

# 李溪电站(东站)水轮发电机组性能检测及评价

刘洪<sup>1</sup>, 刘申<sup>2</sup>, 夏甜<sup>1</sup>, 刘建文<sup>1</sup>, 张巍<sup>1</sup>, 余辰<sup>1</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东省水利重点科研基地, 广东 广州 510635;

2. 江西省湖口县水务局, 江西 湖口 332500)

**摘要:** 李溪电站(东站)装机容量为 750 kW, 水轮机型号为 ZD 760-LM-120 A, 发电机型号为 SF 250-20/1730。经过 26 a 的运行, 设备锈蚀磨损老化严重, 经过现场检测, 效率低下, 安全性差, 技术指标不能满足要求, 应进行更新改造。

**关键词:** 李溪电站; 水轮发电机组; 性能检测; 评价

**中图分类号:** TM312 **文献标识码:** B **文章编号:** 1008-0112(2017)08-0076-04

## 1 概述

李溪电站位于流溪河下游花都区花东镇李溪村, 是一宗以灌溉为主、结合发电、供水的综合利用水利工程。该工程由拦河坝、右岸进水闸及东、西 2 座水电站组成。拦河坝及进水闸于 1966 年 12 月动工, 1970 年 7 月完工, 工程规模为 II 等大(2)型工程, 主要建筑物为 2 级建筑物; 拦河坝全长为 276.5 m, 设有 36 个闸孔, 其中两侧东、西水电站进水孔 6 个, 中间 30 个泄水孔。

发电厂以河为界, 东站在 1995 年动工重建, 装机容量为  $250 \text{ kW} \times 3 = 750 \text{ kW}$ 。水轮机型号 ZD 760-LM-120A, 转速 300 r/min, 额定水头 4.74 m, 额定流量  $6.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。发电机型号 SF 250-20/1730, 额定功率为 250 kW, 额定电压为 0.4 kV, 额定电流为 451 A, 励磁电压为 56.3 V, 励磁电流为 199 A, 额定频率为 50 Hz, 额定转速为 300 r/min, 功率因数为 0.8。

电站自建成投产至今, 由于受当时技术水平、经济条件的制约和多年运行, 中、下导轴颈部位磨损, 致使局部轴径变小, 主轴偏离轴线运行, 偏心度过大, 造成水机拉杆经常断裂, 2 号机每个月至少断裂 1 次, 2014 年 4 月, 1 个月内拉杆断裂 3 次。水轮机整体结构松动, 更换水导橡胶轴承 2 次; 水机支承盖螺丝孔径扩大, 导叶轴杆只能全部定做非标配件, 导叶连接件松动, 导叶、导叶连板、固定铆钉破裂或断裂, 3 号机导叶端面缝隙普遍超过 3 mm, 机组停机状态下漏水严重; 内外座环结构磨损后下沉、错位, 不在同一

平面, 剪切力变大, 调速功不能有效作用, 开度调整困难。存在安全隐患, 亟待对水轮发电机组进行安全状态评估, 为保障电站的安全运行和维修改造提供科学依据。

2016 年 9 月 13 日, 《李溪电站定期检验评价报告》通过了专家的评审, 李溪电站(东站)水轮发电机组被评为 4 类设备, 建议尽早进行更新改造。

## 2 机组效率检测<sup>[1]</sup>

### 2.1 测点设置

为检测机组的效率, 需测量机组的流量、发电机输出功率、导叶开度、上下游水位。

测点的设置: 导叶开度测点设在调速器上, 上游水位测点设在前池末端, 利用原有的水位计; 下游水位测点设在距尾水出口约 20 m 处, 利用原有的水位计; 有功功率测点设在高压机柜, 测定发电机功率; 功率因数测点设在机房表盘附近; 频率测点设在机房表盘附近。

### 2.2 检测方法

1) 流量检测: 采用美国 Decatur 公司生产的 SVR 电波流速仪, 在进水口处施测。SVR 电波流速仪测速范围为 0.03 ~ 14.10 m/s, 测速精度为  $\pm 0.03 \text{ m/s}$ , 分辨率为 0.01 m/s, 最大测程为 100 m, 电波发射角为  $12^\circ$ , 电波发射标准功率为 10 mW, 电波频率为 24 GHz(不易受雨雾天气影响), 工作温度为  $-30 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 发电机功率检测: 通过电压互感器和电流互感

收稿日期: 2016-12-21; 修回日期: 2017-04-25

作者简介: 刘洪(1987), 女, 本科, 工程师, 主要从事水利水电工程设计、安全鉴定及咨询工作。

器进行三相功率的测量。本次采用双瓦特表法测定功率,采用上海电表仪器厂生产的0.20级D51-W瓦特表。发电机输出有功功率计算公式为  $N_g = \frac{C \times K_i \times K_v (W1 + W2)}{1000(1 + \epsilon_p)}$ , 其中  $N_g$  为发电机输出的三相有功功率, kW;  $C$  为瓦特表刻度常数, W/格;  $K_i$  为电流互感器变比系数;  $K_v$  为电压互感器变比系数;  $W1$  为瓦特表1的读数, 格;  $W2$  为瓦特表2的读数, 格;  $\epsilon_p$  为互感器的修正系数, 包括比差和角差的综合修正值(%)。

3) 水头检测: 水轮机工作水头是指进口与尾水出口单位重量水流能量之差, 也称为净水头。本电站尾水出口单位重量水流能量可用下游水位近似计算, 工作水头的计算为  $H = Z_1 + \frac{av_1^2}{2g} - (Z_2 + \frac{av_2^2}{2g})$ , 其中  $Z_1$  为上游水位,  $V_1$  为蜗壳进口断面平均流速,  $V_2$  为出口断面平均流速,  $Z_2$  为下游水位,  $\alpha$  为动能修正系数  $\alpha = 1$ 。由于  $V_1$  和  $V_2$  差值较小, 根据现场实测的实际情况, 工作水头可以近似表示为  $H = Z_1 - Z_2$ 。

### 2.3 机组效率测试及分析

现场实测数据获得后, 机组效率、水轮机效率、

耗水率由以下公式计算得出, 结果见表1和表2。

1) 机组效率的计算为  $\eta_D = \frac{N_g 1000}{\gamma Q H_D} = \frac{N_g 1000}{\gamma Q H_{毛}}$ , 其中  $N_g$  为实测发电机出力, kW;  $Q$  为实测流量,  $m^3/s$ ;  $H_{毛}$  为实测毛水头, m;  $\gamma$  为水的重度,  $9810 N/m^3$ 。

2) 水轮机效率的计算为  $\eta_t = \frac{N_i 1000}{\gamma Q_i H_i \eta_g}$ , 其中  $Q_i$ 、 $N_i$ 、 $H_i$  为实测流量、机组出力、机组工作水头,  $\eta_g$  为发电机效率,  $\gamma$  为近似计算取  $9810 N/m^3$ 。

3) 耗水率  $\epsilon$  的计算为  $\epsilon = \frac{Q \times 3600}{N_g}$ , 其中  $N_g$  为实测发电机出力, kW;  $Q$  为实测流量,  $m^3/s$ 。

测试结果表明: 机组的效率特性、流量特性和耗水率特性具有较好的规律性; 在平均工作水头为5.30 m、开度为95.5%的工况下, 实测最高水轮机效率为61.2% (原设计要求为83%)。机组效率低, 耗水率大。机组效率性能不满足规范要求。

从表2可知: 在额定工况下, 水轮机最大出力为195.9 kW, 机组最大出力为166.5 kW。机组出力 < 250 kW, 不满足设计要求。

表1 2#水轮机效率测试结果

开度/%	蜗壳进口压力/kPa	尾水水位/m	机组过流/( $m^3/s$ )	工作水头/m	水轮机出力/kW	水轮机效率/%	平均水头流量/( $m^3/s$ )	水轮机出力/kW	耗水率/[ $m^3/(kW \cdot h)$ ]
78.8	68.1	62.8	5.309 6	5.30	143.1	51.9	5.31	143.3	156.99
85.9	68.1	62.78	5.925 2	5.32	164.3	53.1	5.92	163.6	153.19
90.5	68.1	62.78	6.494 6	5.32	204.3	60.3	6.48	203.4	135.03
95.5	68.1	62.81	7.033 2	5.29	223.5	61.2	7.04	224.4	132.91
99.2	68.1	62.81	7.341	5.29	231	60.6	7.35	231.9	134.25
平均工作水头			5.30						

表2 2#机组额定工况测试成果

开度/%	工作水头/m	机组效率/%	水轮机效率/%	流量/( $m^3/s$ )	机组出力/kW	水轮机出力/kW	耗水率/[ $m^3/(kW \cdot h)$ ]
78.80	4.74	44.10	51.90	5.02	102.9	121.1	175.67
85.90	4.74	45.20	53.10	5.59	117.5	138.2	171.41
90.50	4.74	51.20	60.30	6.13	146.1	171.8	151.1
95.50	4.74	52.10	61.20	6.66	161.2	189.6	148.72
99.20	4.74	51.50	60.60	6.95	166.5	195.9	150.23

### 3 机组噪声和振动测试<sup>[2]</sup>

#### 3.1 机组噪声测试

根据《小型水轮机现场验收试验规程》(GB/T 22140—2008), 现场布置4个噪声测点, 布置在发电机房。

机组运行噪声的测量选用AWA 5636型声级计。AWA 5636型声级计是一种数字化、模块化多功能声级计, 性能符合《电声学声级计第1部分: 规范》(GB/T 3785.1—2010)对2级声级计的要求, 对射频场敏感度属X类。噪声测量为等效A声级(Leq), 单位: dBA。

机组的噪声检测值结果见表3。

表3 机组噪声检测结果 dBA

工况	导叶开度/%	发电机				
		A 测点	B 测点	C 测点	D 测点	平均
2月1日	78.8	83.4	83.4	84.5	84.2	83.9
2月2日	85.9	84.5	85.9	85.3	84.1	85
2月3日	90.5	85.6	86.2	84.6	84.3	85.2
2月4日	95.5	84.3	86.6	84.4	85.4	85.2
2月5日	99.2	85.8	86.4	85	84.1	85.3
最小值		83.9				
最大值		85.3				
综合评价		大于80 dBA, 不合格				

依据《小型水电站机组运行综合性能质量评定标准》(SL 524—2011), 第3.2.7条“水轮机噪声 < 85

dB A”, 第3.3.8条“发电机噪声 < 80 dB A”, 评价为不合格。

### 3.2 机组振动测试

采用 DASP V 10 便携式模态测试系统, 系统由 DASP V 10 专业版数据采集与信号处理软件、INV 3018C 型 24 位智能信号采集处理分析仪、INV 9828 ICP 型加速度传感器组成。

按照《小型水轮机型式参数及性能技术规定》(GB/T 21717—2008)要求, 在发电机组轴承处安装 3 只 INV 9828 ICP 型加速度传感器, 分别为水平方向(X 轴向)、水平方向(Y 轴向)、垂直水平面方向(称为 Z 轴向)。通过对 Z 方向的振动量值、波形、频谱, 衰减性能等进行对比, 分析机组运行时振动情况。振动测点设在发电机机架, 振动检测结果见表4。

表4 发电机轴承检测结果(双振幅)

工况	导叶开度/%	μm								
		发电机轴承水平测点(X 轴向)			发电机轴承水平测点(Y 轴向)			发电机轴承垂直测点(Z 轴向)		
		实测值	允许值	评价	实测值	允许值	评价	实测值	允许值	评价
2-1	78.8	38.46	<100	合格	42.56	<100	合格	19.23	<60	合格
2-2	85.9	40.98	<100	合格	43.49	<100	合格	20.81	<60	合格
2-3	90.5	50.73	<100	合格	38.25	<100	合格	18.06	<60	合格
2-4	95.5	52.03	<100	合格	47.44	<100	合格	21.33	<60	合格
2-5	99.2	53.01	<100	合格	49.67	<100	合格	24.06	<60	合格
最大值		53.01			49.67			24.06		
综合评价		<100 μm, 合格			<100 μm, 合格			<60 μm, 合格		

机组运行转速为 300 r/min。依据《小型水电站机组运行综合性能质量评定标准》(SL 524—2011): 第3.3.7条“发电机水平振动允许值(双振幅) < 100 μm, 垂直振动允许值(双振幅) < 70 μm”, 均为合格。

### 4 发电机绝缘检测<sup>[3]</sup>

采用 MEV—5 000 绝缘电阻测试仪进行检测, 结果及评价见表5; 采用 TE 2120 直流电阻测试仪进行检测, 结果及评价见表6。

表5 2#发电机定子/转子线圈绝缘电阻检测结果

部位	测试电压/V	$R_{155}/M\Omega$		$R_{60S}/M\Omega$		吸收比	评价	
		实测	40 °C	实测	40 °C			
定子	U-地	500	38.61	11.09	54.6	15.68	1.41	合格
	V-地	500	34.75	9.98	49.33	14.17	1.42	合格
	W-地	500	26.99	7.75	40.45	11.62	1.5	合格
转子	1端-地	500			172			合格
天气情况	当日天气晴朗, 电站厂房内气温 32 °C、湿度 78% RH							
使用仪器	1. 绝缘电阻测试仪, MEV—5 000; 2. 万用表; 3. 温度计; 4. 湿度计							
评价标准	依据《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596—2005)第5.1.3.1条款, 运行温度 40 °C时绝缘电阻最小值 $R_{min} = 3 M\Omega$ , 吸收比 > 1.3; 第5条款中表1 转子运行绝缘电阻最小值 $R_{min} = 0.5 M\Omega$							
综合评价	发电机定子和转子绕组绝缘电阻检测: 合格							

表6 2#发电机绕组电阻检测结果

相别	测试电流/A	绕组电阻/mΩ	相间最大电阻差/mΩ	最大不平衡率/%	合格标准	评价
A	5	93.37				
B	5	93.17	0.4	0.5	最大不平衡率 < 1%	合格
C	5	93.61				
天气情况	当日天气晴朗, 电站厂房内气温 32 ℃、湿度 78% RH					
使用仪器	1. 变压器直流电阻测试仪, TE2120 2. 万用表 3. 温度计 4. 湿度					
评价标准	依据《DL/T 596—2005 电力设备预防性试验规程》第5条款中表1各相绕组直流电阻值的相互差别不应超过最小值的1%					
综合评价	发电机绕组电阻检测: 合格					

## 5 结语

本文对水轮发电机组性能检测工作进行总结, 重点介绍了机组效率等指标的检测、方法、计算原理及结果分析。水轮发电机组性能的检测, 是电站机电设备评价的重要依据。水电站机电设备随着需要更新换代的机会越来越多, 本文具有一定的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 广东省水利水电科学研究院. 李溪电站(东电站)安全评价报告[R]. 广州: 广东省水利水电科学研究院, 2016.
- [2] 中华人民共和国水利部. 小型水电站机组运行综合性能质量评定标准: SL 524—2011[S].
- [3] 中华人民共和国能源部. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2005[S].

(本文责任编辑 王瑞兰)

## Lixi Power Station (East Station) Performance Testing and Evaluation of Hydraulic Turbine Generator Unit

LIU Hong<sup>1</sup>, LIU Shen<sup>2</sup>, XIA Tian<sup>1</sup>, LIU Jianwen<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, YU Chen<sup>1</sup>

- (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangdong Provincial Key Scientific Research Base, Guangzhou 510635, China;
2. Hukou County Water Authority, Hukou 332500, China)

**Abstract:** Lixi River Power Station (East Station) installed capacity is  $250\text{kW} \times 3 = 750\text{kW}$ , and turbine model is ZD760-LM-120A. The turbine model is SF250-20/1730. After 26 years of operation, the corrosion and wear of the equipment are aging seriously. After the on-site inspection, the efficiency is low and the safety is poor. The technical indexes cannot meet the requirements, so the renovation and reconstruction should be carried out.

**Keywords:** Lixi Power Station; hydraulic turbine generator unit; performance testing; evaluation