

# 660 MW 超超临界汽轮机自启动控制策略及其热应力计算

钱庆生<sup>1</sup>,洪超<sup>2</sup>

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏南京211102;2.景德镇陶瓷学院,江西景德镇333403)

**摘要:**以华电望亭发电厂3号机组为例,介绍上海汽轮机厂引进的德国西门子公司超超临界汽轮机自启动控制系统策略,详细阐述了数字电液(DEH)控制系统自启动的控制步骤,X准则、Z准则和控制裕度的计算方法以及相应的控制策略,为国内同类型机组的自启动控制设计提供了一个可借鉴的思路。

**关键词:**660 MW 超超临界汽轮机;自启动控制;X准则;Z准则;裕度

中图分类号:TK39

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2010)01-0069-04

目前我国几乎所有电站的机组启停均靠人工判断和控制,这种方式存在的缺点包括:(1)严重依赖运行人员的经验和水平;(2)人工控制费时费力,延长了启停过程的时间;(3)有时候仅靠运行人员的经验判断,缺乏科学依据和数据支持,为了追求运行的方便,难免存在设备热应力过大、减少设备寿命、甚至设备损害的现象。上海汽轮机厂引进的德国西门子公司超超临界汽轮机技术,采用一系列热应力计算,实时监视汽轮机应力变化,数字电液(DEH)控制系统自启停顺控步骤的执行,不仅大大减轻了运行人员的负担,提高了机组启停速度,而且也保证了机组的安全使用寿命。这项技术已在几个电厂得到成功应用,本文以华电望亭发电厂3号机组为例,进行详细介绍。

## 1 西门子超超临界汽轮机 DEH 控制系统特点

### 1.1 DEH 控制系统硬件配置

收稿日期:2009-10-12;修回日期:2009-11-20

望亭3号机组DEH控制系统采用西门子T3000控制系统,该系统集成了超高速处理器以及与之相配合的专用输入输出模件,和西门子标准处理器以及输入输出模件,以满足DEH控制各个子系统对处理器运算速度的不同要求。

(1) 控制器。在1号控制柜中,采用了2对冗余的处理器417H和FM458,实现双控制器冗余切换,切换时间为毫秒级。417H为西门子的标准处理器,而FM458即为超高速处理器。FM458具有高性能闭环控制和运算处理,高速响应能力以及高分辨率的特点,最小运算周期达到0.1ms的水平,正常控制逻辑运算处理周期一般选取几毫秒。DEH控制系统的转速控制、ETS紧急遮断和甩负荷预测及控制等要求快速处理能力的控制系统均由FM458实现,因此,1号控制柜也被称为核心控制柜。2、3号控制柜主要用于辅助系统控制和一些对处理速度要求不高的运算控制。

(2) I/O 模件。除了常规的通用模件ET200M之

[11] 李麟章,霍耀光.600 MW 火力发电机组培训教材(第2版)热工自动化[M].北京:中国电力出版社,2006.

李麟章(1944-),男,浙江余杭人,教授级高级工程师,从事发电厂热工自动化设计工作;

王健(1956-),男,江苏淮安人,高级工程师,从事发电厂热工自动化设计工作。

作者简介:

## Analysis of Energy Saving and Emission Reduction in the Design Process of Thermal Process Automation

LI Lin-zhang, WANG Jian

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Focusing on the main problems associated with the energy saving and emission reduction in the design process of thermal process automation, some aspects including strengthening the security controls of thermal power equipments, increasing operation economy, improving the reliability of energy saving and emission reduction technology, developing and using new energy saving and emission reduction Instrumentations and invisible factors in the design process of thermal process automation are analyzed in the paper.

**Key words:** thermal power plant; thermal process automation; energy saving and emission reduction

外,与 FM458 相配合的是 DEH 专用控制接口模块 ADDFEM,该模块不同于传统输入输出模块,它包含了 16 个 DI 通道、12 个 AI 通道、3 个 PI 通道、12 个 DO 通道以及 8 个 AO 通道。模拟量输出信号可直接驱动伺服阀,具有完善的自诊断功能、传感器断线监测功能、在线插拔功能。

(3) 系统通信。工业以太网通信协议,用于 AS417H 控制器、工程师站、操作员站总线间的通信,速度可达 100 Mb/s。PROFIBUS-DP 通信协议用于 AS417H 控制器与 ET200M 及 FM458 与 ADDFEM 接口间的通信,速度可达 12 Mb/s。

## 2 自启动控制步骤及 X 准则和 Z 准则

围绕自启动控制策略有两个核心问题,一个是执行自启动每一步骤的判断条件是什么,另一个是根据当前工况如何既安全又高效的执行自启动步骤。前者是实现控制的基础,系统将通过 X 准则、Z 准则来监视,判断各热力参数是否满足工况或应力的要求,从而决定是否进行下一步骤。

### 2.1 自启动步骤

从汽机盘车到并网带负荷,自启动步骤共经历 35 步,其中逻辑设计较为复杂,下面简要列出其步骤要领。

(1) 汽机本体及辅助系统进行自检,检查各个设备、阀门状态是否正常;并将各相关设备投入联锁,以备自启动控制;

(2) 自启动油系统,打开汽机各疏水阀,开始进行暖管、暖阀;

(3) 暖管一定程度使得满足  $X_2$  准则、 $Z_3$  准则、 $Z_4$  准则后,打开主汽门,继续暖管、暖阀;

(4) 暖管、暖阀充分并满足  $X_4$  准则、 $X_5$  准则、 $X_6$  准则后,由运行人员进行了蒸汽品质确认,开始冲转汽机至 600 r/m 暖机转速,进行低速暖机;

(5) 增加汽机高压缸的暖机程度,在满足相应条件和  $X_7$  准则后,还是由运行人员进行升速确认,将汽机冲转至额定转速;

(6) 逐渐关闭部分疏水阀,进一步暖机,满足  $X_8$  准则后,发电机并网,机组带初负荷。

### 2.2 X 准则和 Z 准则

汽轮机从盘车状态到并网带负荷状态这一过程中,汽机缸温、转子温度、蒸汽参数以及相应的传热量都在不断变化中,为了限制汽轮机的热应力,汽轮机应力估算器 TSE 使用可调整的温度准则——X 准则判断机组是否能够接受运行方式的改变,并将判断后的结果作为允许条件送到上述汽轮机自启动顺控步骤中。

#### 2.2.1 Z 准则

Z 准则的目的主要是保证主蒸汽和再热蒸汽具有一定的过热度,在开启高压主汽门之前加以判断,防止因高压调门不严,导致有湿蒸汽进入到汽轮机中,损伤设备。

$Z_3$  准则为

$$T_{MS} > T_{SatMS} + Z_3 \quad (1)$$

式中: $T_{MS}$  为高压旁路阀前的主蒸汽温度; $T_{SatMS}$  为主蒸汽的饱和温度,由当前主蒸汽压力计算得到; $Z_3$  为过热度定值,一般设置为 10 K。

$Z_4$  准则为

$$T_{RHS} > T_{SatRHS} + Z_4 \quad (2)$$

式中: $T_{RHS}$  为中压主汽阀前的再热器温度; $T_{SatRHS}$  为再热器的饱和温度,由当前再热器压力计算得到; $Z_4$  为过热度定值,一般设置为 10 K。

#### 2.2.2 $X_2$ 准则

$X_2$  准则也是在开启高压主汽门前加以判断,目的是为了防止高压调门阀体承受过大的热应力。在冷态启动时,汽机高调门的阀体温度低于主蒸汽的饱和温度。当打开主汽门后,蒸汽与调门直接接触,以凝结换热的方式向调门阀体传递热量。由于凝结换热的放热系数很大,剧烈的换热将使阀体的温度很快上升到蒸汽的饱和温度。如果阀体内部温度过低,就会在阀体内部产生很大的热应力,所以要求主蒸汽的饱和温度不能过高于高调门阀体内部温度。

$X_2$  准则为

$$T_{SatMS} < T_{HCV50\%} + 1.3 X_2 \quad (3)$$

式中: $T_{SatMS}$  为主蒸汽的饱和温度; $T_{HCV50\%}$  为高调门阀体 50% 深度处的温度,可近似看作平均温度; $X_2$  为高调门所允许的上升温度裕度,与高调门阀体温度的函数关系见表 1。

表 1  $X_2$  与  $T_{HCV50\%}$  的函数关系

$T_{HCV50\%}$	0	50	248	600
$X_2$	180	180	52	52

#### 2.2.3 $X_4$ 准则

$X_4$  准则在开启调门进行冲转前加以判断,目的是保证一个适当的主蒸汽过热度,在汽轮机带负荷时防止高压缸末级叶片处蒸汽存在较大湿度。蒸汽对金属的放热系数与蒸汽的状态有很大的关系,湿蒸汽的放热系数较大,过热蒸汽的放热系数较小。汽轮机冷态启动时,为了避免在金属部件内产生过大的温差,要采用微过热蒸汽冲动转子,所以要求主蒸汽温度具备合适的过热度。 $X_4$  准则为

$$T_{MS} > T_{SatMS} + X_4 \quad (4)$$

式中: $T_{MS}$  为高压主汽门前的主蒸汽温度; $T_{SatMS}$  为主蒸汽的饱和温度,由当前主汽门前主蒸汽压力计算得到; $X_4$  为过热度限值,与主蒸汽的饱和温度的函

数关系见表 2。

表 2  $X_4$  与  $T_{\text{SatMS}}$  的函数关系

$T_{\text{SatMS}}$	0	100	380
$X_4$	120	20	50

#### 2.2.4 $X_5$ 准则

$X_5$  准则也是在开启调门进行冲转前加以判断,目的是保证冲转时主蒸汽温度高于汽轮机高压缸缸体和转子的温度,避免高压缸和高压缸转子的冷却。但在缸体或转子温度很高,大于  $560\text{ }^\circ\text{C}$  时,允许主蒸汽温度略低一些。 $X_5$  准则为

$$T_{\text{MS}} > \max(T_{\text{HPC}}, T_{\text{HPS}}) + X_5 \quad (5)$$

式中: $T_{\text{MS}}$  为高压主汽门前的主蒸汽温度; $\max(T_{\text{HPC}}, T_{\text{HPS}})$  为高压缸缸体 50% 壁厚处温度和高压缸转子平均温度的较大值; $X_5$  为温差限值,与  $\max(T_{\text{HPC}}, T_{\text{HPS}})$  的函数关系见表 3。

表 3  $X_5$  与  $\max(T_{\text{HPC}}, T_{\text{HPS}})$  的函数关系

$\max(T_{\text{HPC}}, T_{\text{HPS}})$	0	560	600
$X_5$	100	0	-40

#### 2.2.5 $X_6$ 准则

$X_6$  准则类似于  $X_5$  准则,只是针对中压缸而言,目的是避免汽轮机中压缸转子的冷却。 $X_6$  准则为

$$T_{\text{RHS}} > T_{\text{IPS}} + X_6 \quad (6)$$

式中: $T_{\text{RHS}}$  为中压主汽阀前的再热器温度; $T_{\text{IPS}}$  为中压缸转子平均温度; $X_6$  为温差限值,与  $T_{\text{IPS}}$  的函数关系见表 4。

表 4  $X_6$  与  $T_{\text{IPS}}$  的函数关系

$T_{\text{IPS}}$	0	560	600
$X_6$	50	0	-40

#### 2.2.6 $X_{7a}$ 准则

$X_{7a}$  准则是在低速暖机后准备冲转至额定转速时检查的准则。其目的检验高压缸转子的暖机度,由于汽轮机是直接从  $600\text{ r/min}$  升速至  $3\ 000\text{ r/min}$ ,中间不停顿,为防止在冲转过程中因为转子内外加热不均,所产生的内外温差造成应力超限,发生设备损坏或缩短使用寿命,必须在冲转之前检查高压缸转子暖机是否充分。 $X_{7a}$  准则为

$$T_{\text{MS}} < T_{\text{HPS}} + X_{7a} + 1.4 \times dT_{\text{perm-up-HPS}} \quad (7)$$

式中: $T_{\text{MS}}$  为高压主汽门前的主蒸汽温度; $T_{\text{HPS}}$  为高压缸转子平均温度; $dT_{\text{perm-up-HPS}}$  为高压缸转子的升速裕度; $X_{7a}$  为温差限值,与  $T_{\text{HPS}}$  的函数关系见表 5。

表 5 温差限值  $X_{7a}$  与  $T_{\text{HPS}}$  的函数关系

$T_{\text{HPS}}$	0	650	999.9
$X_{7a}$	117	8	0

#### 2.2.7 $X_{7b}$ 准则

$X_{7b}$  准则与  $X_{7a}$  准则类似,同样是检验汽轮机在低速暖机时,高压缸缸体的暖机度,保证高压缸各个部件得到充分的预热,避免在升速至额定转速过程中,高压缸缸体热应力超限。 $X_{7b}$  准则为

$$T_{\text{MS}} < T_{\text{HPC}} + X_{7b} + 2.2 \times dT_{\text{perm-up-HPC}} \quad (8)$$

式中: $T_{\text{MS}}$  为高压主汽门前的主蒸汽温度; $T_{\text{HPC}}$  为高压缸缸体平均温度; $dT_{\text{perm-up-HPC}}$  为高压缸的升速裕度; $X_{7b}$  为温差限值,与  $T_{\text{HPC}}$  的函数关系见表 6。

表 6  $X_{7b}$  与  $T_{\text{HPC}}$  的函数关系

$T_{\text{HPC}}$	0	650	999.9
$X_{7b}$	117	8	0

#### 2.2.8 $X_8$ 准则

$X_8$  准则是在汽轮机到达额定转速后发电机并网前进行检查的准则。其目的是保证中压缸转子具有合适的暖机度,这是因为在机组并网之前,中压调门开度很小,中压缸蒸汽流量相对于高压缸流量非常有限,虽然高压缸各部件暖机已经充分,但是中压缸却不一定得到充分预热。一旦机组并网带上负荷后,中压调门开度将逐步开大,中压缸蒸汽流量将大幅增加,若前期预热不够,中压转子将会因为内外温差过大造成应力超限,损伤设备。 $X_8$  准则就是鉴于此原因而产生的:

$$T_{\text{RHS}} < T_{\text{IPS}} + X_8 \quad (8)$$

式中: $T_{\text{RHS}}$  为中压主汽门前的再热蒸汽温度; $T_{\text{IPS}}$  为中压缸转子平均温度; $X_8$  为温差限值,且  $X_8 = 2.3 \times dT_{\text{perm-up-HPS}}$ ,其中  $dT_{\text{perm-up-HPS}}$  为中压缸转子的升速裕度。

### 3 汽轮机热应力监控及控制裕度

汽机自启动过程中如何做到既安全平稳地运行机组,又能及时快速地响应用户的需求,发挥机组最大的性能,是一个关键性的问题。在保证设备热应力较小、不超限的前提下,快速改变机组的运行工况,这种变化速度的能力,称之为控制裕度。显然,控制裕度是由当前设备的热应力所决定的,如何准确地表征和计算热应力则是控制机组运行的重要前提。

#### 3.1 应力监视及应力计算

汽轮机的启动过程中,随着高参数的蒸汽涌入汽缸,蒸汽不断给汽缸和转子加热,这时汽缸的内壁温度高于外壁温度,内壁的热膨胀由于受到外壁的约束而受到压缩,产生压缩热应力;外壁则由于受内壁膨胀的拉伸,产生拉伸热应力。同样,此时转子外表面和中心存在温差,温度高的外表面受到压缩热应力的作用,而中心则受到拉伸热应力的影响。机组在停机过程中,汽机各部件则是一个冷却过程,各个部位所受到的应力与启动时正好相反。这些热应



力都是不可避免的,但是如何将热应力控制在设备可以承受的范围之内却是我们关心的问题。西门子独有的汽轮机应力估算器——TSE 模块从温差的角度出发,监视并计算应力。

由热弹性理论可知,部件的热应力与金属部件内部的温度梯度成正比,故可采用部件的表面温度和平均温度的差值来表征热应力的大小。如图 1 所示,选取设备关键部件,采用热电偶测量其与蒸汽接触的表面的温度和 50% 深度壁厚处的温度,计算两者之间的温差,以温差表征热应力。通过预先设置各部件的最大允许温差,将计算后的温差与其进行比较,来决定是否应力超限。因此,应力监视最终通过测量温差得以实现。

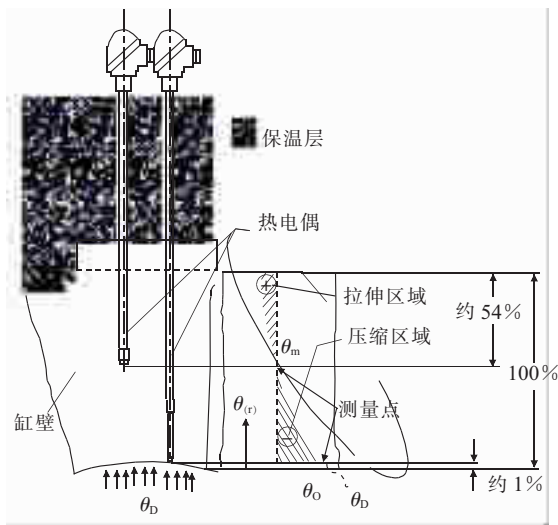


图 1 应力监测示意

50% 深度壁厚处的温度  $T_m$  可看作该部件的平均温度,那么最大允许温差(包含允许上限和允许下限)则是  $T_m$  的函数,部件表面温度与  $T_m$  的差值与允许温差进行比较即可得到机组运行的温度裕量。其关系如下:

$$\begin{cases} dT = T_1 - T_m \\ ddT_{up} = dT_{perm-up} - dT \\ ddT_{dn} = dT_{perm-dn} + dT \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $ddT_{up}$  为上升温度裕量;  $dT_{perm-up}$  为温差允许上限;  $ddT_{dn}$  为下降温度裕量;  $dT_{perm-dn}$  为温差允许下限。

### 3.2 汽轮机自启动控制裕度

在尽快改变汽轮机负荷的同时,将各部件应力控制在允许范围内,选取汽轮机热应力比较集中的 5 个关键部位:高压主汽门阀体、高压调门阀体、高压缸缸体、高压缸转子、中压缸转子为应力监视对象,实时采集数据并进行比较,将最小的上升和下降温度裕量作为此时汽轮机的上升和下降温度裕量。据此再从透平应力评估 WTG 中产生出负荷上升控制裕度 WTO 和负荷下降控制裕度 WTU,并将其与系统设定的最大允许裕度 FBMAX 相比,分别得出相应的比值。该比值可看作机组负荷变化的控制裕度,它随机组运行状态、应力情况的改变而改变,一旦上升或下降裕度为零,则停止该方向的负荷变化。将此比值与固定的转速设定值梯度 NSVG 相乘即得到转速设定值的变化速率;与固定的负荷设定值梯度 PSVG 相乘即得到负荷设定值的变化速率,由此来控制机组的负荷升降的快慢,保证机组的安全运行。

### 4 结束语

西门子 660 MW 超超临界汽轮机自启动控制系统很好的解决了启动过程中应力估算和应力控制的问题。采用了 X 准则、Z 准则和控制裕度等概念,在应力合适的前提下,大大提高了机组的启动速度,系统自我决策,减轻了运行人员的负担并降低了机组启动的风险,值得国内同类型机组的学习和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 张保衡. 大容量火电机组寿命管理与调峰运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] 黎明, 杨继明, 白云. 汽轮机转子的应力分析[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(3): 191-193.
- [3] 王宏光, 戴韧, 刘岩, 等. 超临界汽轮机阀壳的温度场和应力场计算分析[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(1): 75-78.

#### 作者简介:

钱庆生(1978-), 男, 安徽安庆人, 工程师, 从事火电厂热工控制系统的调试和优化等工作;

洪超(1981-), 男, 江西景德镇人, 工程师, 从事实验教学工作。

## Thermal Stress Calculation and Overall Self-startup Control Strategy of 660 MW Ultra-supercritical Steam Turbines

QIAN Qing-sheng<sup>1</sup>, HONG Chao<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

**Abstract:** Taking No.3 unit in Wangting Power Plant as an example, the overall self-startup control strategy of 660 MW ultra-supercritical steam turbines introduced from Siemens by STC is introduced in the paper. The self-startup controlling step of DEH as well as X-criteria, Y-criteria and calculation of control margin is described in detail. It can provide a reference for self-startup control design of same type units at home.

**Key words:** 660 MW ultra-supercritical steam turbine; self-startup control; X-criteria; Y-criteria; margin