

文章编号:1672-3031(2017)06-0444-05

抽水蓄能机组水轮机工况启动时机组及厂房振动时频分析

丁光¹, 安学利², 王开², 潘罗平², 郭曦龙², 刘永强²

(1. 浙江仙居抽水蓄能有限公司, 浙江台州 317300; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 对抽水蓄能机组水轮机工况启动过程中, 机组摆度、振动、厂房振动、压力脉动随转速变化的时频特性进行了试验研究。研究表明, 当抽水蓄能机组水轮机工况启动时, 机组升速过程中, 机组摆度信号有明显的转频及倍频分量; 机组振动速度信号、电站厂房振动信号有明显的3倍叶片过流频率; 压力脉动信号主频与转速没有明显的关系, 具有低频随机脉动特性。

关键词: 抽水蓄能机组; 水轮机工况启动; 时频分析; 机组振动; 厂房振动; 压力脉动

中图分类号: TK734

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.06.006

1 研究背景

截止到2016年底, 中国风电累计装机量达到1.69亿kW, 占全球风电累计装机的34.7%, 为全球风电装机第一大国。随着大量的风电、核电等能源的并网, 抽水蓄能电站的调节作用越来越重要^[1-4]。抽水蓄能机组的启停机、变负荷更加频繁, 使得机组更容易发生故障^[5-8]。为确保机组的安全稳定运行, 需要对机组及电站振动特性进行深入研究。

本文对抽水蓄能机组水轮机工况启动过程中, 机组摆度、振动、厂房振动、压力脉动测点随转速变化的时频特性进行了试验研究。考虑到机组启动时, 振动信号的非平稳性, 采用加窗傅里叶变换方法^[8], 分析机组在水轮机工况启动时, 蓄能机组和电站厂房振动的时频特性, 以定量地描述振动时变信号时间和频率的关系, 准确地评估机组的瞬时特征。

2 短时傅里叶变换

对于平稳信号, 一般采用传统傅里叶变换进行分析, 该方法对信号进行全局性分析, 不能反映信号的局部信息, 同时还存在时域与频域分割的问题。抽水蓄能机组水轮机工况启动过程中, 机组和厂房振动信号具有很强的非平稳性, 因此传统傅里叶变换不在适用。Gabor提出了短时傅里叶变换^[8], 以克服传统傅里叶变换在时域局部化的不足, 使其适应于分析非平稳信号。

短时傅里叶变换的主要思路: 将非平稳信号加窗, 将加窗后的信号进行傅里叶变换, 通过平移参数来实现时间局部化。假定 $h(t)$ 是中心位于 τ 且宽度有限的窗函数, 对于定义在实数域 $L(R)$ 的非平稳信号 $x(t)$, 信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换定义为^[9]:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(\tau-t)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 窗函数 $h(t)$ 的时移和频移使短时傅里叶变换具有了局部特性, 它同时是时间

收稿日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309258)

作者简介: 丁光(1974-), 男, 浙江金华人, 高级工程师, 主要从事抽水蓄能电站运行维护管理研究。

E-mail: dingguang@163.com

通讯作者: 安学利(1980-), 男, 山东肥城人, 博士, 高级工程师, 主要从事发电机组运行保障及故障诊断研究。

E-mail: an_xueli@163.com

和频率的函数。取不同时刻值 t ，可获得该时刻的局部频谱。

短时傅里叶变换常用的窗函数有：矩形窗、汉宁窗、海明窗、高斯窗以及布莱克曼窗等。由于高斯函数有很好的时频集聚性，因此本文采用它作为窗函数。

实际应用时需要将连续短时傅里叶变换进行离散化，假设信号的采样频率为 f_s ，令 $t = m\Delta t$ ， $\Delta t = 1/f_s$ 为采样时间间隔， m 为时间步骤数，将原信号 $x(t)$ 离散为 $x(k)$ ，将窗函数 $h(t)$ 离散为 $h(k)$ ， N_w 为时间窗的宽度，得到 $x(t)$ 的离散短时傅里叶变换：

$$Y_g(m\Delta t, f) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} x(k)h(k - m\Delta t)e^{-j2\pi kf} \quad (2)$$

对 $Y_g(m\Delta t, f)$ 求模，得到相应的频谱幅值矩阵：

$$S_g(m\Delta t, f) = |Y_g(m\Delta t, f)| \quad (3)$$

3 开机过程振动时频分析

3.1 试验说明 试验机组基本参数：额定转速为 300 r/min，转轮叶片数为 7，水轮机额定功率为 306 MW。

试验共布置 46 个测点。其中机组摆度 6 点，机组振动测点共 20 点，厂房振动测点共 14 点，压力脉动测点共 2 点，机组工况参数共计 4 点。

机组工况参数测点包括：有功功率、导叶开度、转速、差压水头。

机组振动测点包括：上机架、下机架、定子基座、顶盖等位置的水平、垂直等测点，每个测点布置 2 种类型传感器，分别为速度传感器(速度型)、速度传感器(位移型)，用于比较 2 种类型传感器测试机组振动时的差异性。

厂房振动测点包括：发电机层、中间层、水轮机层、蜗壳层等位置的楼板、上/下游墙、支墩、楼梯口等测点，还包括发电机风罩、蜗壳层基坑壁垂直等测点，每个测点布置低频速度传感器。

压力脉动测点包括：蜗壳进口压力脉动、尾水压力脉动。

3.2 机组振动时频图分析 开机过程中，机组转速变化图如图 1 所示。从图中可以看出，随着导叶开启及开度不断增大，机组转速逐渐上升，最终达到额定转速。

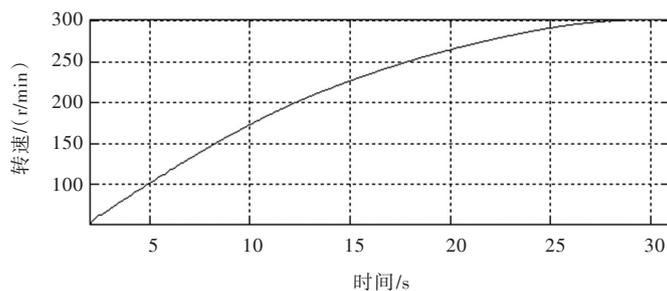


图1 水轮机工况开机至额定转速过程中转速变化

机组开机过程为变转速过程，为充分了解机组变转速时的振动特性，采用加窗傅里叶变换对不同测点进行分析。每个测点分析时，傅里叶变换窗函数均采用高斯窗函数，数据时长为 3 s(是指窗口傅立叶变换时的窗口长度)。开机过程中上导摆度+X、上机架+X垂直、下机架+X垂直、定子基座+X水平振动时频图如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出，升速过程中机组摆度测点存在转频及明显的各阶倍频分量。从图 2(b)~(d)可以看出，在升速过程中，机组上机架、下机架及定子基座速度传感器(速度型)测点时频图中机组转频和 3 倍叶片过流频率振动频率值逐渐增大。图中颜色的深浅代表了对应频率幅值的大小，颜色越接近红色，表示幅值越大。

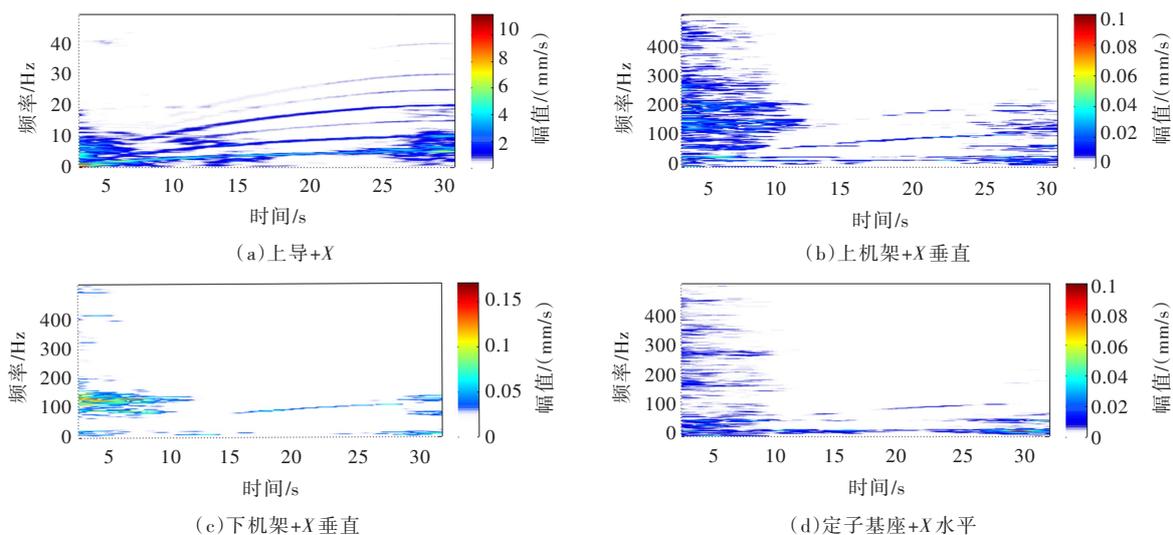


图2 水轮机工况开机过程机组摆度及速度传感器(速度型)时频图

3.3 机组主频分析 本次试验还采用了速度传感器(位移型)对机组振动相应测点进行了测试,表1、表2分别给出了抽水蓄能机组在额定发电工况时,机组同一振动测点分别采用速度传感器(速度型)、速度传感器(位移型)时,在不同水头时的主频值。结果表明,3倍的叶片过流频率振动在对应的速度传感器(位移型)测点中没有明显表现,这表明速度传感器(速度型)更适用于测试机组较高频率成分的振动。

表1 机组发电工况速度传感器(位移型)主频值

静水头	下机架 +X水平	下机架 +X垂直	下机架 +Y水平	上机架 +X水平	上机架 +X垂直	上机架 +Y水平	定子基座 +X垂直	顶盖 水平+X	顶盖 垂直+X
/m	/Hz	/Hz	/Hz						
266.42	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.38	5.00
265.77	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.69	5.00
264.52	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.52	5.00
263.40	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.48	5.00
262.17	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	50.01	0.48	5.00
261.05	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.48	5.00
259.87	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.48	5.00

表2 机组发电工况速度传感器(速度型)测点主频值

静水头	下机架 +X水平	下机架 +X垂直	下机架 +Y水平	上机架 +X水平	上机架 +X垂直	上机架 +Y水平	定子基座 +X垂直	顶盖 水平+X	顶盖 垂直+X
/m	/Hz	/Hz	/Hz						
266.42	105.05	105.05	105.05	5.00	105.05	5.00	100.05	105.05	105.05
265.77	104.96	104.96	104.96	10.00	104.96	5.00	99.96	104.96	104.96
264.52	105.04	105.04	105.04	5.00	105.04	5.00	210.08	105.04	105.04
263.40	104.99	104.97	104.97	5.00	104.97	5.00	209.93	104.97	104.97
262.17	105.03	105.03	105.03	5.00	105.03	5.00	210.06	105.03	105.03
261.05	105.02	105.02	105.02	5.00	105.02	5.00	210.03	105.02	105.02
259.87	105.01	105.01	105.01	5.00	105.01	5.00	209.99	105.01	105.01

3.4 3倍叶片过流频率说明 抽蓄机组转轮旋转时,会形成其周围水体的压力和流速场的脉动^[10]。脉动具有周期性的特性,从活动导叶或蜗壳中某一位置观察转轮叶片,包含频率^[10]:

$$f_{s,k} = Z_r \times n \times k \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

在转轮中的每个叶片的头部会受到来自静止导叶的周期作用力, 包含频率:

$$f_{r,m} = Z_s \times n \times m \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

式中: Z_r 为转轮叶片数; Z_s 为活动导叶个数; n 为转轮转速; 单位为 r/s, k 为叶片通过频率的倍数; m 为导叶通过频率的倍数。

转轮旋转时, 转轮前、导叶后区域的压力场由式(4)、式(5)会出现压力模态, 可以划分为等相位的分区, 以节径 N_D 来区分, 且满足^[10]:

$$m \times Z_s + v = k \times Z_r \quad (v = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

$$N_D = |v| \quad (7)$$

式中: N_D 为节径, 自然数; v 为带正号“+”或者负号“-”的节径, 整数。

针对本文实测抽水蓄能机组, 转轮叶片数是7, 活动导叶数是20。当 $k=3, m=1, v=+1$ 时, 满足式(6)的等式关系, 即该机组存在3倍的叶片过流频率, 这和实测数据是相符的。

3.5 厂房振动分析 发电机第一象限、风洞墙+X、发电机层下游墙、水轮机层上游墙厂房振动测点时频图如图3所示。从图中可以看出, 对于厂房振动测点, 蓄能机组升速过程中出现明显的三倍叶片过流频率; 机组转速较低时(小于120 r/min, 即导叶打开至稳定阶段), 厂房振动测点表现为明显的随机振动。通过分析可以看出, 厂房振动受水力因素影响明显, 主要表现为主频为叶片过流频率及其倍频。

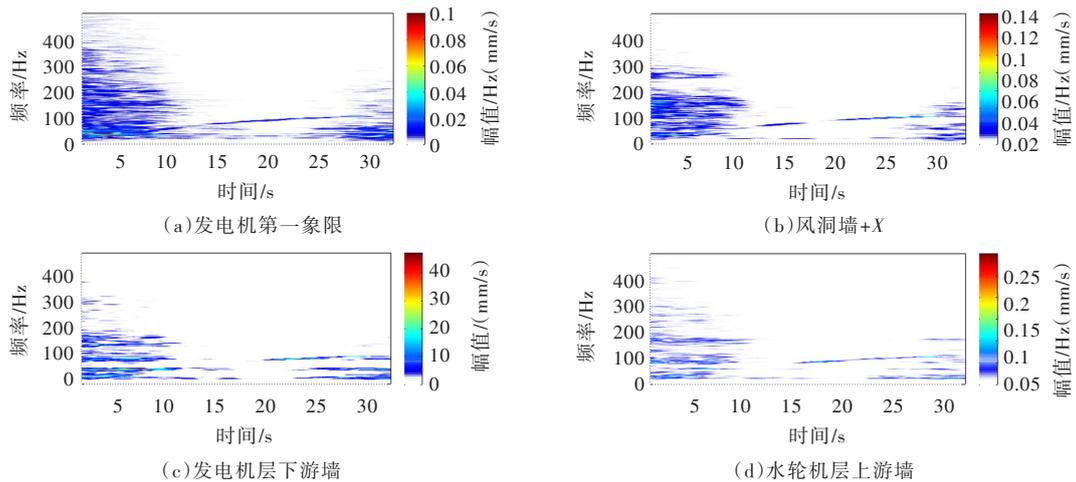


图3 水轮机工况开机过程厂房振动速度时频图

3.6 压力分析 抽水蓄能机组蜗壳进口、尾水压力脉动测点时频图如图4所示, 从图中可以看出, 在转速升高过程中, 压力脉动主频与转速没有明显的关系, 压力脉动具有低频随机脉动特性。

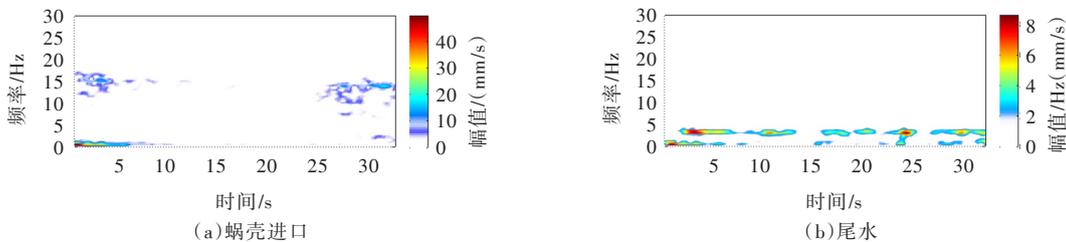


图4 水轮机工况开机过程压力脉动时频图

4 结论

水轮机工况启动机组时, 在升速过程中, 机组摆度测点存在转频及明显的倍频分量; 机组速度

传感器(速度型)测点有明显的3倍叶片过流频率,该振动频率值随转速的增大逐渐增大。机组升速过程中,厂房振动有明显的三倍叶片过流频率;在低转速旋转时(转速小于120 r/min)厂房振动测点表现为明显的随机振动,该段转速对应导叶打开至稳定阶段。压力脉动主频与转速没有明显的关系,具有低频随机脉动特性。

参 考 文 献:

- [1] 安学利,唐拥军,吴光军,等.基于健康样本的风电机组状态评估与异常检测系统[J].大电机技术,2015(2):14-17.
- [2] 尚银磊,李德玉,欧阳金惠.大型水电站厂房振动问题研究综述[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(1):48-52.
- [3] AN Xueli, YANG Junjie. Denoising of hydropower unit vibration signal based on variational mode decomposition and approximate entropy[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(3): 282-292.
- [4] 何少云,许其光,王泽华,等.仙居抽水蓄能电站蜗壳混凝土施工仿真研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(1):29-35.
- [5] 安学利,潘罗平,桂中华,等.抽水蓄能电站机组异常状态检测模型研究[J].水电能源科学,2013,31(1):157-160.
- [6] 安学利,潘罗平,张飞.基于三维曲面的抽水蓄能电站机组故障预警模型[J].水力发电,2013,39(1):71-75.
- [7] 樊玉林,桂中华,王明芳,等.基于VMD的抽水蓄能机组振动参数演化预测[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(5):345-349.
- [8] 张飞,唐拥军,王国柱,等.球阀动水关闭过程中球阀与机组稳定性分析[J].振动与冲击,2017,36(8):244-249.
- [9] 黄建明,瞿合祚,李晓明.基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J].电网技术,2016,40(10):3184-3191.
- [10] 袁寿其,方玉建,袁建平,等.我国已建抽水蓄能电站机组振动问题综述[J].水力发电学报,2015,34(11):1-15.

Time-frequency analysis of unit and hydropower house vibration of pumped storage unit in start-up process of hydraulic turbine operating condition

DING Guang¹, AN Xueli², WANG Kai², PAN Luoping², GUO Xilong², LIU Yongqiang²

(1. Zhejiang Xianju Pumped Storage Power Co., Ltd, Taizhou 317300, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The time-frequency characteristics of the unit's swing, vibration, hydropower house vibration and pressure fluctuation are studied with the change of the rotating speed of the pumped storage unit in the start-up process of hydraulic turbine operating condition. The results show that when the hydraulic turbine operating condition starts, the unit swing signal has obvious rotating frequency and its harmonics in the process of speeding up the unit. The unit vibration signals and the hydropower house vibration signal show three times the hydraulic turbine blade passing frequency obviously. There is no obvious relationship between the main frequencies, the pressure fluctuation signal and the rotating speed of the unit. The pressure fluctuation has low frequency random fluctuation characteristic.

Keywords: pumped storage units; hydraulic turbine start-up process; time-frequency analysis; unit vibration; hydropower house vibration; pressure fluctuation

(责任编辑:杨虹)