

抽水蓄能电站水力装置系统动态过程仿真^①

刘竹青^② 常近时

(中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要 针对抽水蓄能电站混流式水泵水轮机的运行特点,采用内特性解析理论,建立了复杂水力装置系统计入弹性效应的水轮机甩负荷过渡过程的仿真数学模型。采用进程交互法,建立了抽水蓄能电站水轮机工况甩负荷过渡过程的仿真模型。应用该模型,结合十三陵抽水蓄能电站运行实际编制了相应的仿真软件,取得了满意的效果。

关键词 内特性解析;抽水蓄能电站;仿真;动态过程

分类号 TK 730.1

Study on Dynamic Processes Simulation of Hydraulic Equipment System of Pumped Storage Plant

Liu Zhuqing Chang Jinshi

(College of Water Conservance and Civil Engineering, CAU)

Abstract On the basis of the operating characters of mixed-flow pump-turbine in pumped storage plant, the simulation model, which is of complicate hydraulic system's, of rejection transient when the unit was working as turbine, were founded through the internal analysis method and the elasticity was also considered. The simulation model of the rejection transient was developed through the method of process interaction. The corresponding simulation software was developed Liu according to the operation situation of Shisanling pumped storage plant.

Key words internal character analysis; pumped storage plant; simulation; dynamic processes

电力系统需要调峰调频和备用容量,抽水蓄能电站是最佳选择。我国电力系统容量越来越大,对抽水蓄能电站的需求也日益增多^[1]。由于抽水蓄能电站具有结构复杂、工况多变、起停频繁、双向运行、高水头、大容量等特点,使得其水力装置系统动态过程的仿真十分复杂。我国水电系统的仿真起步较晚,国内尚无抽水蓄能电站全范围仿真机。全范围仿真机应达到电站系统全范围、工作流程全过程的高逼真仿真。在抽水蓄能电站可逆机组的所有可能出现的过渡过程中,水轮机工况甩负荷的过渡过程是最主要的。这类过渡过程在很大程度上决定了机组运行的可靠性和造价,是蓄能电站仿真机所要仿真的重点对象。

收稿日期:1999-04-22

①高等学校博士学科点专项科研基金资助

②刘竹青,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)214信箱,100083

1 仿真数学模型^[2,3]

水轮机工况甩负荷过渡过程的仿真宜采用基于水泵水轮机原型诸动态工况参数内特性解析的特征线法。采用此法时,将水泵水轮机视为系统中的复杂水力元件边界。此方法突出的优点是尤适于仿真计算。对于混流式水泵水轮机,其转轮直径比一般的混流式水轮机大30%~40%,具有相对较长的径向流道,水轮机的流量特性受转轮旋转时的离心效应的影响较大。当机组甩负荷后导叶接近全关转速较高时,水轮机的流量为负值。这表明,过渡过程中水泵水轮机的工况参数不仅发生数值上的大幅度变化,而且某些参数的符号也发生变化。因此,应针对水泵水轮机不同的工作状态采取分段计算。

忽略转轮中的水流惯性,由内特性解析的特征线法,可得出水轮机工况甩负荷过渡过程的仿真数学模型:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= C_3 - C_4 H_1 \\ v_2 &= C_1 + C_2 H_2 \\ v_1 A_1 &= v_2 A_2 = Q_H \\ H_{2P} &= H_1 - H_2 \\ H_{20} &= Y_1 - Y_2 - Y_{S(1)} + Y_{S(2)} \\ M_H &= M_H(Q_H, \omega_H, a) \\ Q_H &= Q_H(H_{2P}, n_H, a) \\ \omega_H &= \omega_0 + \frac{1}{J} \int M_H dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} C_2 &= C_4 = g/a \\ C_1 &= v_S - \left(\frac{g}{a} \right) H_S + \left(\frac{g}{a} \right) \Delta t v_S \sin \alpha - \frac{f}{2d} \Delta t v_S |v_S| \\ C_3 &= v_R - \left(\frac{g}{a} \right) H_R + \left(\frac{g}{a} \right) \Delta t v_R \sin \alpha - \frac{f}{2d} \Delta t v_R |v_R| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里 M_H 和 Q_H 对于不同的工作状态(水轮机工况、制动工况、反水泵工况)其形式不同。下标 $H, 0$ 分别表示动态和静态工况,下标 $1, 2$ 分别表示进口处(上游)和出口处(下游), S, R 为截面符号。方程组中各参数的具体含义如下:

- | | |
|------------------|---------------------|
| Q ——流量; | Y_S ——调压室相对水库的水位; |
| M ——力矩; | H ——势能头; |
| ω ——角速度; | A ——过水断面积; |
| n ——转速; | a ——水击波速; |
| v ——流速; | α ——管线倾角; |
| H_{2P} ——装置水头; | d ——管道直径; |
| J ——转动惯量; | f ——水力摩阻因数; |
| Y ——水库水位; | g ——重力加速度。 |

在采用该数学模型时,需要给出甩负荷过渡过程中导叶的关闭规律,同时注意与调压井等

边界条件相结合。有关调压井的边界问题可参见文献[2]。

2 仿真模型^[3,4]

2.1 仿真策略及模型非形式描述

对抽水蓄能电站动态过程仿真时,可将整个抽水蓄能电站视为一个离散事件系统。通过对目前比较成熟的 3 种仿真策略即事件调度、活动扫描和进程交互法的比较,结合所研究系统的特点,笔者认为对抽水蓄能电站进行仿真时宜采用进程交互法为好。该法既可预定一事件,又可对条件求解,因而兼有事件调度法及活动扫描法两者的优点。

进程交互法采用进程描述系统,它将模型中的主动成分历经系统时所发生的事件及活动按时间顺序进行组合,从而形成进程表,一个成分一旦进入进程,它将完成该进程的全部活动。软件实现时,系统仿真中的控制程序采用 2 张事件表:其一是当前时间表 CEL(current events list),它包含了从当前事件点开始有资格执行的事件记录;其二是将来时间表 FEL(future events list),它包含将来在某个仿真时刻发生的事件记录。每一个事件记录中包含该事件的若干属性,其中必有一个属性说明该事件在进程中所处的位置指针。进程交互法仿真策略的算法如下:

执行初始化操作,包括

设置开始时间 t_{start} , 结束时间 t_{end}

设置初始化事件,并置于 FEL 中

将 FEL 中有关事件记录于 CEL 中

成分状态初始化

设置系统仿真钟 $t_{IME} = t_{start}$

While($t_{IME} \leq t_{end}$) 则执行

1) CEL 扫描

While(CEL 中最后一个记录未处理完) 则

While(Dai(S) = True 且当前成分为处理完) 则

执行该成分的活动

确定该成分的下一事件

endWhile

endWhile

2) 推进仿真钟

$t_{IME} = \text{FEL 中安排的最早时间}$

If($t_{IME} \leq t_{end}$) 则

将 FEL 中所在 t_{IME} 时刻发生的事件记录移到 CEL 中

endIf

水力系统仿真模型的主动成分包括引水闸门、尾水闸门、球阀及导叶等,被动成分包括水泵水轮机、引水调压井、尾水调压井、蜗壳进口、尾水管进口、引水隧洞、尾水隧洞、上游水库、下游水库等;相关系统的仿真模型的成分包括发电电动机、主断路器、压气装置、励磁装置等。表 1 给出了模型部分非形式描述的示例。

表1 仿真模型部分成分非形式描述的示例

成分	活动/事件	描述变量
引水闸门 (水力系统仿真模型 的主动成分)	开启	(igopst, igop)引水闸门于 igopst 开启所需时间为 igop
	关闭	(igclst, igcl)引水闸门于 igclst 开启所需时间为 igcl
	状态	(igst)引水闸门的开启/关闭状态
水泵水轮机 (水力系统仿真模型 的被动成分)	静止	转速
	发电	流量、水头、转速、出力
	甩负荷	流量、水头、转速、出力、转轮进出口压力
励磁装置 (相关系统的仿真 模型的成分)	开启	(lco)励磁装置开启
	关闭	(lcl)励磁装置关闭
	状态	(lcs)励磁装置的开启关闭状态

2.2 仿真流程

甩负荷过渡过程的仿真重点是对水力系统动态参数的仿真计算,仿真目的是通过选取不同的导叶关闭规律来研究水力系统的动态品质,仿真电站实际运行中不允许出现的各种危及电站安全的严重事故。采用进程交互法仿真策略的算法,确定 $t_{\text{IME}}=0$ 时刻的当前事件表 CEL 及将来事件表 FEL,进而得到仿真流程。表 2 给出了 $t_{\text{IME}}=0$ 时刻的 CEL。最后利用所建立的甩负荷过渡过程仿真数学模型进行仿真计算。

表2 $t_{\text{IME}}=0$ 时刻的 CEL

序号	事件	事件在进程 中的位置	事件属性	事件发 生时刻	事件发生条件
1	电力系统或电站线路故障	1	引起 2,3,4 发生	0	机组在水轮机满负荷发电工况
2	断路器断开	2		0	1 发生
3	机组与系统解列	2		0	2 发生
4	导叶开始关闭	2		0	1,2 发生

3 仿真实例

根据上述仿真数学模型和仿真模型,以十三陵抽水蓄能电站为参考电站,在中文 Windows NT 环境下,采用 Visual C++ 5.0 编制了甩负荷过渡过程的仿真软件。针对不同的导叶关闭规律,用曲线同步实时显示机组转速、流量、调压室水位波动、蜗壳进口压力和尾水管进口压力变化趋势及数值,在上述参数超过调节保证时发出报警信号。该软件还具有仿真进程控制等系统功能。

3.1 电站原始数据

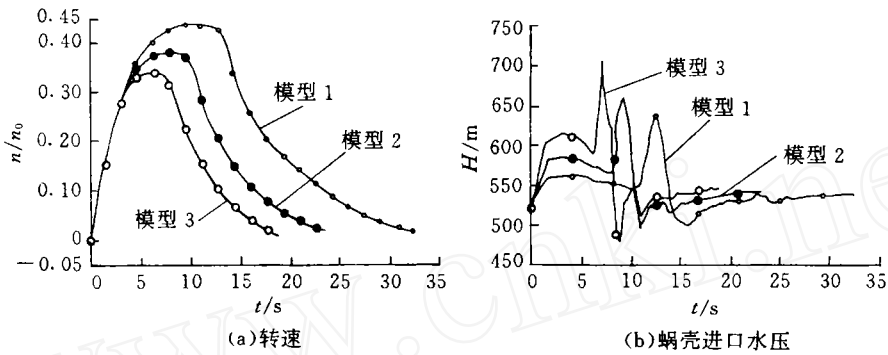
电站共装 4 台 200 MW 的混流式可逆水泵水轮机,电站及机组的基本参数如下:最高水头(水轮机工况) $H_{\text{max}}=474.8$ m,设计水头(水轮机工况) $H_r=430.0$ m,最小水头(水轮机工况) $H_{\text{min}}=418.2$ m,转轮直径 $D_1=3.679$ m,额定转速 $n_r=500$ r·min⁻¹,机组转动惯量 $GD^2=2563$ t·m²。

3.2 调节保证要求

在最不利的过渡过程工况,调节保证参数为:机组最高转速不大于 $725 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,蜗壳进口中心线处最大水头不大于 690 m 、最小水头不小于 350 m 、尾水管进口处最低压力不小于 0 m 、最大压力不大于 130 m 。

3.3 仿真结果

按照软件包的提示,依次进行仿真计算,仿真的部分结果如图1所示。



模型 1,2,3 分别代表最高水头、设计水头和最低水头 3 种工况

图 1 动态瞬变规律

4 结束语

探讨了进程交互法作为抽水蓄能电站仿真策略的可行性。仿真计算结果证明了在抽水蓄能电站水力装置系统动态过程仿真中采用内特性解析理论是正确的。这为进一步研究抽水蓄能电站水力装置系统动态过程仿真提供了一定基础。

参 考 文 献

- 1 梅祖彦. 抽水蓄能技术. 北京:清华大学出版社,1988. 4~7
- 2 常近时. 水力机械过渡过程. 北京:机械工业出版社,1991. 158~161
- 3 常近时,白朝平. 高水头抽水蓄能电站复杂水力装置过渡过程的新计算方法. 水力发电,1995(2):24~28
- 4 艾 明. 大型抽水蓄能电站动力系统动态过程仿真:[学位论文]. 北京:中国农业大学,1998