

石板水电站混流式水轮机装置甩负荷 过渡过程的现场试验研究

彭敬 张健 崔学铭 寿梅华 常近时

(中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要 石板水电站原设计安装 3 台总功率 $3 \times 33\text{MW}$ 的水轮机组,但实际上安装了总功率为 $3 \times 35\text{MW} + 1 \times 10\text{MW}$ 的 4 台水轮机组,因此实际的装置流量增大,过渡过程暂态参数变坏。考虑这种情况,分别在功率为 35MW 和 10MW 的 2 台水轮机上做了甩负荷过渡过程现场试验,获取了重要的暂态特性。为改善机组过渡过程动态品质,电厂应采用分段母线运行方式,以避免全电厂甩负荷,并且要对调速器进行改造,实现 2 段关闭。通过计算机模拟得到调节参数优化结果:对于小机 $T_{s1} = 3\text{ s}$, $T_{s2} = 2.8\text{ s}$, $T_g = 2.3\text{ s}$; 对于大机 $T_{s1} = 4\text{ s}$, $T_{s2} = 3.5\text{ s}$, $T_g = 3.1\text{ s}$ 。

关键词 水电站; 水轮机; 过渡过程; 暂态特性

中图分类号 TK 733.1

On-the-spot Research on Load-rejection Transient of the Francis Turbine Installation in the Shibaozhai Hydropower Plant

Peng Jing, Zhang Jian, Cui Xueming, Shou Meihua, Chang Jinsong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In the Shibaozhai hydropower plant there are projected 3 turbine unit with output $3 \times 33\text{MW}$, but in fact there are 4 turbine unit with output $3 \times 35\text{MW} + 1 \times 10\text{MW}$, therefore real installation discharge is increased and transient instantaneous parameters were deteriorated. On-the-spot test on the load-rejection transient of Francis turbines with output 35MW and output 10MW respectively were carried out and the improved transient instantaneous behavior was obtained. The Shibaozhai hydropower plant must utilize separation bus mode in order to avoid load-rejection of the full hydropower plant and to improve transient behavior. And the hydropower plant must rebuild regulators and realize two-partial closing of guide system. The control laws of guide system were optimized with the aid of computer for the small turbine unit: $T_{s1} = 3\text{ s}$, $T_{s2} = 2.8\text{ s}$, $T_g = 2.3\text{ s}$; for the large turbine unit: $T_{s1} = 4\text{ s}$, $T_{s2} = 3.5\text{ s}$, $T_g = 3.1\text{ s}$.

Key words hydropower plant; turbine; transient; instantaneous behavior

石板水电站位于重庆市涪陵地区丰都县境内,为引水式电站。水轮机前设蝶阀,进水口设闸门。电站装有 3 台 35MW 混流式水轮机和 1 台 10MW 混流式小型水轮机,总装机功率 115MW 。由于电站原设计装机功率为 $3 \times 33\text{MW}$,实际装机功率改变后,电站设计水头和引水系

收稿日期: 2001-12-25

常近时,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)196 信箱, 100083

统过流面积未变, 导致实际引用流量和流速增大, 使机组暂态过程的各项参数值变化, 给运行安全带来不利影响。为评价这些影响和寻求相应的安全措施, 进行了该电站大、小机组的过渡过程现场试验研究。

试验在 2001 年 3 月 31 日至 4 月 1 日进行, 获得了大、小机组甩负荷过渡过程动态特性的宝贵资料。

1 试验对象与基本参数

水电站最大水头为 229.2 m, 最小水头 181.6 m, 平均水头 208.2 m, 设计水头 200.0 m。

3 台 HLA 351-LJ-240 型水轮机组(大机)主要技术数据: 额定功率 $P_0 = 35\text{MW}$, 额定流量 $q_{v0} = 19.6\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 额定转速 $n_0 = 375\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 机组飞轮力矩 $GD^2 = 460\text{TM}^2$ 。1 台 HLA 179-LJ-140 型水轮机组(小机)主要技术数据: 额定功率 $P_0 = 10\text{MW}$, 额定流量 $q_{v0} = 5.9\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 额定转速 $n_0 = 600\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 飞轮力矩 $GD^2 = 47.4\text{TM}^2$ 。

压力管道主管直径 3.7 m, 长 353.7 m; 调压井为双室式。

2 试验程序

现场试验分别在大机(2[#]机)和小机(4[#]机)上进行, 每台机组以 25%, 50%, 75%, 100% 额定功率进行 4 次试验。

大机甩负荷功率为 100% P_0 时, 导叶控制规律为一段直线关闭, 接力器全行程为 196 mm, 全行程关闭时间为 7 s。

小机甩负荷功率为 100% P_0 时, 导叶控制规律为一段直线关闭, 接力器全行程为 203 mm, 全行程关闭时间为 6 s。

试验步骤如下:

1) 机组启动 并列, 记录水轮机空载开度 a_0 、蜗壳水压 p_1 、尾水管水压 p_2 、机组转速 n 、上下游水位 Z_1 和 Z_2 。

2) 带负荷至甩负荷功率值, 目测此初始工况功率值 P 、蜗壳水压 p_1 、尾水管水压 p_2 、导叶接力器开度 a_0 。

3) 待试验量测仪器均正常后, 下达甩负荷指令, 机组开始跳闸甩负荷, 示波器记录各动态工况参数的变化规律。示波器走纸与磁带记录器走带应在甩负荷指令下达之前 5~10 s 开始。

4) 检查机组甩负荷后是否异常, 检查示波曲线是否正常。如果一切正常, 便可进行下一次甩负荷试验。

3 试验设备

3.1 测量对象与测量方法^[1,2]

1) 水轮发电机功率值由双瓦特表测定, 由电厂观测功率表选择测点功率值。

2) 导水机构接力器静态开度值用接力器行程指示标尺测定, 人工读取数据。

3) 水轮机装置水头初始静态值由调压室水位与尾水位之差决定。

- 4) 接力器活塞的运动规律由WY系列位移变送器转换成电信号, 输入示波器记录。
- 5) 水轮机蜗壳进口静态水压由装在测压管上的压力表测定, 人工读取数据; 动态水压由压力传感器(BPR-2)转成电信号输入示波器记录。
- 6) 水轮机顶盖水压静态值由装在测压管上的压力表测定, 人工读取数据; 动态水压由压力传感器(BPR-2)自动测取数据。
- 7) 尾水管进口水压静态值由装在测压管上的压力表测定, 人工读取数据; 动态水压由压力传感器(BPR-12)自动测取数据。
- 8) 水轮机转速静态值由数字式转速测定仪测量, 转速的瞬态规律由磁电转换传感器经频率转换器测量, 输入示波器记录。
- 9) 调压室水位用电厂装设的水位计测量, 水位波动规律由投入式液位变送器测量, 均由人工读取数据。
- 10) 水电站上、下游水位用水位计测量, 人工读取数据。
- 11) 跳闸信号由仪表电压互感器输出。

3.2 测量仪器的标定

压力传感器的标定通过活塞压力计来完成, 位移传感器用钢板尺标定。

3.3 测量系统

测量系统方框图见图 1。对于大机与小机, 测量系统相同。

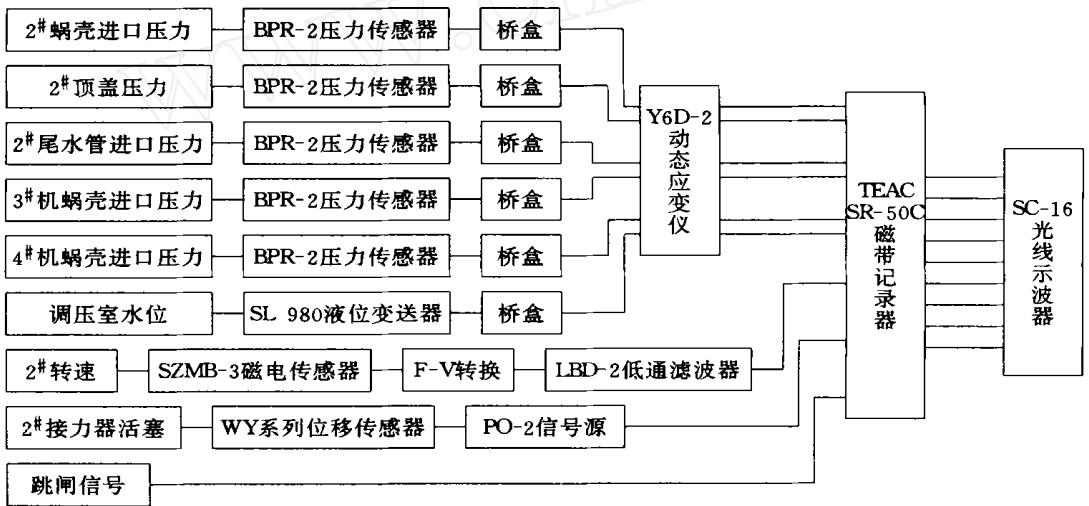
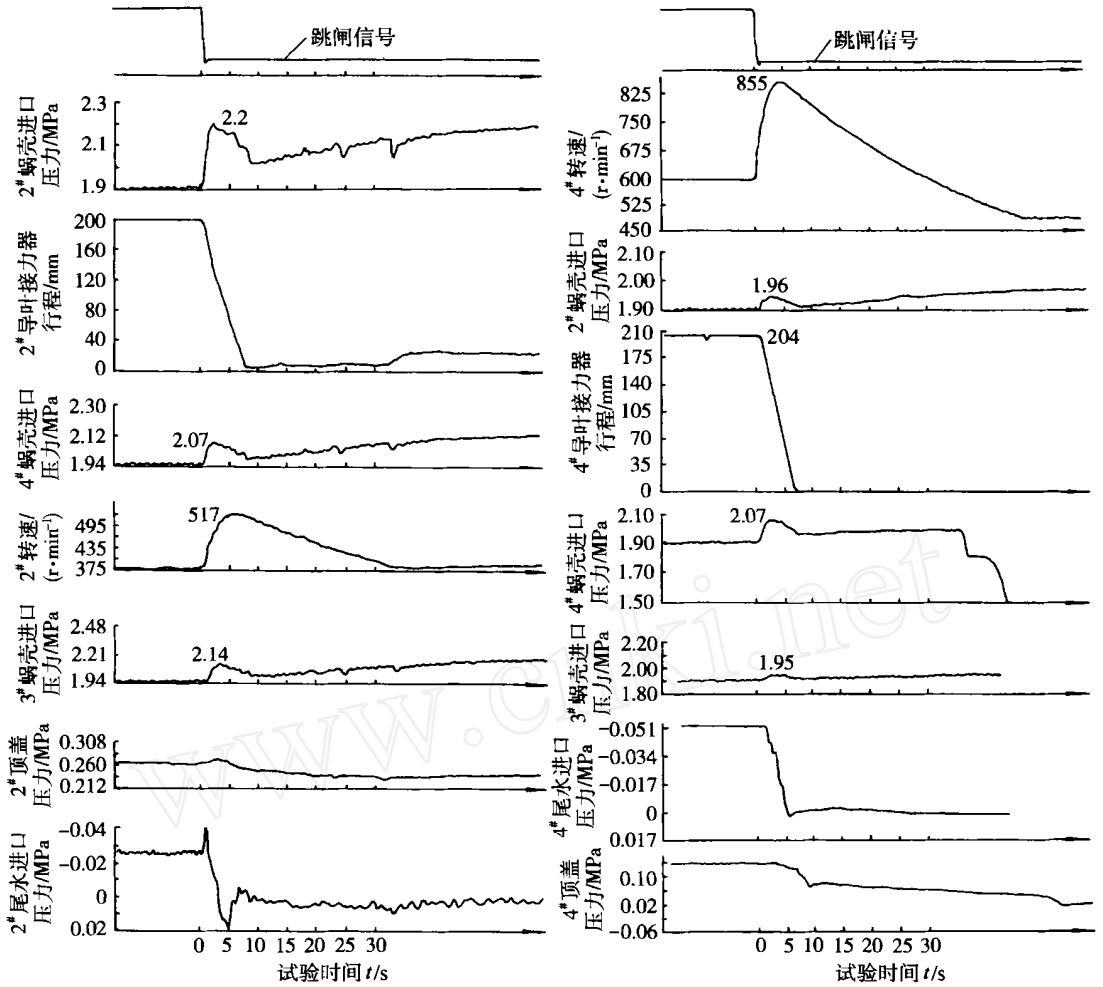


图1 测量系统方框图

4 试验结果

图 2 示出大、小机甩负荷功率为 100% P_0 时记录的诸动态工况参数的瞬变规律, 表 1 与表 2 分别列出大机与小机甩负荷试验结果。



(a) 大机 (b) 小机
图 2 甩负荷(100% P_0)过渡过程诸动态工况参数的瞬变规律

表 1 大机(2#机)甩负荷试验结果

试验次数	甩负荷功率/ MW	蜗壳进口水压 上升极值/%	转速上升 极值/%	机组逸速 时间 T_n/s	压力达到极值 时间 T_ξ/s
1	8.7	6.3	4.0	3.0	2.5
2	18.0	6.5	14.9	4.0	2.0
3	26.9	10.7	25.9	5.0	2.5
4	35.0	13.4	37.9	6.0	2.5

注: 1) 蜗壳进口压力传感器安装点高于蜗壳测点 2.0m; 2) 甩负荷功率为水轮机功率, 下表同; 3) 水轮机试验水头 198m, 下表同。

表2 小机(4#机)甩负荷试验结果

试验次数	甩负荷功率/ MW	蜗壳进口水压 上升极值/%	转速上升 极值/%	机组逸速 时间 T_n/s	压力达到极值 时间 T_ξ/s
1	2.57	4.7	5.2	2.0	1.5
2	5.08	4.7	14.5	2.5	1.0
3	7.61	5.8	22.5	3.0	1.0
4	10.66	8.9	42.5	4.5	2.0

注:蜗壳进口压力传感器安装点高于蜗壳测点 1.5m。

5 试验结果评价

1) 本次甩负荷现场试验获得了电站大、小机组甩负荷过渡过程重要的动态特性,更为难得的是在整个试验过程中未发生任何由于试验造成的设备损坏。

2) 本次试验采用了较先进的日本产便携式数据记录仪即磁带机,它具有 14 个通道,能同时记录 14 路信号而无相互干扰。相对光线示波器来说,磁带机性能更加稳定、精度更高,为后期数据处理带来许多方便,将其联接到 X-Y 函数记录仪上,便可客观、真实、清晰地绘制出试验中所得的各种动态参数的瞬变曲线。

6 试验结果分析

1) 从试验结果看,大机在甩负荷功率为 100% P_0 时,机组转速与蜗壳水压上升极值均未超过允许值,即满足调保安全性要求。小机甩负荷功率为 100% P_0 时,机组转速上升极值达 42.5%,致使蝶阀紧急关闭,但是蜗壳水压上升极值不大,这是由于小机转子转动惯量偏小造成的^[1,3]。

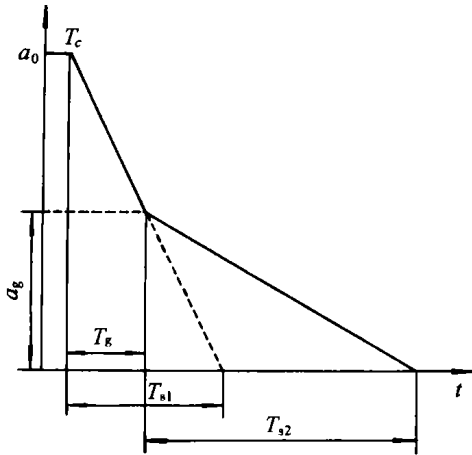
2) 当一台机组甩负荷时,其导叶迅速关闭,引起蜗壳水压上升,水击波传播到正常运行机组的蜗壳时,相应地引起水压力上升,导致该机组流量增大。由于该机联网运行,转速恒定,机组轴力矩增大,功率 $P = M\omega$ 也增大,即事故甩负荷丢弃的功率被分配到正常运行的机组上,由其负担一部分。这一过程是短暂的,随着引水管道末端水击波的迅速衰减,联网运行的机组功率又恢复到额定值。试验结果表明,这一水力干扰过程造成的压力、流量、功率的波动过程是稳定的,并且随时间迅速地衰减。

3) 由于本次试验是单机进行的,小机转速上升极值已超过允许值,大机则接近允许值,留下的安全裕量不多。如果考虑最坏情况,即 4 台机甩负荷功率同时达到 100% P_0 ,大、小机组的转速与压力上升极值将会有不同程度的增加,水轮机装置甩负荷过渡过程的动态品质变坏。要改善动态品质,一方面要尽可能采用分段母线运行,避免全电站甩负荷;另一方面,小机必须进行调速器改造,实现导叶的 2 段关闭;大机调速器也应进行改造,实现 2 段关闭。

4) 作者利用水轮机装置过渡过程基于内特性解析的特征线解法^[1],在计算机上模拟了导叶分段关闭(图 3, T_{s1} , T_{s2} 分别为第 1, 2 段关闭时间, T_g 为拐点时间, a_g 为拐点对应开度)的多组的过渡过程计算后,从中选取适用于大、小机的最合理的导叶 2 段控制规律。

对于石板水电站小机,优化的结果是: $T_{s1} = 3$ s, $T_{s2} = 2.8$ s, $T_g = 2.3$ s; 对于大机,优化的结果是: $T_{s1} = 4$ s, $T_{s2} = 3.5$ s, $T_g = 3.1$ s。有关理论分析计算的具体内容将在另文介绍。这 2 组

控制规律将供石板电站调速器改造时采用。



T_{s1}, T_{s2} —导叶第 1, 2 段关闭时间;

T_g —拐点时间; a_g —拐点对应开度

图 3 导叶合理的控制规律

参 考 文 献

- 1 常近时. 水力机械过渡过程 北京: 机械工业出版社, 1991. 140~ 148
- 2 常近时, 寿梅华, 于希哲. 水轮机运行 北京: 水利电力出版社, 1983. 314~ 330
- 3 克里夫琴科. 水电站动力装置中的过渡过程 常兆堂, 周文通, 吴培豪译 北京: 水利出版社, 1981. 215 ~ 260