

文章编号:1672-3031(2020)02-0155-06

张河湾抽水蓄电站3号机组异常振动分析与处理

唐拥军, 樊玉林

(国网新能源控股有限公司技术中心, 北京 100161)

摘要: 张河湾抽水蓄电站3号机组在更换水泵水轮机转轮后, 进行了一系列的调试试验。在准备甩75%负荷试验的升负荷过程中出现了异常的振动现象, 异常振动主要频率成分为202 Hz和196.5 Hz。通过对压力脉动和顶盖振动在时域、频域及时频联合分析后, 得出异常振动是转轮叶片出水边的卡门涡频率与转轮固有频率相接近而引发的水力共振现象。后来对叶片出水边进行了修型处理, 处理后卡门涡诱发的共振现象消失。

关键词: 异常振动; 噪声; 短时傅里叶变换; 卡门涡; 转轮叶片

中图分类号: TK73

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.02.011

1 研究背景

张河湾抽水蓄电站位于河北省石家庄市井陘县测鱼镇附近的甘陶河干流上, 距石家庄市区距离为53 km, 安装4台单机容量为250 MW的抽水蓄能机组, 电站接入河北南网, 在系统中担负调峰填谷、调频调相和紧急事故备用等任务。自机组投入运行后, 电站厂房楼板一直存在着强烈的振动并伴有高频噪声, 这不仅对厂房结构有一定的破坏作用, 还可能会影响仪器设备的正常运行、导致设备损坏和错误动作, 对设备安全存在很大的隐患。后来在经过详尽的测试分析和有限元仿真计算后, 确认是水泵水轮机的转轮与导叶之间动静干涉产生的压力脉动造成了局部厂房结构的共振, 考虑到改变厂房结构的固有频率很困难以及现转轮的压力脉动较大, 于是决定采用更换转轮的方式来消除过大的厂房振动。转轮优化设计的思路是转轮叶片数不变, 通过减小无叶区压力脉动的幅值即激振能量的方式来消除过大的厂房振动。2017年首台3号机组进行了水泵水轮机转轮的更换。在转轮更换改造后进行了相关调试试验, 试验结果发现厂房振动过大的问题得到成功解决, 不过在准备甩75%负荷试验的升负荷过程出现了异常振动和嗡嗡蜂鸣声。常规混流式水轮机曾多次出现过类似现象, 例如云南大朝山和三峡右岸电站等, 机组在一定负荷区间也出现异常振动和高频蜂鸣声, 后经诊断为转轮叶片出水边卡门涡频率与转轮叶片固有频率相近而诱发的共振现象^[1-3], 这威胁机组的安全。为快速故障定位及制定下一步调试试验工作计划, 需及时对出现异常振动的信号进行分析。本文对出现的异常振动现象在时域、频域及时频联合进行了详细的分析, 并对后续处理的效果进行了介绍。

2 机组调试

2.1 机组基本参数 机组基本参数如表1所示。

表1 机组基本参数

参数	水泵水轮机 转轮名义直径	额定转速	额定水头	最大毛水头	最小毛水头	转轮叶片数	固定导叶数	活动导叶数	发电机 额定出力
指标	4.641m	333.3r/min	305m	346m	291m	9	20	20	250MW

收稿日期: 2018-05-13

基金项目: 国家电网公司科技项目(525730190006)

作者简介: 唐拥军(1979-), 高级工程师, 主要从事水电机组测试与调试、故障诊断和状态评价等研究。Email: tangyongjun@tsinghua.org.cn

2.2 甩负荷试验简介 甩负荷试验目的之一是用来检查过渡过程的水力特性是否满足合同要求，此外检查甩负荷过程是否存在异常振动现象。主要关注参数有机组转速上升率、蜗壳水压上升率和尾水管真空等^[4-5]。

3号机组甩负荷试验测点布置有有功功率、转速、导叶开度、球阀开度、蜗壳进口压力、无叶区压力、顶盖压力、转轮出口压力、尾水管压力、三部导轴承处主轴摆度、机组振动等。

甩负荷试验按照甩25%、50%、75%和100%额定负荷的顺序进行。甩25%与50%额定负荷过程未出现异常振动现象，而在上库水位804.1 m，下库水位472.3 m，毛水头331.8 m条件下，准备进行甩75%负荷试验的升负荷过程中出现了异常振动现象，详细情况如下所述。

2.3 异常振动现象 3号机组先在100 MW负荷工况稳定运行了一段时间，然后升负荷准备进行甩75%负荷试验，当负荷升至180 MW稳定一段时间后出现了异常振动和嗡嗡蜂鸣声，在180 MW负荷观察近两分钟时间，随后降负荷至100 MW左右，为了确认当前水头下异常振动出现的负荷点及大致负荷范围，再次缓慢升负荷(考虑到180 MW负荷振动剧烈，升负荷未超过180 MW)，当负荷升至170 MW稳定一段时间后再次出现了异常振动和噪声。升降负荷过程有功功率与压力量时域变化波形如图1所示，可见从120 MW缓慢升负荷的过程中，压力脉动先随着负荷的增大而减小，在负荷大于160 MW后压力脉动出现明显增大的现象，转轮出口压力脉动增大幅度最为明显。顶盖水平与垂直振动幅值变化趋势如图2所示，在160 MW、170 MW和180 MW的3个稳态负荷工况点均出现了振动突然增大的现象，且180 MW负荷工况振动最为强烈，其中顶盖水平振动有效值为2.3 mm/s，顶盖垂直振动有效值为4.8 mm/s，于是停机对上述升降负荷过程信号进行分析。

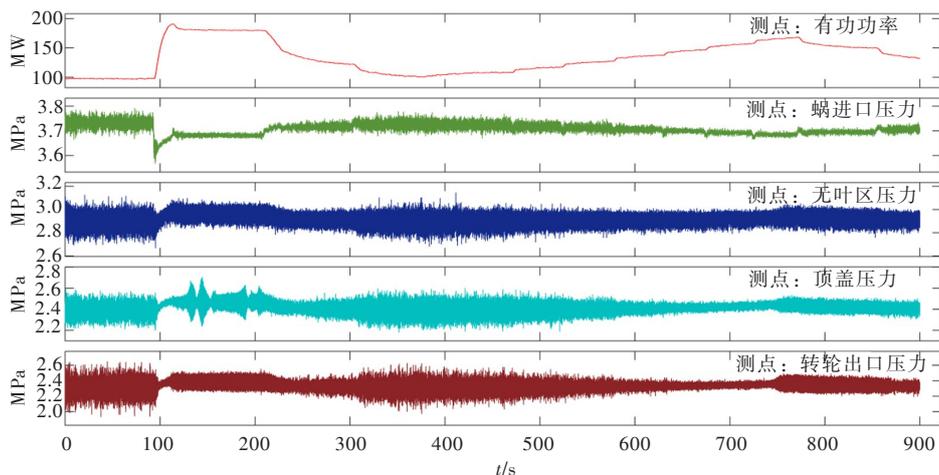


图1 升降负荷过程有功功率与压力量时域变化波形

3 异常振动问题分析与处理

3.1 分析方法简介 对异常振动信号(包括压力脉动与机组振动)进行时域、频域及时域联合分析，得到振动信号的时域幅值、频域幅值谱和时频联合分布信息。结合机械、水力和电气因素对抽蓄机组振动的影响方式及特性，从而确定产生异常振动的原因。

3.2 异常振动原因分析 抽水蓄能机组的振动主要由水力、机械和电气三种因素共同作用而产生的^[6]。上述异常振动现象只在负荷大于160 MW后出现，由此可知不是机械和电气因素引起的，而是水力因素造成的，且与过机流量存在关系。水力因素主要有尾水管涡带、导叶和转轮之间动静干涉产生的压力脉动、转轮迷宫间隙压力脉动、导叶出口脱流、叶片过流不均以及卡门涡列等^[7]，频率成分表现为1/5~1/3倍转频(转频为 $333.3/60=5.55$ Hz)、转频及其倍频、叶片过流频率(叶片数 \times 转频= $9\times 5.55=49.95$ Hz)及其倍频和导叶过流频率(导叶数 \times 转频= $20\times 5.55=111.1$ Hz)及其倍频，卡门涡频率不

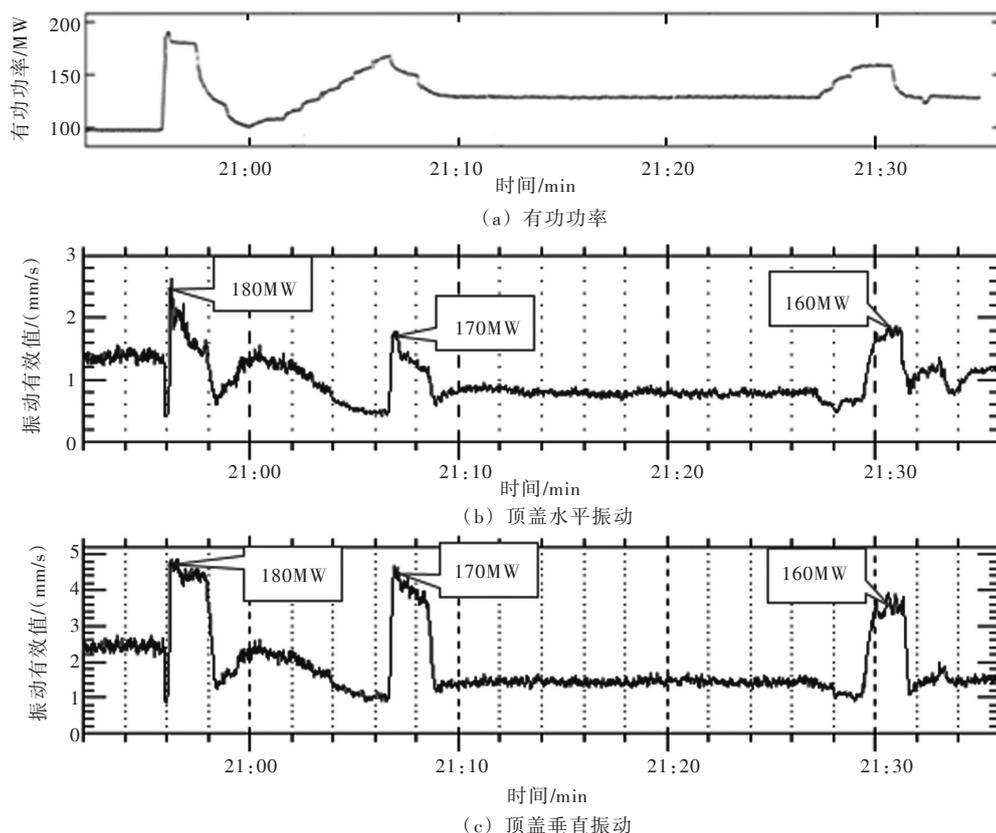


图2 升降负荷过程有功功率与顶盖振动幅值变化趋势

是定值，可用如下公式计算得到^[8]：

$$f = S_r \frac{v}{d}$$

式中： f 为卡门涡频率； S_r 为斯特劳哈数，对于混流式水轮机常取值 0.22 ~ 0.25； v 为卡门涡脱离处的相对流速； d 为卡门涡脱离处的特征尺寸，通常为转轮叶片出水边的厚度加边界层的厚度。

下面先对升降负荷过程中无叶区压力脉动与转轮出口压力脉动进行时频联合分析，如图3和图4所示，由图3可知，无叶区压力脉动主要频率成分为 50 Hz 的叶片过流频率及其 2 倍和 3 倍频，在 100 MW ~ 120 MW 负荷范围还有比较杂乱的小于 50 Hz 的频率成分。在发生异常振动时，突然出现了 202 Hz、196.5 Hz、152.2 Hz 和 168.8 Hz 这 4 个异常频率成分，且 202 Hz 幅值最大、196.5 Hz 幅值次之。由图 4 可知，转轮出口压力脉动主要频率成分为 25 Hz 左右及其 3 倍、5 倍和 7 倍频以及 100 Hz 的 2 倍叶片过流频率。在 100 MW ~ 120 MW 负荷范围还有比较杂乱的小于 25 Hz 的频率成分。在发生异常振动时，突然出现了 202 Hz、196.5 Hz、163.2 Hz、152.2 Hz 和 168.8 Hz 这 5 个异常频率成分，且 202 Hz 幅值最大、196.5 Hz 幅值次之，这与无叶区压力脉动相一致。不过，转轮出口压力脉动中的 202 Hz 幅值比无叶区压力脉动中的要大，转轮出口 202 Hz 分量幅值为 0.12 MPa，无叶区的为 0.046 MPa，这表明振源位于转轮出口附近，很可能位于转轮叶片出水边。

180 MW 负荷工况，顶盖水平与垂直振动的频域幅值谱如图 5 所示，顶盖水平与垂直振动主要频率成分也为 202 Hz、196.5 Hz、152.2 Hz、168.8 Hz 和 163.2 Hz。这与转轮出口压力脉动非常一致。

根据上述分析，可以判定异常振动是由转轮叶片出水边的卡门涡频率与转轮的固有频率相接近而引发的水力共振现象^[9]。这对于 160 MW 至 180 MW 之间非稳态工况(运行时间短，小于 10 秒)未出现异常振动可以给出合理解释：卡门涡频率与转轮固有频率相近，卡门涡对转轮叶片做正功，由于时间短，做功能量未能激发共振，而此时负荷增大或减小，卡门涡频率变化，相位也发生变化，使得做功方向发生变化，叶片上的振动能量不增反减，从而未出现异常振动现象。

为了进一步证实上述分析判断，后来在发生异常振动的工况下进行了高压补气测试，通过无叶

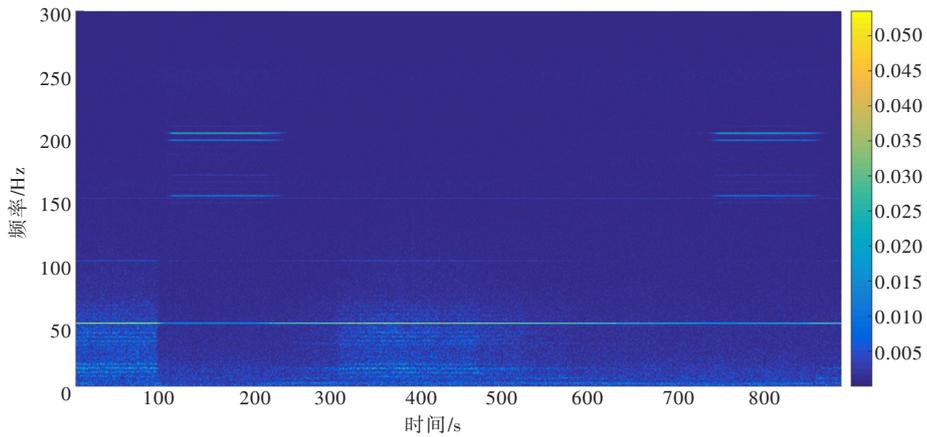


图3 无叶区压力脉动时频分布

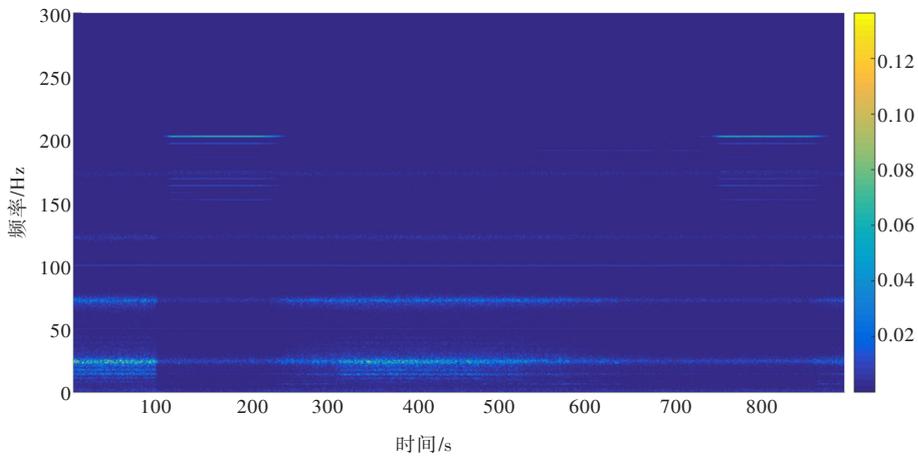
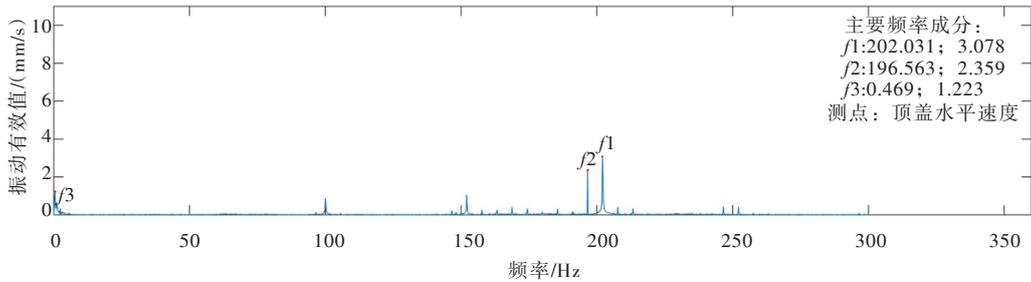
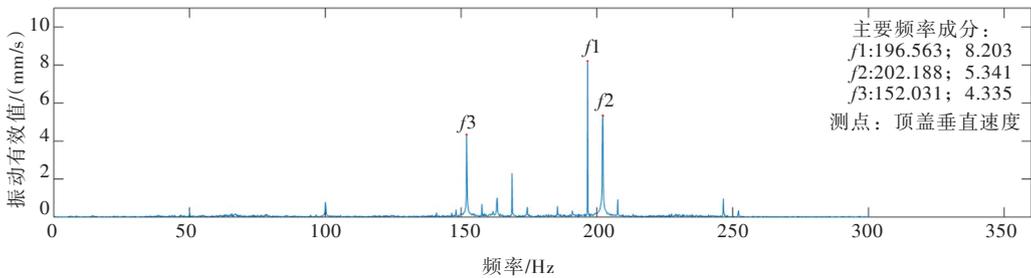


图4 转轮出口压力脉动时频分布



(a) 顶盖水平振动



(b) 顶盖垂直振动

图5 顶盖振动频域幅值谱

区压力测压管路补气后异常振动消失，这是因为高压气体对卡门涡形成了破坏作用。此外，转轮制造厂家利用有限元计算了转轮在水中的固有频率，其中有两阶固有频率与 196.5 Hz 和 202 Hz 相接近，如下图 6 所示，最大振动区域位于叶片出水边中部。综上所述上述分析判断是正确的。

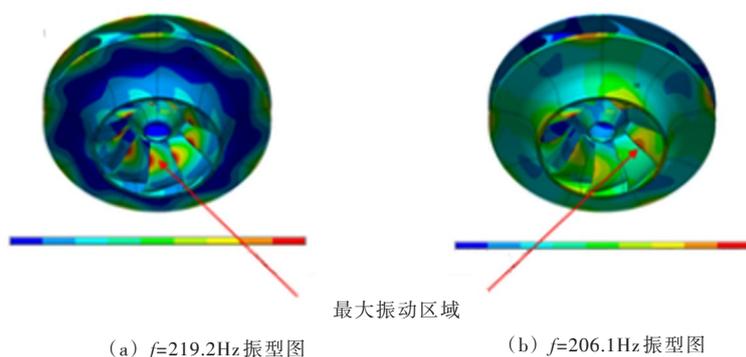


图6 转轮固有频率计算结果

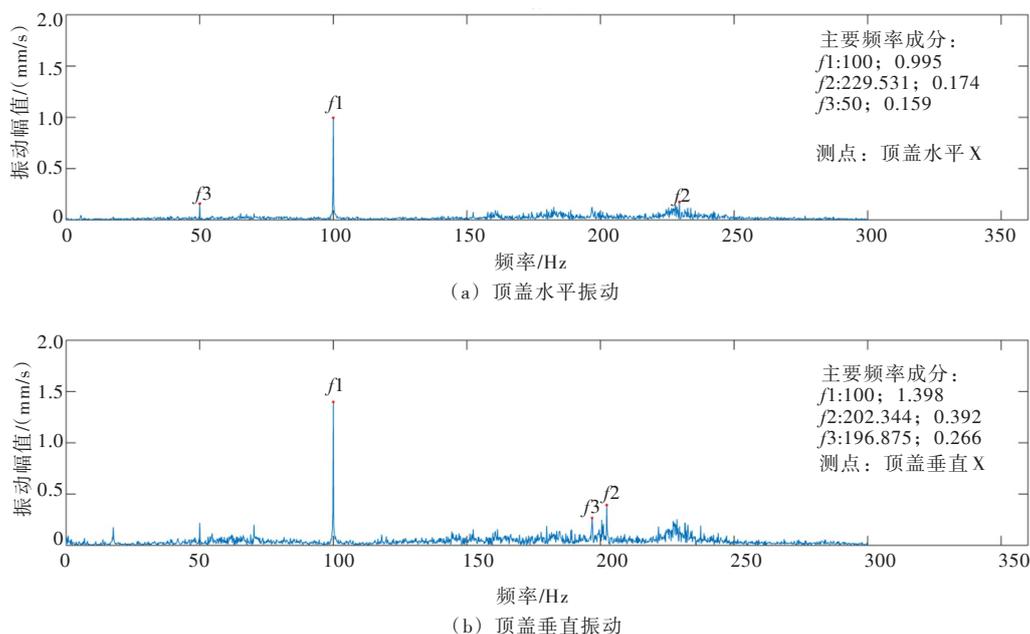


图7 处理后顶盖振动频域幅值谱

3.3 处理及效果 后来对转轮叶片出水边进行了修型处理，修型后顶盖振动频域幅值谱如下图7所示，202 Hz与196.5 Hz异常振动频率成分幅值大幅减小，异常振动现象消失。卡门涡诱发的共振问题得到成功解决。

4 结论

(1)张河湾抽蓄电站3号机组在更换水泵水轮机转轮后进行了一系列的调试试验，在准备甩75%负荷试验升负荷的过程中，出现了异常振动和嗡嗡蜂鸣声。异常振动主要频率成分为202 Hz和196.5 Hz，180 MW负荷工况振动最为强烈，其中顶盖水平振动有效值达到了2.3 mm/s，顶盖垂直振动有效值达到了4.8 mm/s，严重威胁机组的安全稳定运行。经分析异常振动是转轮叶片出水边的卡门涡频率与转轮的固有频率相接近而引发的水力共振现象，在对叶片出水边进行修型处理后，卡门涡共振问题得到成功解决。

(2)张河湾抽蓄电站对转轮进行优化改造后，过大厂房振动和高频噪声问题得到了成功解决，不过发生了卡门涡引发的水力共振现象，这在国内乃至国外的抽水蓄能电站均为首次。这对大型水泵水轮机的水力设计有着重要的借鉴作用。水泵水轮机具有运行水头高、转速快和双向旋转的特点，通过水力优化设计可以降低水压脉动从而提高机组的运行稳定性，然而，应注意避免发生卡门涡共振等次生问题。

(3)对于过渡过程,采用时频联合分析非常具有优越性,它可以直观地显示信号的时频分布情况。抽水蓄能机组启停频繁,工况转换多,因此,对抽水蓄能机组而言,采用时域、频域和时频联合分析是评价机组运行状态和诊断分析故障原因行之有效的方法。

参 考 文 献:

- [1] 李启章.大朝山电站转轮叶片的卡门涡共振[J].水电站机电技术,2005,28(4):76-79.
- [2] 易平梅.三峡右岸 ALSTOM 水轮机转轮卡门涡分析与处理[C]//中国水利学会第四届青年科技论坛论文集,2008.
- [3] 樊玉林,张飞,付婧,等.基于短时傅里叶变换的水轮机涡带工况识别[J].人民长江,2016(4):85-87.
- [4] 向玲,唐贵基,胡爱军.旋转机械非平稳振动信号的时频分析比较[J].振动与冲击,2010(2):42-45.
- [5] 中国电力企业联合会.可逆式抽水蓄能机组启动试运行规程 GB/T 18482-2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [6] 孙万泉,马震岳,赵凤遥.抽水蓄能电站振源特性分析研究[J].水电能源科学,2003,21(4):78-81.
- [7] 贾伟,刘晶石,庞立军,等.抽水蓄能电站水泵水轮机的动静干涉与振动分析[J].振动工程学报,2014(8):565-570.
- [8] 王东,张思青,马国华,等.水轮机卡门涡研究进展[J].水电自动化与大坝监测,2013(8):13-16.
- [9] 宋承祥,德宫·健男,杉下·怀夫.水轮机卡门涡诱发振动分析研究[J].红水河,2012(2):38-41.

Analysis and treatment on abnormal vibration of 3[#] unit of Zhanghewan pumped storage hydropower plant

TANG Yongjun, FAN Yulin

(Technology Center of State Grid Xinyuan Company LTD, Beijing 100161, China)

Abstract: A series of debug tests were conducted on unit 3[#] of Zhanghewan pumped storage hydropower plant after its pump-turbine runner was replaced with a new one. Abnormal vibration happened in the process of load going up with 75% rated load reject test, and the main frequencies of abnormal vibration was 201Hz and 196.5Hz. After a detailed analysis on pressure pulsation and headcover vibration was conducted in time domain, frequency domain and time-frequency analysis, it was found that a resonance vibration happened because the frequencies of Karman vortex at runner blade outer edge was close to the natural frequencies of runner. Later on, the Karman vortex resonance disappeared after some treatment on the outer edge of runner blade.

Keywords: abnormal vibration; noise; short-time fourier transform; karman vortex; runner blade

(责任编辑:杨虹)