

# 电力系统中长期稳定分析用联合供水水电机组非线性仿真模型

汤 凡,丁理杰,张 华,滕予非,魏 巍

( 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 针对共用长引水系统的水电机组间的水力耦合关系,推导建立其数学模型,并根据电力系统仿真计算的需求,对模型进行降阶处理。针对水电站调压井结构复杂的特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法。模型综合考虑了调压井和共用引水管段对电力系统中长期动态过程的影响,仿真结果与实测扰动响应的对比表明,模型具有较高的精度,可作为现有电力系统仿真计算用水电机组模型的有效补充。

**关键词:** 水轮机模型; 中长期稳定; 电力系统仿真; 水力耦合; 结构系数

**Abstract:** Based on the theoretical derivation of hydro-mechanical coupling relationship between the hydroelectric generating sets sharing the long common conduit, the nonlinear hydro turbine model with sharing long diversion system is established and order-reduced in accordance with the demand of power system simulation. According to the characteristics of complex structure of surge shaft, a method to correct the overflow time constant of surge shaft with its structure coefficients is proposed. This hydro turbine model can reflect the influence of surge shaft and sharing common conduit on the long term dynamic process in power system, the accuracy of model is proved by the comparison of simulation results and actual recording data in power system, which can be used as part of the hydroelectric generating set model for the simulation and calculation of the existing power system.

**Key words:** hydro turbine model; middle and long term stability; power system simulation; hydro-mechanical coupling; structure coefficient

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0086-05

特殊的地理条件使得一些水电站使用长引水涵洞与上游水库相连,并在涵洞下游末端采用分叉压力钢管。由于水轮机出力由水头和流量共同决定,因此共用引水管段的水力耦合特性导致末端水电机组出力和调节特性存在关联作用。这对电力系统的 AGC 控制、安控布置以及中长期稳定过程等均带来一定程度的影响。

要准确分析水电厂在扰动后的动态响应及对电力系统的影响,必须依赖全过程动态仿真中控制保护和动态元件的模型准确度<sup>[1]</sup>。但目前对于含长引水系统的一管多机水电站仍缺乏准确的计算模型。电力系统暂态仿真程序广泛使用的理想水轮机模型和刚性水击模型仅适用于一管一机系统<sup>[2]</sup>。全过程动态仿真程序<sup>[3]</sup>虽然提供了一管多机水轮机模型,但该模型不能计及长引水管道条件下调压井的动态响应对机械转矩的影响。针对大扰动下水电站动态特性对系统行为的影响,IEEE 联合工作组

于 1992 年提出了包括刚性水击、弹性水击的单引水管水轮机模型和共用引水管水轮机模型<sup>[4]</sup>,为电力系统的仿真计算提供了有力参考。而后陆续有文献<sup>[5-6]</sup>针对不含调压井的一管多机系统的建模和解耦控制问题开展研究。实际应用中,针对共用长引水管道水电机组,必须综合考虑调压井和涵洞中的水力耦合作用对动态过程的影响,现有模型库无法满足该需求。

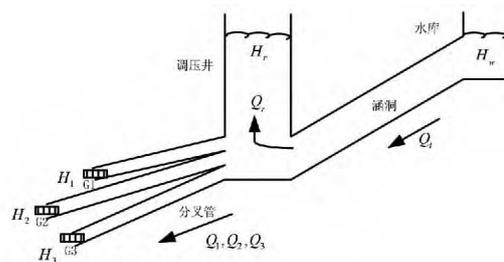


图 1 含调压井的水力系统

基于理论推导,提出一种共用长引水系统的水电机组仿真模型,综合考虑调压井和长引水隧洞水

力过程对机组动态特性的影响,仿真结果与实测数据的对比表明,模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应。

## 1 含调压井的弹性水击模型

对于任意一段引水管道,考虑水管的弹性后,由水力方程<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial H}{\partial t}$$

可解得

$$H_b = H_a \operatorname{sech}(T_e s) - Z_0 Q_b \tanh(T_e s) \quad (2)$$

$$Q_a = Q_b \cosh(T_e s) + \frac{1}{Z_0} H_b \sinh(T_e s)$$

式中  $H_a$ 、 $H_b$  分别为水管两端的水头;  $Q_a$ 、 $Q_b$  为两端流量;  $T_e$  为水管的弹性时间,由管长  $L$  与波速  $a$  决定,即

$$T_e = \frac{L}{a} = \frac{L}{\sqrt{g/\alpha}} \quad (3)$$

式中  $\alpha$  由管壁厚度、管道面积、水体压缩模量、管材弹性模量等因素决定。

对图1中的涵洞,运用式(2),并以标幺值方式表示,有

$$h_r = h_w \operatorname{sech}(T_{eT} s) - Z_T q_T \tanh(T_{eT} s) \quad (4)$$

涵洞上游端的水头偏差为0,即  $h_w = 1$ ,因此式(4)写为

$$h_r = 1 - Z_T q_T \tanh(T_{eT} s) \quad (5)$$

再利用涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,有

$$q_T = q_r + q_1 + q_2 + q_3 \quad (6)$$

忽略调压井中的波动过程,有调压井流量和水头间的关系

$$Q_r \Delta t = (H_r - H_{r0}) S_r \quad (7)$$

则

$$Q_r = \frac{\partial(H_r - H_{r0}) S_r}{\partial t} = \frac{\partial H_r}{\partial t} S_r \quad (8)$$

以标幺值和微分算子表示式(8),有

$$q_r = s T_s h_r \quad (9)$$

式中  $T_s$  为调压井的溢水时间常数,  $T_s = S_r =$  调压井面积。

将式(6)、(9)代入式(5)得

$$h_r = \frac{1 - Z_T(q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_{eT} s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_{eT} s)} \quad (10)$$

同样对每条分叉管,应用式(4),可得

$$h_i = h_r \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

式中  $T_{ei}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别为3条分叉管的弹性时间;  $Z_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为3条引水管的水力阻抗,因此

$$h_i = \frac{1 - Z_T(q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_{eT} s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_{eT} s)} \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

上式不适应于大规模电力系统仿真计算,因此考虑对模型进行降阶处理。

## 2 降阶模型

因为

$$\tanh(T_s) = \frac{1 - e^{-2T_s}}{1 + e^{-2T_s}} = \frac{s T \prod_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{s T}{n \pi} \right)^2 \right]}{\prod_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{2s T}{(2n-1) \pi} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

则当  $n=0$  时,

$$\tanh(T_s) = T_s \quad (14)$$

即假设水柱是无弹性的,针对图1中水力系统,可将式(4)改写为

$$H_r = H_w - Z_T Q_T T_{eT} s \quad (15)$$

再考虑调压井水头和流量的关系以及涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,可推导出

$$H_r = \frac{H_w - Z_T(Q_1 + Q_2 + Q_3) T_{eT} s}{1 + Z_T T_s T_{eT} s^2} \quad (16)$$

由于涵洞上游水库水头偏差为0,则

$$H_w - H_r = \frac{Z_T(Q_1 + Q_2 + Q_3) T_{eT} s}{1 + Z_T T_s T_{eT} s^2} \quad (17)$$

对每个分叉管而言

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} \frac{dQ_i}{dt} \quad (i=1, 2, 3) \quad (18)$$

设  $Q_{i0}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为各分叉管的额定流量,定义  $q_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为对应的流量标幺值。

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{i0}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (19)$$

则式(17)和式(18)变换为

$$H_w - H_r = \frac{Z_T T_{eT} s (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3)}{1 + Z_T T_s T_{eT} s^2} \quad (20)$$

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} s (Q_{i0} q_i) \quad (i=1, 2, 3)$$

即

$$H_w - H_i = \frac{Z_T T_{eT} s}{1 + Z_T T_s T_{eT} s^2} (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3) + \frac{L_i}{S_i g} s (Q_{i0} q_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (21)$$

令  $H_B$  为额定水头, 并令  $H_B = H_w$ , 式(21) 两边同除以  $H_B$ , 有

$$1 - h_i = \frac{Z_T T_{eT} s}{(1 + Z_T T_s T_{eT} s^2) H_B} (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3) + \frac{L_i Q_{i0}}{S_i g H_B} s q_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (22)$$

令

$$T_{wTi} = Z_T T_{eT} \frac{Q_{i0}}{H_B} \quad C_{si} = T_s \frac{H_B}{Q_{i0}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (23)$$

$$T_{wpi} = \frac{L_i Q_{i0}}{S_i g H_B}$$

$T_{wTi}$ 、 $T_{wpi}$ 、 $C_{si}$  分别为以 3 条引水管额定参数规格化的涵洞、分叉管水锤时间常数和调压井溢水时间常数, 则

$$\begin{bmatrix} 1 - h_1 \\ 1 - h_2 \\ 1 - h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} + T_{wP1} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} \\ \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} + T_{wP2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} \\ \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} + T_{wP3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s q_1 \\ s q_2 \\ s q_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由此可建立含调压井和分叉管的水轮机模型, 当图 1 中 3 条分叉管的参数一致时, 其仿真模型可以图 2 中框图表示。

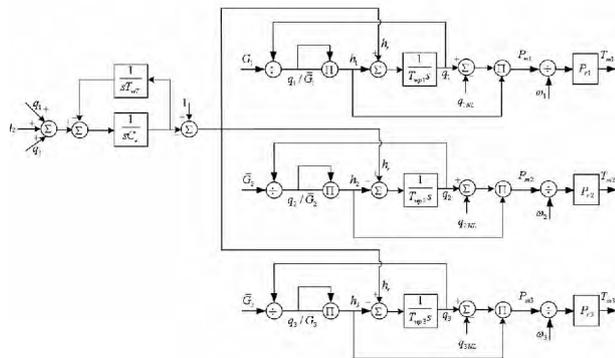


图 2 共用长引水管道的水轮机模型

### 3 特殊调压井的处理

图 1 中调压井尺寸均匀, 上下孔径一致, 实际许

多水电站的调压井可能由竖井和上室组成, 并且调压井连接管与竖井内径也不相同, 如图 3 所示。对于图 3 所示的阻抗式调压室, 由于水流在阻抗孔口处消耗了部分能量, 可以有效减小调压井中水位波动振幅。但阻抗的存在, 也导致水波不能完全反射, 使得压力引水管道受到水击的影响。

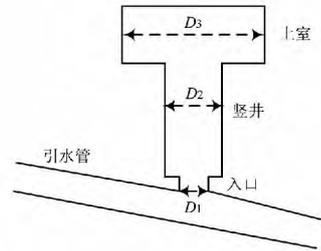


图 3 阻抗型调压井模型

特殊的结构使得调压井的阻抗系数很难确定, 并且其值也随着过渡过程中流量、水位等不断变化。在水力过渡过程计算中, 调压井阻抗系数一般依据 Gardel 公式、模型试验和 CFD<sup>[8-10]</sup> 计算来取值。对于电力系统时域仿真而言, 需要阻抗系数随工况动态取值, 利用显式公式表示不但繁杂而且也无法准确表示某些特殊结构下的准确值。这里提出调压井结构系数  $k$  动态修正调压井溢水时间常数, 以模拟过渡过程中压力引水管道受到阻抗口影响的水头变化。

图 4 所示为含结构系数  $k$  的引水管和调压井部分仿真模型,  $C_s$  为竖井段的溢流时间常数, 结构系数  $k$  随调压井水头变化, 准确值可通过机组负荷试验或详细的流体力学计算获得。简单起见, 可利用分段函数近似表示  $k$  为

$$k \approx \begin{cases} K_1 & (h \leq h_1) \\ K_2 & (h_1 < h \leq h_2) \\ K_3 & (h_2 < h) \end{cases} \quad (25)$$

式中  $h_1$ 、 $h_2$  分别表示了调压井在不同截面面积处的高度。

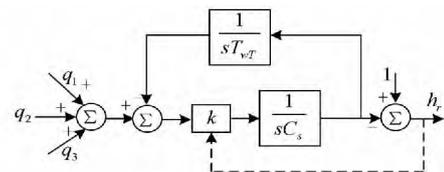


图 4 含结构系数的引水管和调压井模型

### 4 仿真计算

算例 1: 某采用一管三机的水电站, 其额定水头

92 m, 单机引用流量  $62 \text{ m}^3/\text{s}$ , 引水隧洞长 22.975 km, 衬砌后截面积  $45.3 \text{ m}^2$ , 圆筒型调压井内径 22 m, 压力钢管内径 5.8 m, 总长 391.3 m。试验运行工况为: 3 号机停机, 1 号、2 号机以开度模式运行, 一次调频功能投入, 1 号机 AGC 退出运行, 2 号机 AGC 闭环。

图 5、图 6 中虚线分别为 1、2 号机在 2 号机 AGC 闭环试验时的机组有功功率曲线。可见, 由于 1、2 号机共用引水隧洞, 2 号机快速降出力, 导致水压升高, 使得 1 号机在定开度模式下出力明显抬升, 抬升峰值接近机组额定功率的 20%。由于该电厂 AGC 只下发一次 AGC 指令, 监控系统在功率到位后即退出功率闭环, 因此机组间的水力耦合将影响到电厂 AGC 的执行精度。

由于试验中机组调速系统采用开度模式, 并且功率调节过程中一次调频未参与动作, 因此图 5 中功率曲线代表了该复杂引水系统在受扰后的响应, 能够反映引水系统和水轮机的动态特性。按照式 (23) 计算机组参数, 并采用图 2 所示模型模拟引水系统和水轮机, 仿真结果如图 5、图 6 所示。可见仿真结果与实测曲线吻合较好。

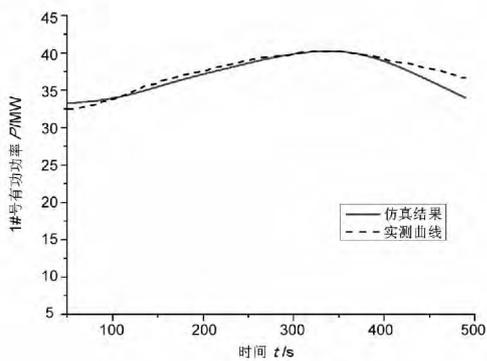


图 5 1 号机组有功功率曲线

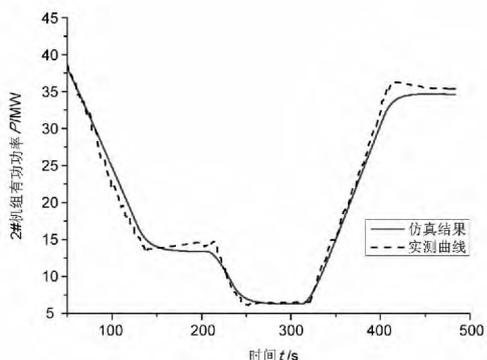


图 6 2 号机组有功功率曲线

算例 2: 某采用一管两机系统, 其额定水头 288

m, 单机引用流量  $232.5 \text{ m}^3$ , 引水隧洞长度 16.67 km, 衬砌后截面积  $100.1 \text{ m}^2$ , 阻抗型调压井、竖井段直径 21 m, 压力钢管内径 6.5 m, 长度 584 m。该电站为某特高压直流输电工程的龙头电站, 其特殊的引水隧道和调压井结构对电力系统动态过程具有较大影响。

图 7 所示为某次直流双极闭锁故障下 2 号机组安控切机后的 1 号机组功率曲线。由于 2 号机组断路器动作后迅速关闭阀门, 导致 1 号机水压升高, 造成机组出力抬升, 峰值接近额定容量的 21%。由于机组容量大, 在系统中地位重要, 1 号机的动态响应特性加大了事故后交流断面功率越限的风险。并且, 该电站作为直流工程的配套电源, 某些方式下可能采取孤岛运行方式, 其引水系统的动态过程也将对直流送端孤岛系统的频率稳定性产生影响。

采用含结构系数的调压井和引水系统模型, 并采用分段函数近似描述结构系数  $k$ , 建立该电站的仿真模型, 按照故障前方式设置模型运行条件, 仿真结果如图 7 所示。可见, 仿真结果在有功功率波动峰值、变化率等方面均具有较高精度。而对于阻抗型调压井, 如果不考虑调压井的阻抗系数变化, 虽然机组有功波动峰值一致, 但其动态过程会与实际情况存在较大误差, 如图 7 所示。因此对于含阻抗型或其他复杂类型调压井的水电站, 应在仿真模型中详细计入调压井的动态特性影响。

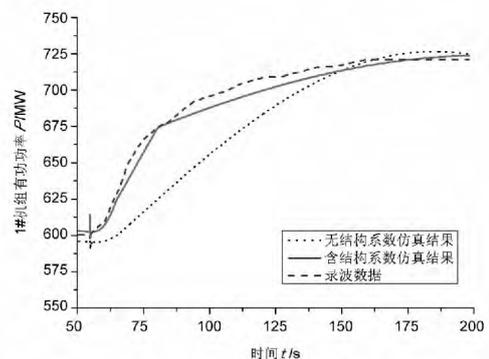


图 7 2 号机组安控切机后 1 号机组有功功率曲线

由于对引水涵洞、分叉压力钢管和调压井时间常数的计算仅利用了部分尺寸参数, 因此不可避免与实际录波曲线存在误差。但该方法可应用于已知少量水力参数条件下的前期规划研究和快速建模分析。水电站投产后, 通过原动机建模试验开展对水锤时间常数的实测可有效提高模型的精确度。

## 5 结 论

(1) 针对一管多机长引水系统水电站的动态响应特点,提出适应电力系统中长期稳定分析的水轮机降阶模型。

(2) 针对水电站调压井结构复杂、阻抗系数难以确定等特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法,提高仿真模型的准确性。

(3) 与电网实测扰动数据的对比分析表明,该模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应,可用于此类特殊布置水电站的安全稳定性分析。

### 参考文献

- [1] 高慧敏,刘宪林,徐政.水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J].电网技术,2005,29(2):5-9.
- [2] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-30.
- [3] 汤涌,宋新立,刘文焯,等.电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J].电网技术,2002,26(11):20-25.
- [4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies[J]. Transactions on Power System,1992,7(1):167-179.

(上接第85页)

方法计算出的影响系数差别不大,因此,对于复杂的函数建议采用小扰动分析法;从表3知,热耗率的不确定度超出了标准的要求,主要是主蒸汽流量的不确定度太大,功率不确定度也没达到标准要求。

## 5 结 论

主要介绍了汽轮机热耗率不确定度的分析计算过程,并给出了计算实例,从数据中可以看出,主蒸汽流量、功率和温度对热耗率产生的不确定度影响比较大,压力测点对测量结果的不确定度影响较小。因此,可在试验过程中考虑降低这些参数的不确定度,如增加重要测点个数、用精度较高的温度测温元

- [5] Hannett L. N, Feltes J. W, Fardanesh B, et al. Modeling and Control Tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1407-1414.
- [6] 曾云,张立翔,郭亚昆,等.共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J].中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.
- [7] Kunder P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] DL/T 5058-1996,水电站调压室设计规范[S].
- [9] 程永光,杨建东.用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J].水力学报,2005,36(7):787-792.
- [10] 付亮,王义国.有调压井水电站甩负荷试验与仿真分析[J].水电能源科学,2012,30(6):154-157.

作者简介:

汤凡(1984),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

丁理杰(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

张华(1985),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

滕予非(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

魏巍(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期:2014-02-11)

件和减少系统不明泄漏率等。

### 参考文献

- [1] ASME PTC-2004. Steam Turbines Performance Test Codes [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [2] ANSI/ASME PTC-6 REPORT 1985. Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1986.

作者简介:

张志恒(1977),硕士研究生,工程师,主要从事发电厂设备调试和性能试验方面的研究。

收稿日期:2014-04-08)