

长引水系统水电站水力过渡过程仿真分析

耿新春

(新疆新华水电投资股份有限公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:针对长引水系统水电站在负荷变化时的安全问题,以压力管道非恒定流微分方程和特征线法为基础,基于MATLAB平台中SIMULINK方法,建立了一管四机的长引水系统水电站数值仿真模型,并对木扎提水电站水力过渡过程进行了仿真模拟,确定了调压室最高、最低涌浪,机组最大转速上升率及蜗壳进口最大压力。结果表明:在不同机组组成的电站系统中,大机组是水力过渡过程中的控制因素。

关键词:长引水系统;过渡过程;特征线;SIMULINK

中图分类号:TK730.2

文献标识码:A

Simulation analysis of hydraulic transient of hydropower station with long water transportation system

GENG Xin - chun

(Xinjiang Xinhua Hydropower Investment Co., Ltd., Xinjiang Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to ensure the safety of the hydropower station with long water transportation system while load changing, based on unsteady flow differential equations of pressure and characteristic - line method, a pipeline a numerical simulation model of the water power station with one chamber and four hydraulic turbine sets is built with SIMULINK of MATLAB platform. With the numerical model, the simulations of the hydraulic transition process of Muzhati hydropower station are conducted. The highest and the lowest surge, the rate of rise in maximum rotor speed of turbine set, the most pressure in spiral case inlet are calculated. The results show the large generator unit is a major gating factor during the hydraulic transient process in the complicated hydraulic station composed by different turbine sets.

Key words: long water transportation system; hydraulic transient; temperature field; characteristic - line method; SIMULINK

随着我国西部大开发战略的实施,新疆境内的水电开发加快,众多水利发电枢纽开工建设,有力促进了新疆的社会经济发展。新疆地区的水电站多为高水头引水式水电站,发电引水隧洞大部分长度超过5 km,部分引水隧洞甚至接近15 km。这种具有长引水隧洞的水电站引水系统,水流的惯性远远超过短引水系统水电站,调压室的波动周期长、振幅大、衰减慢^[1],蜗壳进口最大压力受管道水击压力与调压室涌浪压力两方面的控制^[2],这给水电站的设计及运行管理带来了很大的问题。

水电站的水力过渡过程,涉及到水力学、水轮机、电气系统的相互影响以及相互制约的联合过渡过程,直接关系到输水系统的优化设计和水电站的安全运行以及供电的品质^[3]。当水电站的工况发生变化时,引水系统的水流、高速运转中的水轮发电机组、配套的调速辅助设备、电气设备乃至整个电力系统都处于过渡过程之中,研究计算水电站过渡过程,面临着大量非线性的复杂问题^[4],要想真实模拟不同工况下水电站的运行过程,得到精确的仿真结果,传统的数解法和图解法已经不能满足现代水电站运行的精度要求。本文以木

扎提三级水电站为例,基于有压管道非恒定流数学模型和特征线法,利用计算机数值仿真解法,采用 MATLAB 作为计算平台,建立基于 SIMULINK 的水力过渡过程仿真模型,深入研究超长引水系统水电站过渡过程特性,对水电站的运行安全进行分析。

1 过渡过程数值模拟理论

1.1 引水发电系统过渡过程计算原理

目前引水发电系统水力过渡过程计算基本采用弹性水击基本方程^[5]。其中,运动方程见式(1):

$$g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\lambda v |v|}{2D} = 0 \tag{1}$$

连续方程见式(2):

$$v \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \tag{2}$$

式中, g 为重力加速度; H 为引水系统的断面测压管水头; D 为管道直径; λ 为沿程阻力系数; v 为断面的平均流速; s 为沿水流方向的长度,方向与恒定流时的水流方向一致; θ 为管轴线与水平线的夹角; α 为水击波的波速; t 为时间。

1.2 引水系统特征线法

弹性水击基本方程组是一组拟线性双曲偏微分方程组,很难直接求其解析解,可将偏微分方程组转化为特殊的全微分方程,即特征方程,然后再转化为一阶有限差分方程,求其近似解。

$$\text{沿 } c^+ : \begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} v \sin \theta + \frac{\lambda v |v|}{2D} = 0 \\ \frac{ds}{dt} = v + a \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{沿 } c^- : \begin{cases} \frac{dv}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} v \sin \theta + \frac{\lambda v |v|}{2D} = 0 \\ \frac{ds}{dt} = v - a \end{cases} \tag{4}$$

通过上述变换,把求解偏微分方程组转化为求解常微分形式的特征方程组。在推导特征方程组的过程中,没有做过任何数学近似,特征方程组的解就是原来偏微分方程组所描述的水击问题的解。

2 水电站过渡过程仿真分析

2.1 工程概况

木扎提河三级水电站是新疆木扎提河水电规划的三级电站,电站总装机容量为 200 MW,额定水头 355 m,电站装机两台单机容量为 80 MW 的大机和两台单机容量为 20 MW 的混流式水轮发电机。水电站引水隧洞约长 14 283 m,引水隧洞末端和压力管道上弯段前设置阻抗式调压井,竖井内径 $D=16$ m,外径 17.5 m,井筒高 63 m,压力管道为埋藏式,采长 1 653 m。

2.2 过渡过程仿真模型建立

木扎提水电站引水发电系统采用一洞一管四机的布置方式,根据隧洞断面、压力钢管的厚度等的不同,将引水隧洞分为 9 个节点,将压力钢管分为 3 个节点,其它节点的划分见图 1,其中 1#、2#机组为 20 MW,3#、4#机组为 80 MW。在对引水系统经过分析比较后,可以确定水轮机导水机构采用单段直线关闭规律即可满足要求,最终采用关闭时间为 10 s,水电站过渡过程计算简图见图 1。

2.3 基于 SIMULINK 的水电站过渡过程仿真模型

SIMULINK 具备了可视化的动态仿真环境,能够方便得采用模块直接构建系统框图^[6],通过输入传递函数,可以对水力过渡过程这样的高度非线性问题进行模拟仿真,故采用 MATLAB 下的 SIMULINK 直接构建木扎提水电站水力过渡过程仿真模型,如图 2 所示:

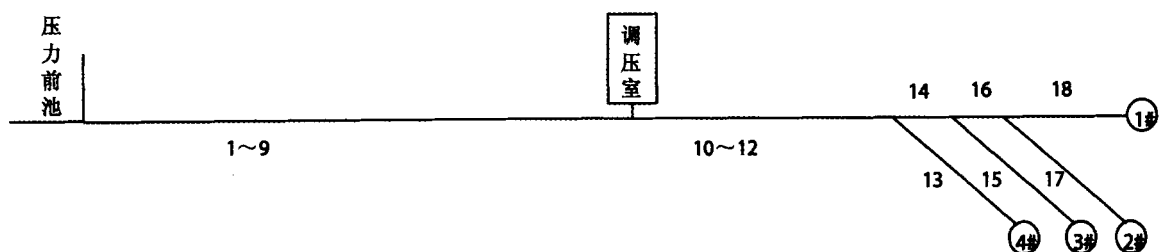


图1 水电站过渡过程仿真模型

Fig.1 The simulation model of transient process in hydropower station

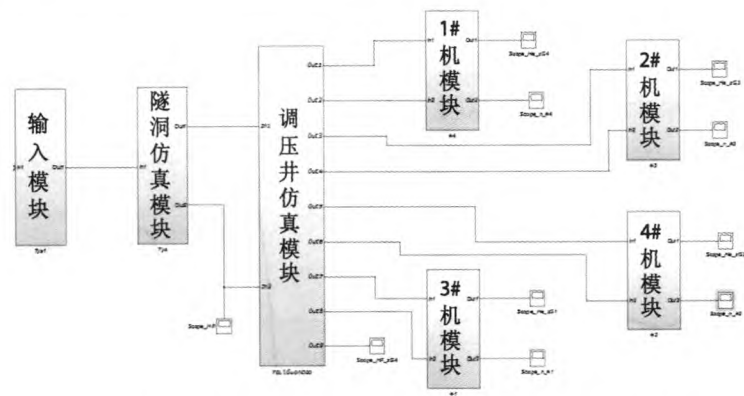


图2 基于SIMULINK的木扎提水力过渡过程仿真模型

Fig.2 The simulation model of transient process in Muzhati hydraulic station based on SIMULINK

表 1 引水系统控制值出现工况说明

Tab. 1 Table of rolling parameters

工况	上游水位 /m	下游水位 /m	工况说明	备注
T7	2 157.80	1 800.00	上游最高运行水位,下游设计水位,四台机相继从空载增至满负荷,当流入调压井流量最大时,四台机同时甩全负荷。	调压室最低涌浪控制工程
T12	2 156.30	1 801.16	额定水头,四台机相继从空载增至满负荷,当调压室涌浪水位最高时,四台机同时甩全负荷。	机组最大转速上升率控制工况
T13	2 157.80	1 803.59	四台机同时甩全负荷后,一台大机可以增负荷运行。	调压室最高涌浪、蜗壳进口最大压力控制工况

3 仿真结果及分析

水电站过渡过程数值计算需要确定调压室的最高、最低涌浪、蜗壳进口处最大压力和机组转速最大升高率等引水系统控制值,为了充分考虑各种负荷变化情况,共拟定了 14 种工况进行数值模拟仿真,这里列出了出现引水系统控制值的工况,见表 1。

图 3、图 4、图 5 给出了控制工况下的水力过渡过程的仿真结果曲线。

由图 3 可知,木扎提水电站出现的调压室最高涌浪水位为 2 178.27 m,出现在 T13 工况,调压室最高涌浪水位以上的安全超高为 1.73 m,满足安全大于 1 m 的要求;调压室最低涌浪水位为 2 121.24 m,出现在 T7 工况,调压室最低涌浪水位与调压室处压力引水道顶部之间的安全高度大于 3 m,调压室水深大于 2 m,均满足调保要求。由图 3(b)可以看出,当出现调压室最低涌浪时,由于四台机相继从空载到满负荷,引水系统内的流量和流速不断增大,调压室内的水量开始补充到引水道内,如果出现四机甩负荷,由于调压室水位达到最低,引水管道内的水大量涌入调压井,会导致引水系统的剧烈振荡,难以在短时间内恢复,会对水

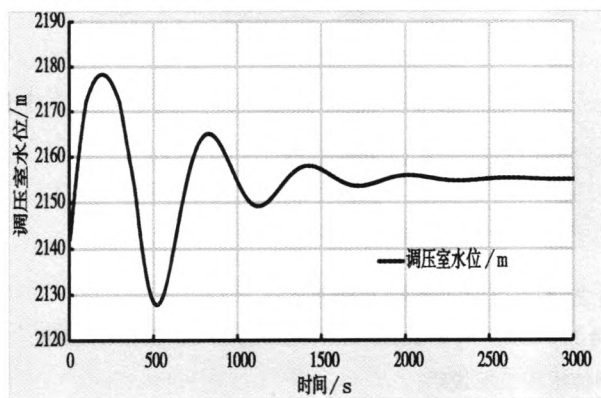
电站造成严重影响,因此要尽可能避免这种工况的发生。

蜗壳进口的最大压力为 440.56 m,出现在 T13 工况,小于机组引水管最大允许压力 460 m,满足调保要求。当机组甩负荷时,导叶关闭,水体由于惯性作用会在蜗壳进口处产生极大的水击压力并急剧振荡,由于木扎提采用了两台大机两台小机的布置,分岔管的引用流量不同,主管在各分岔管的由于水体惯性作用产生的流量变化有很大差异,从而导致 1#、2#机组蜗壳井口处水击压力(分别为 437.15 m 和 437.05 m)与 3#、4#机组的蜗壳进口处的水击压力(分别为 440.56 m 和 440.20 m)相差很大,而相同机组间则仅由分岔管长度的不同存在微小差异,由于 3#机组的引水道要略长于 4#机组,故最大水击压力出现在 3#机组蜗壳进口处。由图 4 可知,甩负荷后,当一台机组开始增负荷运行时,会对水击波的振荡产生干扰,使其加速平复,有利于水电站稳定运行。

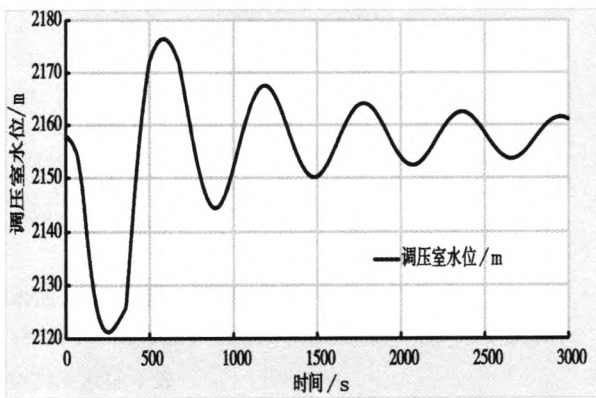
机组转速的最大升率在 T12 工况出现,发生 3#机组,由图 5 可知,机组的最大转速为 568.26 rmp,此时的转速上升率为 51.54%,小于 60%,满足设计要求,由于在计算过程中未考虑水体附加惯性的影响,实际的机组出现的实际最大转速应

小于计算值。此时1#机组的转速为1 120.07 rmp,但其最大转速上升率仅为49.34%,在其它工况小机组的转速上升率也均小于大机组,可以得

知,在安装有不同机组的水电站系统中,机组的最大转速上升率是由大机组控制。



(a) 调压室最高涌浪变化



(b) 调压室最低涌浪变化

图3 调压室最高、最低涌浪变化过程线

Fig.3 The variation curve of surge water level in surge chamber

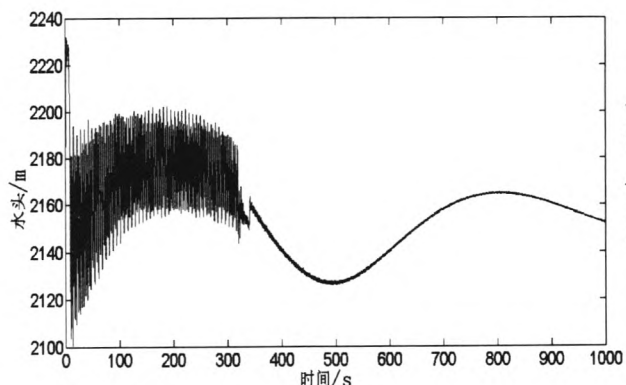


图4 蜗壳进口最大压力波动过程曲线

Fig.4 The maximum pressure fluctuation in spiral case inlet

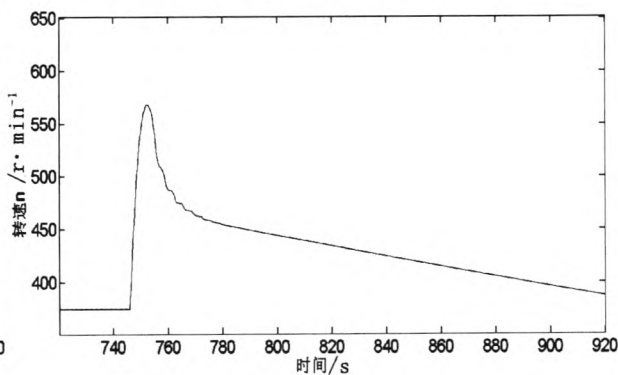


图5 机组转速变化过程曲线

Fig.5 The variation curve of unit rotation speed

4 结论

(1)水电站过渡过程仿真结果表明:木扎提引水系统调压室最低涌浪出现后,振荡时间要远长于最高涌浪,对引水系统的平稳运行具有更大的影响。

(2)对于安装有不同特性机组的水电站,大机组对于蜗壳进口最大压力和机组最大转速上升率具有控制作用,这两个极值均出现在引水道最长的大机组处,因此在水电站设计和运行过程中要对大机组给予更多的关注。

参考文献:

[1] 付亮,杨建东,王健伟. 超长引水隧洞水电站大波动过

渡过程特殊问题[J]. 中国农村水利水电,2006(9): 112-115.

[2] 杨建东. 导叶关闭规律的优化及对水力过渡过程的影响[J]. 水力发电学报,1999(2):75-83.

[3] 张鹏. 水电站水力过渡过程的数值仿真及参数优化[D]. 武汉:武汉大学水利水电学院,2007.

[4] 习华勇,成莹. 水电站站内运行优化通用系统设计[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(4): 71-73.

[5] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[6] 孙少伟,郭兴众,陆华才. 矩阵式变换器PMSM直接转矩控制系统[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(4):83-86.

(责任编辑 王利君)