

600 MW 机组甩负荷试验分析

李生泉¹, 黄润泽², 左世春³, 张 丽³

(1. 哈尔滨电站工程有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 辽宁电力科学研究所,
辽宁 沈阳 110006; 3. 哈尔滨第三发电厂, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘 要: 对 600 MW 机组甩负荷试验进行分析, 并结合 DEH 的逻辑控制功能, 阐明了国产引进型 600 MW 机组影响调节系统转速控制和运行安全性的主要因素及相应关系, 证实该机组的调节系统动态特性优良。

关 键 词: 600 MW 机组; 甩负荷; DEH 系统

中图分类号: TM621 文献标识码: A

1 国产化 600 MW 汽轮发电机组

哈尔滨第三电厂 4 号机组汽轮机为 N600-16.7/537/537-I 型机组。型式为亚临界、一次中间再热、单轴、四缸、四排汽、双背压凝汽式机组, 单机容量 600 MW。发电机及励磁机采用无刷励磁, 冷却方式为水-氢-氢。机组控制系统选用 Baily Infi-90 分散控制系统(DCS); 汽轮机调节系统采用 DEH-III 型控制系统, 系统具备 103%(OPC)和 110%电气超速保护功能, 在甩负荷工况下, 整体控制更加安全可靠。机组旁路系统采用两级高低压电动旁路, 容量为 30%MCR, 快开、快关时间为 3.8 s。机组具有八段回热抽汽系统, 即三台高加、四台低加、一台除氧器。

2 甩负荷试验的目的、难点及针对性措施

本次甩负荷试验的主要目的是考核机组调节系统的动态特性及调节品质、伺服系统的动作速度及相关辅助设备的性能, 其被考核对象的关键因素应该包括以下几点: 汽轮机调节系统的模拟量(PID)控制; 关于转速的开关量控制(103%超速保护即 OPC 保护)和其它超前保护, 如发电机主开关动作、电汽功率不平衡和转速变化率等。

在机组甩 100%额定负荷后, 在高、中压调节汽门及各段抽汽逆止门全关之前, 各段抽汽及各加热

器汽侧压力突降造成疏水汽化等蒸汽返回汽轮机做功, 容易引起机组超速, 造成机组设备重大事故。对机组安全运行来说, 最关键的是确保机组最大飞升转速低于危急保安器动作值, 这也是机组调节系统动态特性的主要方面。试验前我们对 600 MW 机组的甩负荷试验进行了分析研究, 制定了详尽的试验技术措施, 并进行了相关的准备试验、仿真模拟及事故预想。

3 50%甩负荷试验情况

1999 年 12 月 26 日 14:36 进行了 50%甩负荷试验。试验前机组转速为 3 006 r/min; 机组从 305 MW 甩负荷到零, 机组运行一切正常, 转速由 DEH 自动控制。

以发电机主开关断开时刻为零点, 甩负荷后机组转速从 3 006 r/min 经过 1.76 s 升到第一峰值 3 066 r/min, 经 4.76 s 后转速二次飞升至 3 119 r/min, 转速飞升滞后时间为 0.22 s。高、中压调节汽门延时 0.08 s 开始关闭, 经过 0.27 s 高压调门全关, 经过 0.34 s 中压调门全关, 此时机组转速飞升至 3 039 r/min, 经过 2 min 后机组转速稳定在 2 997 r/min 运行, 在此期间转速由 DEH 调节, OPC 保护共计动作六次, 最低转速为 2 997 r/min。机组甩负荷后, 高压缸通风阀自动开启, 高、低压旁路系统动作正常, 在 4 s 内高低压旁路快开, 然后进入正常调节状态, 主汽、再热汽压力稳定, 高、低旁喷水调节正常, 汽机调节级压力与高压缸排汽压力比值最小为 1.12, 高压缸排汽温度最高为 340.2 °C。50%的甩负荷试验记录曲线略。

4 100%甩负荷试验

1999 年 12 月 26 日 22:39 进行了 100%甩负荷

试验。试验前机组转速为 3 005 r/min; 机组从 602 MW 甩负荷到零, 机组运行一切正常, 转速由 DEH 自动控制。

以发电机主开关断开时刻为零点, 甩负荷后机组转速从 3 005 r/min 经过 1.80 s 升到最大值 3 136 r/min, 净飞升转速为 131 r/min, 转速飞升滞后时间为 0.20 s。高、中压调节汽门延时 0.08 s 开始关闭, 经过 0.28 s 高压调门全关, 经过 0.34 s 中压调门全关, 此时机组转速飞升至 3 052 r/min, 即汽门关闭后飞升转速 Δn_v 为 84 r/min。经过 3 min 后机组转速稳定在 2 998 r/min 运行。在此期间转速由 DEH 调节, OPC 保护动作 8 次, 最低转速为 2 995 r/min。机组甩负荷后, 高压缸通风阀自动开启, 高、低压旁路系统动作正常, 在 4 s 内高低压旁路快开, 然后进入正常调节状态, 主汽、再热汽压力稳定, 高、低旁喷水调节正常, 高、低旁后汽温控制在要求范围内, 高、低旁管路没有出现振动现象, 汽机调节级压力与高压缸排汽压力比值小于 1.03, 高压缸排汽温度快速升高, 最高为 397.8 °C, 经过 2 min 左右的运行, 最后稳定在 360.9 °C。100%甩负荷试验记录曲线略。

5 试验数据计算及分析

试验记录转速飞升曲线放大图如图 1 所示, 曲线时间坐标零点为发电机主开关断开时刻, 按照转速初始速率到最高飞升转速的时间约为 0.43 s, 即 $\Delta t = 0.43$ s。根据试验中记录下来的数据, 可计算出其参数。

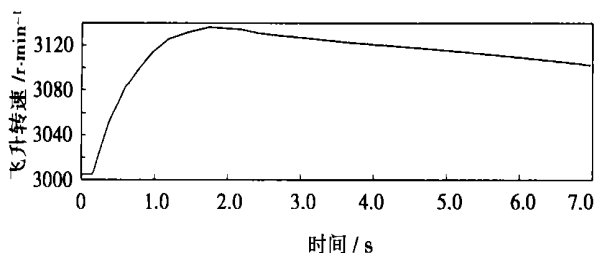


图 1 100% 甩负荷试验转速飞升曲线

5.1 动态超调量 φ

$$\begin{aligned} \varphi &= (n_{\max} - n_0) / n_0 \times 100\% \\ &= (3\ 136 - 3\ 005) / 3\ 005 \times 100\% = 4.36\% \end{aligned}$$

5.2 转速不等率 δ

调节系统为 DEH—III A 型数字电液调节系统, 转速调节为无差调节, 即相当于同步器自动返回, 甩

负荷后转速目标值自动设置为 3 000 r/min, 系统最终稳定在 3 000 r/min 空转, 因此不能通过稳定转速计算不等率, 根据 DEH 控制系统内部逻辑, 不等率 δ 为 4.5%。

5.3 转子加速度 a

$$\begin{aligned} a &= \Delta n_t / \Delta t = (n_{\max} - n_0) / \Delta t \\ &= (3\ 136 - 3\ 005) / 0.43 = 304.65 \text{ r} / (\text{min} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

5.4 转子角加速度 a_ω

$$\begin{aligned} a_\omega &= a / 60 \times 2 \times 3.1416 \\ &= 304.65 / 60 \times 2 \times 3.1416 = 31.90 \text{ rad} / \text{s}^2 \end{aligned}$$

5.5 转子时间常数 T_a

$$T_a = n_0 / a = 3\ 005 / 304.65 = 9.86 \text{ s}$$

5.6 转子转动惯量 J

$$\begin{aligned} J &= 900P / (n_0 a \pi^2 \eta) \\ &= (900 \times 602 \times 10^6) / (3\ 005 \times 304.65 \times \\ &\quad 3.14^2 \times 0.9885) \\ &= 60\ 662.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

式中: P 为甩负荷值, 即 602 MW; η 为发电机在 602 MW 时的效率。

5.7 容积时间常数 T_v

$$T_v = \Delta n_v / a = (3\ 136 - 3\ 052) / 304.65 = 0.28 \text{ s}$$

式中: Δn_v 为最高飞升转速 n_{\max} 与调节汽门全关时刻转速值之差, 根据试验数据, 调节汽门全关时刻转速值为 3 052 r/min, Δn_v 为 84 r/min。

5.8 稳定时间

稳定时间的评定标准为转速变化量 $\Delta n < (\delta n_0 / 20)$ 时所经历的时间, 式中取 $\delta = 4.5\%$, $n_0 = 3\ 005$ r/min, 则 $\Delta n = 6.76$ r/min; 根据试验数据, 稳定时间为 3 min。

6 试验过程中出现的问题及分析

6.1 汽机高压缸排汽温度较高

在两次试验过程中, 尤其是 100% 甩负荷试验时, 出现的主要问题是汽机高压缸排汽温度较高, 最高达到 397.8 °C。设计自动跳闸排汽温度为 427 °C。造成汽机高压缸排汽温度较高的原因是机组甩负荷后, 高压缸进汽量很小, 虽然高压缸通风阀自动开启, 但汽机调节级压力与高压缸排汽压力比值最低时为 1.0 左右, 高压缸闷缸, 处于鼓风状态, 造成高压缸排汽温度迅速升高。在该型机组原设计中, 除

3号 and 4号高压调节汽门后导气管上装有两个通风阀外,高压缸排汽逆止门前设有一内径较大的通风阀及相应的减温水调节阀,排汽至凝汽器,用于机组甩负荷后高压缸抽真空;但此通风阀系统及减温水阀在4号机组设计中被取消,这也是造成高压缸排汽温度较高的原因之一。

6.2 关于甩负荷预测功能(LDA)

在该机组 DEH 控制系统的逻辑中,当机组负荷高于 30% 额定负荷时,若发电机主开关突然断开,即发生甩负荷时,将直接触发 OPC, 关闭所有高、中压调节汽门、各段抽汽逆止门,快开高、低压旁路,此时转子转速可能还没有达到额定转速的 103%,即 OPC 正常情况下的动作值,该控制功能称之为甩负荷预测功能(LDA)。此功能直接而有效地防止了甩负荷造成的汽轮机转子超速。在 50% 甩负荷试验中,甩负荷后转速第一峰值仅为 3 066 r/min。在 100% 甩负荷试验中,由于系统蒸汽容积较大,甩负荷后转速飞升第一峰值达到了 3 136 r/min。

6.3 转速存在二次飞升的现象

在机组 50% 甩负荷试验时,出现了转速二次飞升的现象。经分析是由于机组甩负荷后高、中压调节汽门关闭,当转速下降后,中压调节汽门重新开启,由于在甩负荷初期再热蒸汽压力较高,因而出现转速二次飞升的现象。随着旁路系统的调节再热蒸汽压力逐渐降低,转速逐渐趋于稳定。

在该型机组 DEH 的设计控制方式中,较为成熟稳定的是高中压缸联合启动方式,即机组冲转及正常运行时,中压调门 IV 均全开不参与调节,仅用高压主汽门(TV)控制冲转,升至 2 900 r/min 阀切换后由高压调节汽门(GV)控制转速或负荷。此时 DEH 内部设为“旁路切除(Bypass Off)”控制方式,旁路控制可投入自动或手动,但仅具有保护功能,不参与机组调节。此运行方式最大的弊端就是当甩负荷之后,再热器因高旁打开,压力不能再很短的时间内降到较低的范围,此时一旦转速下降,OPC 复位,则中压调节汽门(IV)全开,不具有调节功能,只是两位的全开全关,造成转速二次飞升,OPC 反复动作,造成转速摆动的现象。此现象持续到再热器压力降到能够维持汽机转速不超过 103%,不再上升为止。按该试验记录曲线,再热蒸汽压力要降到 0.3 MPa 以下能够维持汽机在 3 000 r/min 不再上升。此问题较好的解决方式是通过上述的甩负荷预测功能(LDA)发出信号,将“旁路切除(Bypass Off)”控制方

式切换为“旁路投入(Bypass On)”控制方式,即中压缸启动方式,使 IV 能够参与转速调节。

6.4 关于转子加速度及转动惯量的计算

由于甩负荷预测功能(LDA)使机组甩负荷后高、中压调节汽门快速关闭,影响机组转速的飞升,加之当转速飞升超过 3 090 r/min 时 OPC 保护动作,高、中压调节汽门迅速关闭,因而计算的转子加速度和转子转动惯量并不是非常准确的,比实际值偏小。

6.5 有关试验参数计算的问题

由于机组为纯电液调节方式,存在 OPC 及 LDA 控制功能,机组在甩负荷工况下相对较为安全;与此同时,原试验意图中的关于不等率、动静差比等参数已失去意义,而动态超调量、转子转动惯量、容积时间常数等数据的监测意义也有所减小;相应的关于甩负荷试验的目的,其重心更多的是转向对相关系统的考验上。

7 结 论

试验结果证明,哈尔滨第三发电厂 4 号引进型国产化 600 MW 机组 50%、100% 甩负荷试验是成功的,汽机调节系统动态特性优良,调节品质良好,完全能够适应机组甩负荷工况的要求,试验达到了预期的目的:

- (1) 机组甩负荷后,汽机 DEH 转速自动控制良好,没有引起超速跳闸,各辅助设备运行正常。
- (2) 锅炉不灭火,燃烧稳定,各主要参数变动值不超标。
- (3) 旁路系统自动控制正常,主汽、再热汽参数控制在要求范围内。

通过对该机组进行的甩负荷试验,我们初步掌握了国产引进型 600 MW 机组调节系统的甩负荷工况的动态特性,对 DEH 系统的控制功能及相关制约条件有了更深的认识。

参考文献:

- [1] 赵文波,黄润泽. 铁岭发电厂 4 号机组(300MW)甩负荷试验报告[R]. 沈阳:东北电力科学研究院,1997.
- [2] 黄润泽,王文杰. 华能丹东电厂 350MW 机组 1 号、2 号机甩负荷试验报告[R]. 沈阳:东北电力科学研究院,1999.
- [3] KIRKBY F. Modern power station practice[R]. U K: Oxford Pergamon Press, 1990.

(渠 源 编辑)

words: marine gas turbine, primary surface recuperator, small channel, flow and heat transfer, design calculation

近零冲角下环型压气机叶栅的弯曲叶片表面静压的研究=A Study of the Surface Static Pressure of Curved Blades in Annular Compressor Cascades at Near-zero Incidence [刊, 汉] / WANG Dong (School of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), SU Jie-xian, ZHONG Jing-jun, WANG Zhong-qi (School of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 369 ~ 371

On an annular diffusion-cascade experimental wind tunnel detailed measurements of traditional straight, positive leaned, positively curved and S-type blades of annular axial flow compressor cascades were carried out under an inlet flow field distortion at near-zero incidence. The impact of different curved blades on the distribution of surface static pressure is analyzed. The results of the analysis indicate that the use of the positive leaned, positive curved and S-type blades can lead to an increase in blade root static pressure and a reduction in the accumulation of low-energy fluid at the hub region. This will result in a considerable improvement of the flow field configuration and a lessening of gas flow separation and blockage at the hub region, thus enhancing diffusion capability and decreasing the end-wall loss at the hub region. **Key**

words: curved blade, annular diffusion cascade, blade surface static pressure

材料硬度值下降对汽轮机转子寿命消耗计算的影响= The Impact of Material Hardness Values on the Service Life Calculation of Steam Turbine Rotors [刊, 汉] / YANG Ji-min, LU Xu-shang (Power Engineering Department, Changsha Electric Power Institute, Changsha, China, Post Code: 410077), CHEN Yu-lin (Chentang Thermal Power Generation Co. Ltd., Tianjin, China, Post Code: 300221), YUAN Rui (Henan Electric Power Exploration Design Institute, Zhengzhou, China, Post Code: 450007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 372 ~ 374

Through an investigation of the hardness values of high-temperature metallic materials it is found that the reduction in hardness values may have a relatively great impact on the low-cycle fatigue life and high-temperature creep life of steam turbine rotors. The consideration of this factor of hardness value variation will ensure a better evaluation of the service life of steam turbines. **Key words:** hardness value, service life consumption, low-cycle fatigue, high-temperature creep

600 MW 机组甩负荷试验分析= Load-rejection Test Analysis of a Chinese-made Imported Technology-based 600MW Turbogenerator Set [刊, 汉] / LI Sheng-quan (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China Post Code: 150040), HUANG Run-ze (Liaoning Electric Power Science Academy, Shenyang, China, Post Code: 110006), ZUO Shi-chun, ZHANG Li (Harbin No. 3 Power Plant, Harbin, China, Post Code: 150025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 375 ~ 377

The load-rejection test of a Chinese-made imported technology-based 600MW power plant is analyzed in conjunction with the logic control function of a digital electro-hydraulic system. The authors expound the major factors that affect both the speed control of the turbine governing system and the operation safety of the 600MW unit. The dynamic characteristics of the governing system have been proved to be excellent. **Key words:** 600MW power plant, load rejection, digital electro-hydraulic system

循环流化床内颗粒运动的PIV测试=PIV (Particle Image Velocimetry) Measurements of Particle Movement in a Circulating Fluidized Bed [刊, 汉] / WANG Qin-hui, ZHAO Xiao-dong, SHI Hui-xian (Education Ministry Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Sources and Environmental Engineering under the Zhejiang University,