

水电机组空蚀在线监测系统的研究

王涛¹, 南海鹏¹, 王德意¹, 董开松²

(1. 西安理工大学水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 甘肃省电力试验研究院, 甘肃 兰州 730000)

[摘要] 介绍了水电机组空蚀在线监测的原理和实现方法, 提出了具体的空蚀在线监测系统结构设计方案, 并在八盘峡水电厂 4 号机组上进行了现场试验, 得出了空蚀强度随负荷变化的特性曲线, 为水电厂开展状态检修进行了有益的探索。

[关键词] 在线监测; 状态检修; 空蚀磨损; 频谱分析

[中图分类号] TV131 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1000-3983(2002)06-0044-03

Research of On-line Monitoring System of Cavitation in Hydropower Units

WANG Tao¹, NAN Hai-peng¹, WANG De-yi¹, DONG Kai-song²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Gansu Electrical Testing and Scientific Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The theory and realizing plan of on-line monitoring system of cavitation in hydropower units are introduced. On this basis, the design pattern is put forward. The field test of number 4 unit in Bapanxia hydropower plant is completed. The Varying characteristic of cavitation strength with load is obtained. The condition maintenance in hydropower plant is useful exploring.

Key words: on-line monitoring; condition maintenance; cavitations abrasion; spectrum analysis

1 引言

水电机组在线监测技术^[1-4]是在计算机和传感技术的基础上发展起来的, 目前, 国内水电机组空蚀监测还停留在凭感觉或定期查看的阶段, 缺少有效的监测手段。近年来, 国外在这方面的研究发展很快, 美国电力研究所 (EPRI)、加拿大魁北克水力研究所 (IREQ) 和美国声学 ORE 股份有限公司已开发出了一些产品。

水轮机在运行过程中, 都存在空蚀磨损问题。所谓空蚀, 是指水流在流道中流过时, 如某一部位的局部压力降低到接近于水的汽化压力, 则气核成长为气泡, 气泡膨胀、聚集、流动至高压区又发生溃灭、分裂的现象。气泡溃灭瞬间, 气泡中心点压力高达 1500 个大气压。如果气泡溃灭的部位发生在固体表面, 则将对固体表面产生持续的、高频率的微观水击作用, 使固体表面疲劳损坏。此外, 在气泡溃灭过程中伴有温度升高 (约为 +500℃)、发光、电离、化学腐蚀等现象, 加速了材料的破坏过程, 这种现象称为空蚀损坏。空蚀磨损使水轮机通流部件表面变得粗糙, 破坏了表面原有的绕流条件, 使效率和出力降低。缩短了水电机组的检

修周期, 增加了检修工作量, 严重的甚至需要更换部分通流部件。

2 空蚀在线监测原理

2.1 监测方法

原型水轮机的空蚀监测有多种方法^[5], 如: 声学法、电阻法、快速破坏法等, 但能用于在线监测的只有声学法。声学法又可分为噪声法和超声波法。本文重点研究超声波法。

2.2 监测原理

运行中的水电机组存在因叶片转动、尾水管涡带、撞击、机械摩擦和电磁振动而产生的声振动, 所以, 用噪声判断空蚀的发展状态十分困难。但测量空蚀发生时的超声波分量, 就可以避免噪声分量的干扰。超声波法使用电压换能器 (钛酸钡压电晶体——探头), 将声能转换成电压信号, 选出空蚀的特征频率并加以放大, 用表头显示出来。

空蚀溃灭所产生的宽频声振动, 声波范围既包含 20Hz ~ 20000kHz 的可闻声波 (噪声), 又包含 20MHz 至几百 MHz 的超声波。空蚀声波的频谱取决于空蚀的直

径、数量和溃灭速度。较小直径的汽泡溃灭时产生高频率的声振动，较大直径的汽泡溃灭时产生低频率的声振动。很多试验资料都表明了空蚀现象与声波压强之间的内在联系，随着空蚀的发展，汽泡的数量增多，溃灭速度加快，冲击强度增大，声波的振幅也随之增加。

根据上述原理，选用压电换能器将声能信号转换成电压信号，选出空蚀的特征频率加以放大，然后处理。测点超声强度 J (单位时间内穿过声波射线垂直的单位面积的能量) 可用下式表示：

$$J = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (1)$$

式中： J ——测点超声强度；

p ——声压振幅；

ρ ——介质密度；

ρc ——介质声阻抗。

声压振幅与压电效应存在以下关系：

$$p = \frac{U}{r_f} \quad (2)$$

式中： U ——压电晶体感生的电压；

r_f ——压电晶体的灵敏度。

由上可得，相对空蚀强度 J 可以表示为：

$$J = \frac{U^2}{r_f^2} \cdot \frac{1}{2\rho c} \quad (3)$$

由此可知，对同一介质，固定探头的 $r_f, \rho c$ 是已知数，当选定某一频率时，超声波空蚀强度正比于压电晶体电压，即： $J = U^2 \cdot k$ 。

以全频的相对空蚀强度为纵坐标、频率为横坐标，绘出某一工况下的关系曲线，再对该曲线包络的面积积分，则可以得到该工况下的相对空蚀强度 J ；通过对曲线的分析，就可以确定空蚀初生点。

3 空蚀在线监测系统设计

3.1 监测仪器

根据空蚀在线监测原理，针对八盘峡4号机组设计开发了一套水电机组空蚀在线监测系统。系统选用自行开发的“水轮机空蚀磨损测试仪”。该仪器可探测到 20Hz ~ 1MHz 声频谱范围内的频谱值。

3.2 在线监测系统结构

(1) 硬件配置

方正 (FOUNDER) 9810 计算机一台，HP 便携式打印机一台，自制超声测量传感器一台，微伏放大器一台，采集箱一台 (内含电源板、信号调整板、信号接口板各一块)，HX1050 高速 A/D 板一块 (内含 DB37-F 孔式

连接器、16 位定时器、12 位 1MHz 高速采集存储式 A/D、采样/保持器、128KB 数据 RAM 等)，配置图见图 1。

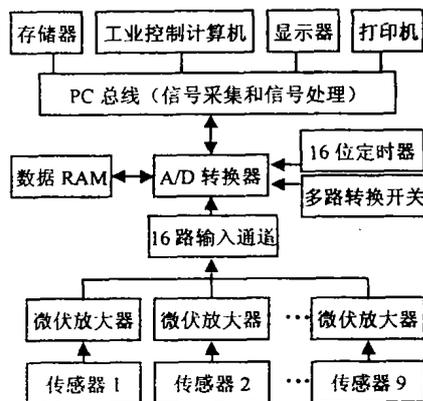


图 1 空蚀在线监测系统硬件结构配置图

(2) 软件设计

软件分为采集程序和数据处理程序两部分。采集程序管理所有测试通道信号的采集，可以外部控制或自动采集，同时进行特征频率测试、全频段测试和声级计测试（也可单独选择一种）；采集数据先存放在 HX1050 板中的 RAM 中，再存储在 PC 数据库里；原始数据可直接打印或送入数据处理程序中进行分析计算。数据处理程序将采集的原始数据处理后存盘，可根据不同需要进行后期处理，结果送入打印机，以表格或图形 (可选择) 方式打印。

工具软件以 Delphi 为开发工具，汇编语言为辅助开发工具。作为目前最先进的面向对象的工具软件 Delphi 兼有 Visual Basic 和 C++ 的强大功能，容易掌握，是一种优秀的应用程序开发工具，保证了测试系统软件在大量数据下的数据转换和绘图的准确、快速和方便，软件原理框图见图 2。

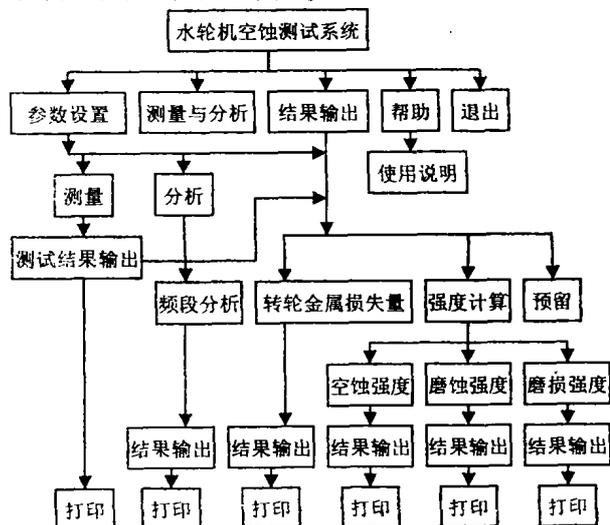


图 2 水电厂空蚀在线监测软件系统框图

4 现场试验成果及结论^[6]

4.1 八盘峡水电厂概况

甘肃省境内的八盘峡水电厂是已投入运行的黄河干流梯级电站中的第五座,距离兰州市 47km,1975 年投产发电,总装机容量为 180MW,在西北电网中主要承担基荷任务。八盘峡水电厂装有 5 台单机容量为 36MW 的轴流转桨式水轮发电机组,其中 1#、2# 机组为哈尔滨电机厂有限责任公司制造,3#、4#、5# 机组由瑞士 KMW 公司制造。

1975 年 8 月八盘峡水电厂第一台机组投产,1980 年 2 月全部 5 台机组并网发电,至今已运行二十多年。由于空蚀磨损的原因,水轮机转轮损坏相当严重。为此,甘肃省电力公司和八盘峡水电厂决定,自 1994 年起,利用机组扩修之际,对全厂 5 台机组转轮逐台更换。1994 年和 1995 年年初,先后更换了国产 2# 机和 1# 机转轮(分别由东方电机股份有限公司和浙江富春江水电设备总厂生产),1#、2# 机转轮更换后的型号不变,仍为 ZZ560-LH-550。进口机组的改造首先从 5# 机组开始,1998 年初更换了由东方电机股份有限公司制造的新转轮。其余的 3#、4# 水轮机转轮由合资的上海希科水电设备有限公司(SHEC)采用国外设计、国内制造的方式于 1998 年 3 月开始生产,1999 年 12 月 4# 机新转轮到货。根据八盘峡水电厂的要求,4# 机新转轮投运后,进行了新转轮的空蚀特性试验,4# 机新旧转轮的技术参数见表 1。

表 1 水轮机主要技术参数

技术参数	原转轮	新转轮
水轮机型号	KV4-55	立式轴流
额定功率(kW)	37.1	40.0
最大水头(m)	19.5	19.5
额定水头(m)	18.0	18.0
最小水头(m)	11.6	11.6
额定流量(m ³ /s)	236	247
额定转速(r/min)	115.4	115.4
转轮直径(m)	5.5	5.5
转轮叶片数	4	4
叶片中心高程(m)	1552	1552
电站设计尾水位(m)	1559.35	1559.35
电站设计吸出高程(m)	7.35	7.35

4.2 试验方法

通过压电晶体传感器测量水轮机的声压强,从而测得水轮机的空蚀。压电晶体传感器是一种典型的自发电式传感器。某些晶体受力后,内部就产生极化现象,并同时在某两个表面产生符号相反的电荷;当外力去掉后,又恢复到不带电的状态;这种现象为晶体的压电效应;它就是以此为转换原理的传感器;压电晶体传感

器是机-电转换元件,它可以测量最终能变换为力的那些物理量,可以测量超声波产生的声压。压电式传感器具有使用频带宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠、重量轻等优点。尤其是采用了先进的二次设备和低噪声、小电容、高绝缘电阻电缆与之结合使用,使该传感器更适合于水电厂的现场情况。

将压电晶体传感器分别安装在蜗壳人孔门上、1#~2# 活动导叶中间靠出水边处放置传感器的部位,使表面光洁度达到要求;测点与传感器之间要结合紧密并涂耦合剂。

压电晶体传感器的信号送入“水轮机空蚀磨损测试仪”,经过信号处理后再送入计算机中由专用的软件计算出结果。

4.3 试验成果及结论

本次试验的主要目的是测量和绘制 4# 机组的相对空蚀强度曲线,为水轮发电机组优化调度、合理运行和状态检修提供依据。通过试验取得了如下成果:

(1)通过对 4 号机组空蚀在线监测的数据进行分析研究,发现在 20~500kHz 范围内有两个谱段受负荷变化的影响较大,分别为 20~500kHz 和 110~140kHz,这与国外一些研究机构的空蚀测试结果也基本一致。实测的相对空蚀强度曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,负荷为 0~15MW 相对空蚀强度最

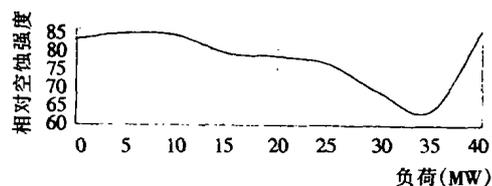


图 3 八盘峡水电厂 4 号水轮机空蚀特性曲线

大;15~34MW 之间相对空蚀强度迅速下降,34MW 时相对空蚀强度最小;34MW 以后,其相对空蚀强度急剧上升。

(2)模拟计算结果表明,负荷为 40MW 时的相对空蚀强度约为 34MW 时的 1.4 倍;即相同条件下,在 40MW 运行时是 5 年检修一次,则运行在 34MW 左右时可以达到 6 年半才检修。结合 4 号机效率试验和振动试验的结果综合分析建议:机组最好在 25~34MW 之间运行,此时,效率为高效区,振动相对较小,相对空蚀强度也小。

(3)空蚀在线监测系统在八盘峡水电厂实现了全频段(20Hz~1MHz)计算机自动采集处理,通过分析研究,得出了空蚀强度与其他运行参数的规律,为水电厂

(下转第 66 页)

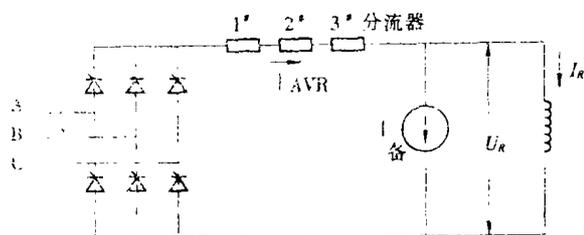


图5 调节器运行断开备励开关模拟电路(汲收)

4.3 “3.3”工况分析

当发电机运行于DC通道时,合备励开关的瞬间,主励转子电压瞬间升高,机端电流瞬间过负荷,无功剧增,一方面由于DC通道运行时,调节器AC通道输出被断开不再起调节作用,另一方面DC调节器检测磁场电流信号而工作,由于分流器安装于可控硅和备励并列点之前,测量不到主励磁场电流的实际值,即感受不到主励转子电流增加的效应,这样DC通道基本上维持原来的输出,所以发电机会出现过负荷,无功陡增。

4.4 “3.4”工况分析

当发电机由备用励磁转至DC通道运行时,即使备励感应调压器降到最低,拉开QF开关,三相全控整流桥直流输出电压波形的负向电压波形不再被削平,主励转子直流电压平均值下降,发电机转子电流下降,发电机无功大幅度降低甚至进相运行。而调节器DC通道基于上述理由不改变全控桥的输出,所以导致发电机无功大幅度下降。

5 问题解决及运行效果

从上述分析过程来看,如果调节器感受到主励磁机磁场电流的实际变化,也就是说1#和2#分流器测量值是主励磁机转子的实际电流,那么调节器的闭环调

节作用必将维持发电机的端电压、发电机的无功功率和主励磁机磁场电流恒定不变。在实践操作上将会可靠实现调节器和备励装置相互切换。我们对1#机主励一次电缆进行了重新改接,见图2中虚线所示。现将1#机改造后的实测数据归纳如下:

第一次	AC通道运行	合备励开关	断41E开关
	80MVA	86MVA	83MVA
第二次	DC通道运行	合备励开关	断41E开关
	60MVA	64MVA	62MVA
第三次	备励运行	合41E开关	断QF开关
	100MVA	100MVA	96MVA

从以上实测结果可以看出:三次切换过程中发电机的无功波动较小,不会对发电机造成冲击,实现了调节器和备励的相互可靠切换,提高了发电机安全可靠运行程度。

6 结论

成功解决了自动励磁调节器和备励相互切换问题,得出如下结论。

- (1) 对原存在自动励磁调节器和备励相互切换存在的问题的理论分析是正确的,解决措施简捷有效。
- (2) 解决措施可以推广应用在2#、3#、4#机组上。
- (3) 解决措施可以作为励磁系统设计改进的借鉴。

[收稿日期]2001-04-01

[作者简介]



孟庆武(1960-),男,1998年毕业于哈尔滨师范大学计算机专业,主要从事电机励磁控制的科研和调试工作,工程师。

(上接第46页)

的状态检修提供了有力的依据。

[参考文献]

- [1] 吴建红,王军.水轮发电机组的状态监测与故障诊断[J].水电厂自动化,1998,(10).
- [2] 曹洪恩.水电机组在线监测与诊断技术[J].水电厂自动化,1995,(10).
- [3] 张雪桂,陈启卷.大型水电厂设备状态监测及诊断系统[J].水力发电,1998,(11).
- [4] 滕小羽,唐国庆.水电厂设备状态监测[J].电力

系统自动化,2000,(5).

- [5] 徐敏,黄邵毅.设备故障诊断手册[M].西安:西安交通大学出版社,1998.
- [6] 冯辅周,储福磊.水电机组状态监测分析诊断系统的研制及应用实例[J].水力发电,1999,(5).

[收稿日期]2002-04-22



[作者简介]

王涛(1966-),1992年获西安理工大学硕士学位,讲师,主要从事水力机械及自动化方面的教学和科研工作。