水量变化范围可以发现, 给水量从 2 341 t/h 下降至 1 614 t/h 后恢复, 给水量在瞬时下降了 727 t/h 后逐渐恢复, 转速上升幅度较小但调门在全关后保持 1 s 的时间段给水量下降过大, 对锅炉安全运行造成隐患。

### 2.2.3 第二种甩负荷试验方案

小发电机甩负荷后调门不全关，自动切换至MEH控制方式跟踪当前转速，取消调门动作延时。此方案对小机转速的控制稍差，但因小机在甩负荷后还需拖动给水泵运行，受制于汽泵和前置泵的反作用力，会抑制转速上升，小机一直处于进汽状态，高压加热器抽汽系统也无需解列。试验趋势如图6所示。

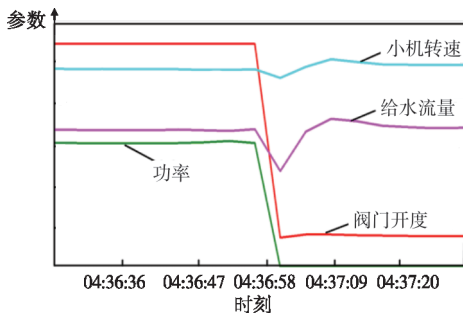


图6 第二种甩负荷试验方案运行运行趋势

Fig.6 Trend diagram of the second test scheme of load shedding

从动作情况和试验数据得出，小机瞬时最大转速为4 231 r/min，最小为3 995 r/min，稳定在4 055 r/min，动态超调量为4.34%。给水流量变化范围最大时从2 333 t/h下降至1 954 t/h后恢复，给水流量瞬时下降了379 t/h，可以看出小机转速控制不及第一种方案，但给水流量控制效果明显。

### 2.2.4 两种方案结果对比

第一种方案控制汽泵转速上升作用明显，动态超调量为2.45%，但导致给水流量下降较快；第二种方案转速瞬时升高至4 231 r/min，动态超调量为4.34%，给水流量波动明显减缓，且高压加热器不解列，给水温度稳定，虽然给水流量有瞬时增加趋势，但通过锅炉水煤比的调整很快恢复至试验前数值，保证了主蒸汽的过热度，主汽温几乎无变化。鉴于本小机系统的特有设计，甩负荷时既要控制转速飞升，又要尽量维持锅炉给水流量稳定，减少锅炉的运行风险。综合分析，第二种方法更安全可靠，对给水流量的控制更加稳定。

## 2.3 MEH切换变流器控制时机组跳闸

### 2.3.1 切换时出现的现象

MEH切换变流器的逻辑设计为：变流器采集

小机转速成功后逐渐开大小机进汽调门至全开，在切换过程中小机转速保持不变以维持稳定的给水流量，调门开大过程中增加的进汽量转化为小发电机的发电功率。

在一次切换过程中，小机调门逐渐开大，小发电机功率增加时小机转速开始下降，并导致给水流量快速下降，触发锅炉最小给水流量保护动作，锅炉灭火，如图7所示。

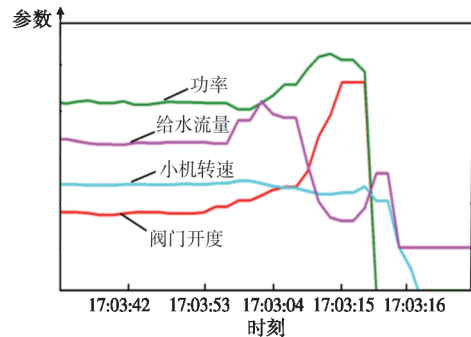


图7 MEH控制切换变流器跳闸动作趋势

Fig.7 Trend diagram of control mode switching from MEH control to converter tripping

### 2.3.2 原因分析及处理

检查逻辑发现，MEH控制交由变流器控制时，DCS发出的小机转速指令由变流器接管，而小机调门动作快于变流器接管指令，使小机实际转速与变流器输出转速指令出现偏差，偏差过大时变流器转速控制退出并切手动。变流器采集信号失败，导致了当MEH已交出小机转速控制权限时，变流器实际上并没有控制小机转速，小机转速处于失控状态，而此时变流器已执行切换指令，小机调门开大后小发电机剩余功率无法与小机转速匹配且持续增加，使小机功率下降、转速下降，导致给水流量突降。

变流器和MEH是两个独立的控制器，控制器硬件及传输速度等因素导致其网络切换稳定性、数据采集实时性受到一定的影响<sup>[16]</sup>。针对原设计进行优化，在MEH切换变流器指令发出后，小机调门暂锁定不动作，变流器增加10 s扫描时间捕捉小机转速信号，信号捕捉成功后小机调门开始动作，完成切换。后期的切换过程均顺利平稳，未出现转速下降的情况。

### 3 结语

变流器控制的小机,通过对其运行方式及存在问题的研究优化,已成功应用于超超临界百万机组。在系统投入及切换过程中出现的超负荷问题导致无法切换至变流器方式运行,通过对小机抽汽及排汽方式的调整提高了小机背压,降低了小机的剩余功率,使变流器控制模式顺利介入。在甩负荷试验时,小机不能作为独立的汽轮机仅考验动态调节性能,还要兼顾上下游系统的协调性,从而对比了两种方式,从中选取了一种减小给水流量波动和下降给水温度的方法。对两种新型独立的转速控制方式进行了控制优化,排除过程风险。具有高效、节能优势的小机在大型火力发电机组中将被广泛应用,本文的分析与研究将为其推广应用及解决相关问题提供参考意见。

然而在机组调试过程中,仍然存在一些亟待解决的问题:小机运行阶段汽源采用高参数的超高压缸排汽,使缸温很高,一旦小机短时间停机后再次启动,低参数的辅助蒸汽作为小机的启动汽源,使小机明显出现了负胀差现象,严重时还会引起负胀差越限使小机跳闸,目前在负胀差较大时只能间断性冲转,使缸温逐渐下降后与蒸汽温度匹配再升速,启动时间明显延长。可否通过两台单元机组冷再蒸汽管道相互连接、互为补充备用,来作为小机启动汽源,使高参数的蒸汽与缸温匹配,缩短小机启动时间,也可作为一种思路开展研究。

### 参考文献

- [1] 李官鹏,刘义达,安强,等.1 000 MW 超超临界二次再热机组系统比较及经济性分析[J].电力勘测设计,2018(5):52-55.  
LI Guanpeng, LIU Yida, AN Qiang, et al. System comparison and economic analysis of 1 000 MW ultra-supercritical double reheat units[J]. Electric Power Survey & Design, 2018(5):52-55.
- [2] 程辉.超超临界二次再热1 000 MW 机组回热系统优化[J].能源科技,2020,18(2):47-50.  
CHENG Hui. Optimization of regenerative system of 1 000 MW ultra supercritical double reheat unit[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(2):47-50.
- [3] 王建华,范佩佩,石峰,等.给水旁路调节下高压加热器的瞬态应力分析[J].发电技术,2019,40(4):329-338.  
WANG Jianhua, FAN Peipei, SHI Feng, et al. Transient stress analysis of high pressure heater during feedwater bypass regulations[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4):329-338.
- [4] 邓攀,王亚军.BEST 技术用于超超临界二次再热机组的可行性分析[J].中国电力,2018,51(7):84-89.  
DENG Pan, WANG Yajun. Feasibility analysis on BEST technology for ultra supercritical units with double-reheat cycle[J]. Electric Power, 2018, 51(7):84-89.
- [5] 李冰天.1 000 MW 超超临界 EC-BEST 二次再热机组经济性分析[J].热能动力工程,2018,33(11):36-41.  
LI Bingtian. Economic analysis of 1 000 MW ultra supercritical EC-BEST secondary reheat unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(11):36-41.
- [6] 朱朝阳.BEST 热力系统焓升分配和再热蒸汽压力优化[J].热力发电,2017,46(4):88-92.  
ZHU Chaoyang. Enthalpy rise distribution and optimization of reheat steam pressure for BEST system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4):88-92.
- [7] 高清林,高嘉琦,陈敦炳,等.汽轮机运行调节方式优化策略探析[J].汽轮机技术,2021,63(1):61-64.  
GAO Qinglin, GAO Jiaqi, CHEN Dunbing, et al. Analysis on optimization strategy of steam turbine operation adjustment mode[J]. Turbine Technology, 2021, 63(1):61-64.
- [8] 李昱,郭宏,平朝春,等.基于电流源变流器的永磁同步电机驱动系统全状态变量预测转矩控制[J].电工技术学报,2021,36(1):15-26.  
LI Yu, GUO Hong, PING Zhaochun, et al. A full-state variable predictive torque control of current source converter fed permanent magnet synchronous motor drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1):15-26.
- [9] 蔺奕存,普建国,高景辉,等.变流器在抽汽背压式给水泵汽轮机系统中的应用研究[J].热力发电,2022,51(4):179-187.  
LIN Yicun, PU Jianguo, GAO Jinghui, et al. Application research of converter in back pressure extraction steam turbine in feed water system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4):179-187.
- [10] 王雅倩,付亦葳,张泽雄,等.BEST 系统变工况特性及控制方式研究[J].热能动力工程,2019,34(5):42-48.  
WANG Yaqian, FU Yiwei, ZHANG Zexiong, et al. Study on the off-design characteristics and control methods of BEST system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(5):42-48.
- [11] 刘莎,沈炯,王培红.基于热经济学的热力系统主蒸汽压力-排汽压力联合优化[J].热力发电,2020,49(1):10-16.

- LIU Sha, SHEN Jiong, WANG Peihong. Joint optimization of main steam pressure and exhaust steam pressure in thermal system based on thermoeconomics [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 10-16.
- [12] 吴仕芳, 康明, 董成龙. 汽轮机高压缸鼓风发热实例研究[J]. 热力透平, 2020, 49(4): 284-288.
- WU Shifang, KANG Ming, DONG Chenglong. Case study on blast heating of high pressure cylinder of steam turbine[J]. Thermal Turbine, 2020, 49(4): 284-288.
- [13] 林湖, 周兰欣, 胡学武, 等. 背压变化对汽轮机功率影响的计算修正[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(1): 18-20.
- LIN Hu, ZHOU Lanxin, HU Xuewu, et al. Rectification and calculation the effect on turbine power of back pressure variation [J]. Turbine Technology, 2004, 46 (1) : 18-20.
- [14] 刘利, 陈啸, 李国庆. 1 000 MW 机组小汽轮机排汽供热经济性分析[J]. 山西电力, 2021(5): 56-58.
- LIU Li, CHEN Xiao, LI Guoqing. Economic analysis of exhaust steam heating for small steam turbine of 1 000 MW unit[J]. Shanxi Electric Power, 2021(5): 56-58.
- [15] 李玉宝, 何振宇, 吴昕, 等. 供热背压式小汽轮机甩负荷分析研究[J]. 电站系统工程, 2020, 36(5): 58-60.
- LI Yubao, HE Zhenyu, WU Xin, et al. Analysis and research on load rejection of small steam turbine with heating back pressure[J]. Power System Engineering, 2020, 36 (5): 58-60.
- [16] 卢化, 蔡钧宇, 蔡萍萍, 等. 国产分散控制系统主要性能测试对比[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 191-198.
- LU Hua, CAI Junyu, CAI Pingping, et al. Comparative test of main performance of domestic distributed control system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 191-198.

---

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-08-23

作者简介:

张杰(1986), 男, 工程师, 主要从事大型火力发电机组启动调试及优化工作。

(本文编辑: 徐 晗)