

白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰稳定性分析

陈益民¹,程文超²,周建旭²,杨飞¹,孙洪亮¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要: 由于白鹤滩水电站单机容量巨大,机组运行水头变幅大,且尾水隧洞流态复杂多样,因而水力干扰过渡过程的分析与控制是保障系统安全稳定运行的重要前提。基于有压输水系统特征线法,引入明渠水流分析的特征隐式格式,推导得到尾水隧洞明满流计算分析模型,同时考虑调速器频率调节模式,构建了输水发电系统稳定性分析和调控模型,对白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰稳定性进行了分析。结果表明:考虑尾水系统多流态特性的白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰过渡过程是稳定的;随着机组运行水头的增大,尾水系统由全线有压状态过渡到明满流和明流流态,有压段长度缩短,尾水调压室水位和尾水系统动态过程的衰减加速,有利于改善受扰机组的调节品质;两种不同的机组型号均能满足输水发电系统水力干扰稳定性要求,且受扰机组调节品质基本一致。

关键词: 输水发电系统;水力干扰;稳定性分析;明满流;白鹤滩水电站

中图分类号:TV134 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0078-07

Stability analysis on hydraulic disturb in water conveyance and hydropower system of Baihetan Hydropower Station//CHEN Yimin¹, CHENG Wenchao², ZHOU Jianxu², YANG Fei¹, SUN Hongliang¹(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Baihetan Hydropower Station has a huge capacity of single unit with the layout of two units sharing a common tailrace surge chamber and tailrace tunnel. Since various and complex flow pattern exist in the tailrace tunnel, analysis and control of hydraulic disturb transition is an important prerequisite to ensure safe and stable operation of the system. Based on the Method of Characteristic for pressurized water conveyance system, the characteristic implicit format of free-surface flow analysis was introduced, and the mathematical model of the free-surface-pressurized flow in tailrace tunnel was derived. The stability analysis and regulation model of water conservancy and hydropower system was constructed considering the frequency regulation mode of the governor and stability analysis of hydraulic disturb was analyzed. The results show that the transition process of hydraulic disturb in Baihetan Hydropower Station is stable with the effect of various flow patterns in tail tunnel system. With the increase of unit operating head, the tailwater system transits from completely pressurized state to free-surface-pressurized flow state and free-surface flow state. The length of pressurized part decreases, and the water level of the tailwater surge chamber and the dynamic process of tailwater system decay faster, which is conducive to improve the regulation performance of the disturbed units. Both the two different unit types meet the stability requirements on hydraulic disturb of water conveyance and hydropower system, and the regulation performance of the disturbed units is basically the same.

Key words: water conservancy and hydropower system; hydraulic disturb; stability analysis; free-surface-pressurized flow; Baihetan Hydropower Station

水电站输水发电系统的稳定运行是保障电网安全可靠的重要前提。在水电站运行实践中,水力系统、机械系统以及电气系统的特性相互耦合,直接影响水电站的安全稳定运行^[1]。因此,应针对水电站输水发电系统开展全面的稳定性分析,对于两机或多机共水力单元的情况,甩荷或增荷机组对运行机组的影

响较为突出,应着重进行水力干扰稳定性分析。
在对水电站水力-机械系统进行稳定性分析时,常采用刚性模型或低阶弹性模型^[2-3]来描述水体的动态特性,并将描述系统动态特性的微分方程线性化,得到状态方程组,通过数值求解以评估系统的稳定性和机组的调节品质^[4-6],或者推导出相应的特征

方程或传递函数,进行调节控制研究^[7-9]。针对水电站稳定性,诸多学者开展了较为广泛而深入的研究。杨建东等^[10]研究了上下游双调压室系统稳定域的变化规律,推导出稳定域干涉点和共振点的解析公式。郭文成等^[11]建立了水轮机调节系统非线性数学模型,将 Hopf 分岔理论应用到变顶高尾水洞水电站水轮机调节系统的稳定性研究。Yu 等^[12]研究了水轮机-调速器系统状态方程的表述特征,利用矩阵变换方法,建立了一种求解状态方程系数矩阵的新方法。Zhou 等^[13]针对单管单机水电站,考虑调速器不同调节方式,建立了相应的状态方程,分析了小负荷扰动下的动态过程。翟晓娟等^[14]考虑水力、机械、电气系统的耦合作用,建立了水电机组稳定性非线性数学模型,分析了孤网运行时水电机组的水力干扰稳定性。Chen 等^[15]提出了一种多目标综合指标,并使用该指标对调速器的参数进行优化,为在尾水波动条件下的稳定性分析提供了理论支持。Yu 等^[16]利用 Jordan 标准形式的状态矩阵解耦,推导了无量纲转轮转速的显式公式,采用直接求解方法,优化选择 PID 控制器参数。马安婷等^[17]基于水力系统振动特性分析方法,建立输水发电系统总体矩阵,能够准确求解复杂输水发电系统的运行稳定域。周建旭等^[18]结合设置上下游双调压室的长引水式水电站输水系统的水力特性,探讨了上下游调压室系统水力干扰稳定性等特殊水力学问题。Huang 等^[19]对孤立电网下复杂水电站小波动过渡过程中的调速器参数敏感性进行了研究。李玲等^[20]构建了超长引水隧洞水电站单机无穷大电网的仿真模型,研究了系统的小波动稳定性。上述研究主要侧重于小波动稳定性分析,而水力干扰稳定性研究相对较少。

白鹤滩水电站单机容量达百万千瓦,机组运行水头为 163.9~243.1 m,具有单机容量巨大、运行水头变幅大的特点。该水电站输水发电系统采用单管单机引水、两机共用尾水调压室和尾水隧洞的布置方式,其中尾水系统采用“三段变坡”的形式,包括有压尾水隧洞、坡度较大的反坡衔接隧洞和平坡尾水隧洞,而平坡尾水隧洞中会发生明流、满流,以及

明满流现象。因此,本文基于有压输水系统特征线法,引入明满流尾水隧洞瞬变流分析的特征隐式格式,以便准确描述尾水系统中可能的复杂流态,同时考虑调速器频率调节模式,建立输水发电系统稳定性分析和调控模型,并结合白鹤滩水电站典型水力单元开展水力干扰稳定性分析,阐明受扰机组的稳定运行及其影响因素,揭示尾水系统复杂流态对系统稳定运行的影响,为制定可靠有效的调节控制策略提供技术支撑。

1 输水发电系统稳定性分析模型

1.1 输水系统瞬变流分析的数学模型

白鹤滩水电站输水发电系统布置见图 1,其尾水系统的反坡衔接隧洞和平坡尾水隧洞在过渡过程中可能出现无压流、有压流,以及明满流现象。图 1 中 1—1 断面为反坡衔接隧洞进口断面,2—2 断面为反坡衔接隧洞出口断面,亦为明满流隧洞段串联节点。

输水发电系统的有压输水部分,即从水库进水口至反坡衔接隧洞进口(断面 1—1),采用有压输水系统特征线法来描述其瞬态特性,可求解出计算断面的测压管水头和流量,相应的特征方程为

$$C^+ : H_P = C_p - S_p Q_P \tag{1}$$

$$C^- : H_P = C_m + S_m Q_P \tag{2}$$

式中: H 为断面瞬时测压管水头; Q 为断面瞬时流量; C_p 、 S_p 、 C_m 、 S_m 均为有压输水系统特征方程的已知系数;下标 P 对应的参数为计算节点未知量。

输水发电系统的明满流隧洞部分(运行尾水位低于尾水隧洞出口洞顶或在尾水隧洞出口洞顶附近),即从始终为有压流的反坡衔接隧洞进口断面 1—1 至平坡尾水隧洞出口,采用明渠水流特征隐式格式来描述其动态特性,可求解出计算断面的瞬时水深和流量,相应的特征方程为

$$a_{1j} \Delta h_{j-1} + b_{1j} \Delta Q_{j-1} + c_{1j} \Delta h_j + d_{1j} \Delta Q_j = e_{1j} \tag{3}$$

$$a_{2j} \Delta h_j + b_{2j} \Delta Q_j + c_{2j} \Delta h_{j+1} + d_{2j} \Delta Q_{j+1} = e_{2j} \tag{4}$$

式中: Δh 、 ΔQ 分别为断面水深和流量的增量形式; a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 均为系数($i=1,2$);下标 j 为计算断面

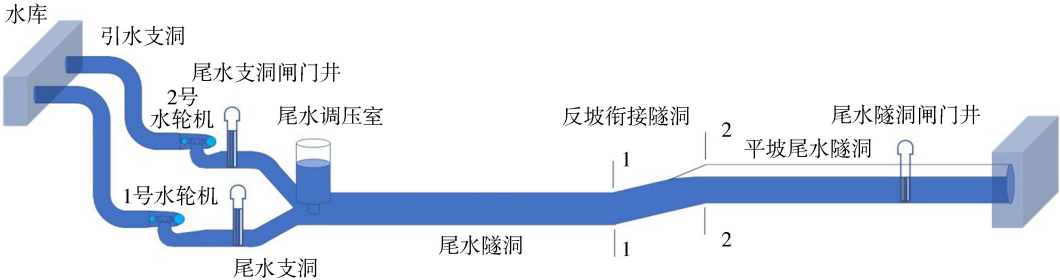


图 1 水电站输水发电系统布置示意图

编号。

基于特征方程(3)和(4),结合尾水闸门井节点的流量连续条件、水头平衡条件和闸门井水位波动方程,可建立尾水闸门井边界的数学模型;同时,考虑反坡衔接隧洞进口断面、明满流隧洞串节点、明满流隧洞出口的流量连续条件和水头平衡条件,建立相应边界的数学模型。

有压输水和明满流模拟段的交界面(即始终为有压流的反坡衔接隧洞进口断面 1—1),满足流量连续条件和水头平衡条件(即有压模拟段出口断面流量等于明满流模拟段进口流量,以及有压模拟段出口测压管水头等于明满流模拟段进口水深加上洞底高程),据此可建立融合有压输水系统特征线法和明满流隧洞特征隐式格式的输水系统瞬变流分析模型。在瞬变流计算分析过程中,若明满流模拟段某计算断面的瞬时水深近似等于断面洞高,则该计算断面为明满流分界面。

1.2 水轮发电机组的动态分析模型

白鹤滩水电站输水发电系统的稳定性分析模型应能够准确描述百万千瓦机组的综合特性及其对系统运行稳定性的影响。白鹤滩水电站左岸输水发电系统的水轮机型号为 D545A-F15,结合机组模型特性曲线,可得到反映水轮机全特性的离散数据,包括流量特性 $Q_{11}=f_1(n_{11}, a)$ 和效率特性 $\eta=f_2(n_{11}, a)$,其中 Q_{11} 、 n_{11} 、 η 和 a 分别为机组单位流量、单位转速、效率和导叶开度, f_1 和 f_2 表示不同的函数关系,见图 2。

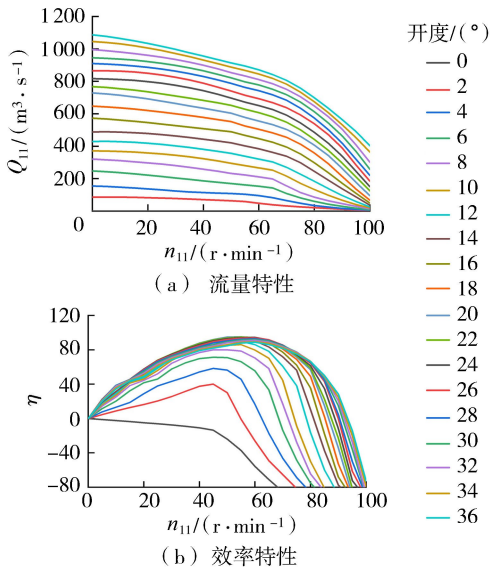


图2 水轮机 D545A-F15 综合特性曲线

白鹤滩水电站右岸输水发电系统的水轮机型号为 A1181a,其全特性曲线见图 3,包括流量全特性曲线 $Q_{11}=f_1(n_{11}, a)$ 和力矩全特性曲线 $T_{11}=f_3(n_{11}, a)$,其中 T_{11} 为机组单位力矩。

描述机组节点的方程有:

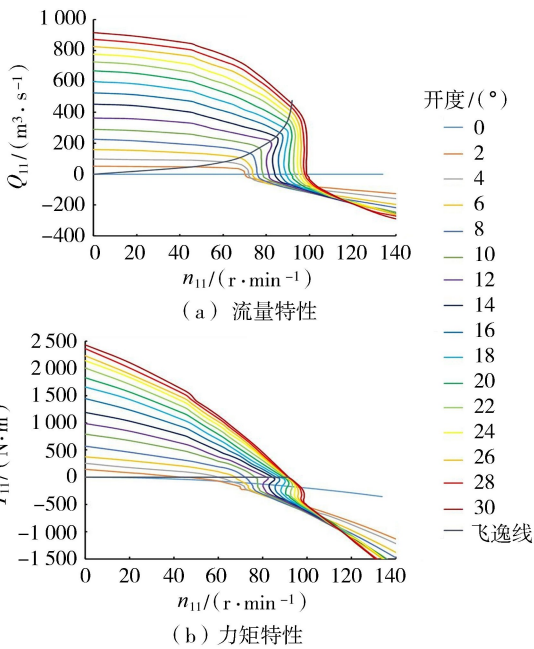


图3 水轮机 A1181a 全特性曲线

$$H = (C_{p1} - C_{m2}) - (S_{p1} + S_{m2})Q \tag{5}$$

$$P = \gamma Q H \eta \tag{6}$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \tag{7}$$

$$n_{11} = \frac{D_1 n}{\sqrt{H}} \tag{8}$$

$$T_{11} = \frac{9.55P}{n D_1^3 H} \tag{9}$$

式中: H 、 Q 、 P 、 n 分别为机组运行水头、流量、出力、转速; γ 为水的容重; D_1 为转轮直径; C_{p1} 、 S_{p1} 、 C_{m2} 和 S_{m2} 均为基于有压输水系统特征方程的已知系数。

结合式(5)~式(9),以及水轮机模型综合特性曲线 $Q_{11}=f_1(n_{11}, a)$ 和 $\eta=f_2(n_{11}, a)$ (左岸机组),或者 $Q_{11}=f_1(n_{11}, a)$ 和 $T_{11}=f_3(n_{11}, a)$ (右岸机组),则可求解得到任一瞬时水轮机节点的相关参数,包括蜗壳进口测压管水头和流量、尾水管进口测压管水头和流量、机组瞬时出力或力矩等。

描述扰动机组动态特性的状态方程为

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{T_m} (p - x - S_g \varphi) \tag{10}$$

其中

$$T_m = \frac{GD^2 n_0^2}{365P_0}$$

式中: φ 、 p 分别为机组相对转速变化量和相对出力变化量; t 为时间; x 为外扰动; S_g 为负荷自调节系数; T_m 为机组启动时间常数; P_0 、 n_0 、 GD^2 分别为机组初始出力、初始转速和转动惯量。基于式(10)和机组的综合特性,可得到受扰机组的瞬时转速。

1.3 调速器的状态方程

考虑到白鹤滩水电站在电网中的重要性和机组

的运行稳定性要求,基于调速器的频率调节模式,进行系统的调节控制分析。在频率调节模式下,调速器采用PID调节规律,将导叶开度作为反馈值,实时跟踪机组实际功率。将调速器频率调节模式的状态方程^[13]耦合机组的状态方程(10)以及输入扰动,即可确定机组和调速器的状态变量值,包括机组导叶相对开度等。

1.4 融合输水系统复杂瞬变流分析的输水发电系统调控模型

融合输水系统明满流等复杂瞬变流分析的数学模型、考虑机组综合特性的水轮发电机组动态分析模型和调速器频率调节模式的状态方程,构建形成白鹤滩水电站百万千瓦机组及输水发电系统的调节控制模型。

基于所建立的白鹤滩水电站输水发电系统调节控制模型,进行水力-机械系统水力干扰稳定性分析,能够准确反映扰动机组和输水系统瞬态参数的较大幅度变化,以及受扰机组参数的动态变化过程和调节品质,并直观揭示输水发电系统在水力耦合下的水力干扰特性,特别是受扰机组的动态特性。

2 输水发电系统水力干扰稳定性

2.1 白鹤滩水电站参数

白鹤滩水电站地下厂房采用首部开发方式,左、右岸输水发电系统的布置格局相同,各布置8台混流式水轮发电机组,分为4个水力单元,引水系统采用单洞单机布置方式,尾水系统采用两机合一洞的布置方式,典型水力单元布置如图1所示。电站左岸水轮机型号为D545A-F15,单机额定出力为1 015 MW,额定流量为545.49 m³/s,额定水头为202 m,额定转速为111.1 r/min,转动惯量为36 万t·m²;左岸1号水力单元引水道长度 l_1 为480.50 m,尾水支洞长度 l_2 为259.75 m,尾水隧洞总长度 l_3 为1 695.80 m。右岸水轮机型号为A1181a,单机额定出力为1 015 MW,额定流量为538.80 m³/s,额定水头为202 m,额定转速为107.1 r/min,转动惯量为37 万t·m²;右岸8号水力单元引水道长度 l_1 为486.12 m,尾水支洞长度 l_2 为240.15 m,尾水隧洞总长度 l_3 为1 769.87 m。左岸1号和右岸8号水力单元尾水隧洞出口顶高程均为

592.0 m,尾水调压室有效面积均为1 590.43 m²。

2.2 水力干扰分析工况

结合白鹤滩水电站典型水力单元,开展水力干扰过渡过程计算分析,评估发生水力干扰时运行机组的运行稳定性以及调节品质。已知调速器调节参数的整定值为:永态转差系数 $b_p=0.04$,相应比例常数 $K_B=2.5$ 、积分常数 $K_I=0.385$ 1/s、微分常数 $K_D=2.5$ s。

表1给出了白鹤滩水电站左岸和右岸控制输水发电系统水力干扰稳定性分析的典型工况,其中工况D1和D2水库水位一列分别对应左岸1号和右岸8号水力单元的数值。

表1 水力干扰工况

工况	水库水位/m		尾水位/m	负荷变化	水位组合及工况变化说明
	左岸1号	右岸8号			
D1	806.8	807.1	597.42	2台变1台	2机额定水头额定出力运行,1机突甩全荷
D2	806.8	807.1	597.42	1台变2台	额定出力,1台机正常运行,另1台机正常启动
D3	825.0	825.0	581.50	2台变1台	2机最大水头额定出力运行,1机突甩全荷
D4	825.0	825.0	581.50	1台变2台	额定出力,1台机正常运行,另1台机正常启动

2.3 受扰机组稳定性和调节品质分析

结合白鹤滩水电站左岸1号和右岸8号水力单元,以及相应的机组特性和导叶启闭规律,结合表1给出的水力干扰稳定性分析工况,进行受扰机组的运行稳定性分析,调节品质分析见表2和表3,表中给出了对应转速偏差为±0.2%和±0.4%时的调节时间。典型工况频率调节模式下受扰机组的转速和机组出力的动态过程见图4和图5。

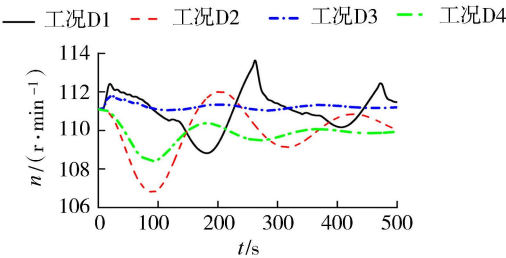
图4和图5表明:依据整定的调速器参数、电网负荷自调节系数等相关参数,左岸1号和右岸8号水力单元受扰机组转速是衰减的,水力干扰过渡过程是稳定的;受扰机组的出力发生明显的摆动,最大出力均未超出额定出力的105%,且超出力历时较短;受扰机组转速的衰减度均小于90%。随着机组运行水头的增大,受扰机组的调节品质明显改善,主要表现为调节时间缩短,振荡次数减小,最大偏差减小和衰减度增大,即甩荷工况D3相较于D1,增荷工

表2 左岸1号水力单元水力干扰过渡过程调节品质

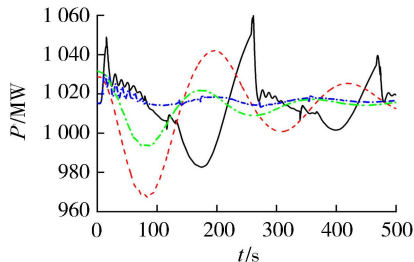
工况	调节时间/s		最大偏差/(r·min ⁻¹)	超调量	衰减度/%	机组出力/MW		
	±0.2%	±0.4%				初始值	最大值	最小值
D1	700.0	645.0	2.44	27.11	49.18	1 015.0	1 060.1	982.7
D2	580.0	450.0	-3.36	3.61	70.83	1 015.0	1 042.0	967.3
D3	60.0	0.0	0.62	5.64	80.65	1 015.0	1 029.7	1 013.0
D4	300.0	140.0	-1.52	1.31	71.71	1 015.0	1 031.7	992.9

表3 右岸8号水力单元水力干扰过渡过程调节品质分析

工况	调节时间/s		最大偏差/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	超调量	衰减度/%	机组出力/MW		
	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.4\%$				初始值	最大值	最小值
D1	720.0	500.0	2.21	27.62	49.32	1015.0	1056.6	983.6
D2	600.0	460.0	-3.28	3.81	69.21	1015.0	1043.4	968.5
D3	60.0	0.0	0.64	8.00	90.63	1015.0	1032.4	1008.5
D4	320.0	150.0	-1.74	1.66	77.59	1015.0	1029.3	988.6

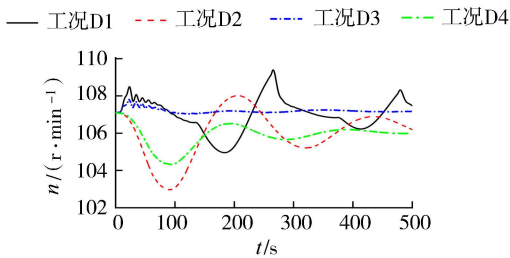


(a) 受扰机组转速

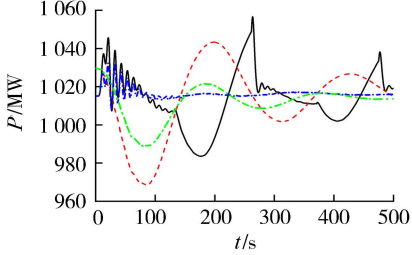


(b) 受扰机组出力

图4 左岸1号水力单元受扰机组转速、出力动态过程



(a) 受扰机组转速



(b) 受扰机组出力

图5 右岸8号水力单元受扰机组转速、出力动态过程

况 D4 相较于 D2, 机组运行水头较大, 受扰机组转速的波动明显减小, 衰减明显加快。因工况 D1 运行水头明显较低, 机组转速和出力动态过程振荡幅度较大, 稳定性较差, 同时工况 D1 对应运行开度为额定开度, 受扰过程中受调速器接力器行程限制的影响, 故工况 D1 和 D3 的水力干扰过渡过程存在较大差别。

2.4 尾水隧洞典型流态对系统稳定性的影响

左岸1号和右岸8号水力单元尾水隧洞洞顶高

程为 592.00 m, 工况 D1 和 D2 尾水位为 597.42 m, 工况 D3 和 D4 尾水位为 581.50 m, 因此工况 D1 和 D2 尾水系统全线为有压流流态, 而工况 D3 和 D4 在反坡衔接隧洞段出现明满交替流态, 高程较高的平坡尾水隧洞段出现明流流态。图 6 和图 7 分别给出左岸 1 号水力单元各工况尾水调压室水位和左/右岸典型水力单元明满流分界面动态过程线, 以分析尾水隧洞典型流态对系统稳定性的影响。

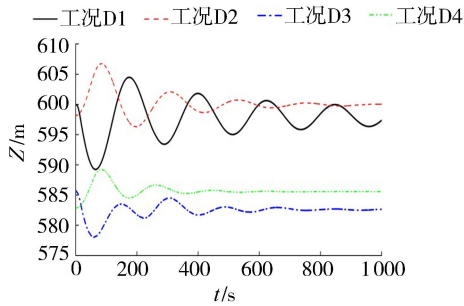


图6 尾水调压室水位动态过程线

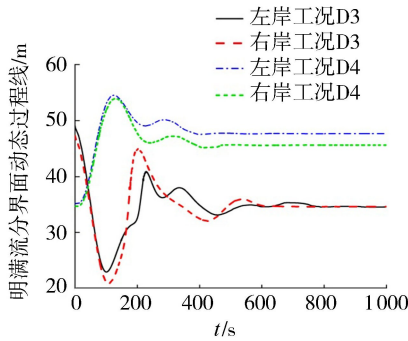


图7 明满流分界面动态过程线

图 6 表明: 机组额定出力运行时, 工况 D1 和 D2 运行水头相对较低, 运行流量较大, 调压室水位波动幅度较大, 且增荷工况衰减较快; 因工况 D1 和 D2 尾水隧洞全线有压, 调压室水位波动周期较长, 而工况 D3 和 D4 尾水隧洞下游段为明满流段或明流段, 有压段长度缩短, 调压室水位波动周期较短, 同时运行水头相对较高, 调压室水位稳定时间明显缩短, 有利于系统的运行稳定性。图 7 表明: 工况 D3 和 D4 尾水系统中出现明满流流态, 对应的明满流分界面位于反坡衔接隧洞段, 即在断面 1—1 和断面 2—2 之间移动, 其下游侧始终为无压流, 并且很快趋于稳定。

2.5 机组型号对系统稳定性的影响

白鹤滩水电站左岸 1 号水力单元的机组型号为

D545A-F15,右岸 8 号水力单元的机组型号为 A1181a。通过对比不同型号机组在相同工况下的机组转速和反坡衔接隧洞出口断面 2—2 测压管水头动态过程,分析不同机组型号时系统的水力干扰稳定性。图 8 和图 9 分别给出了甩荷工况 D1 和 D3 下机组转速变化相对量 φ 和反坡衔接隧洞出口(断面 2—2)测压管水头 H_2 变化过程线。

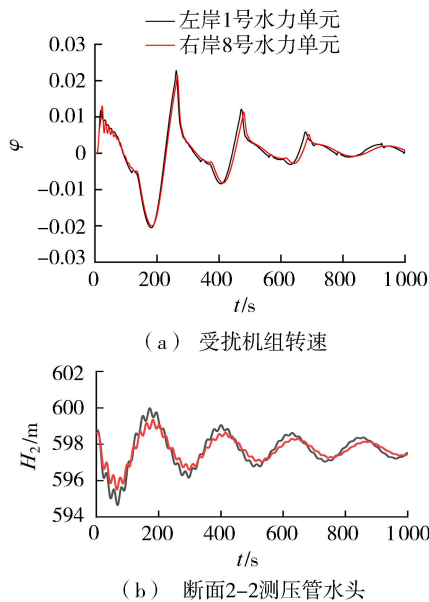


图 8 工况 D1 下受扰机组转速及断面 2—2 测压管水头动态过程

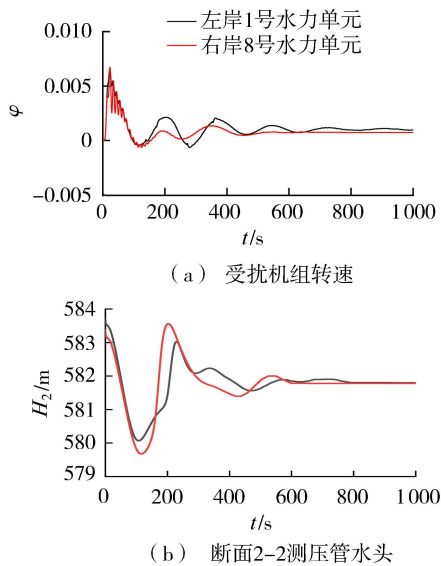


图 9 工况 D3 下受扰机组转速及断面 2—2 测压管水头动态过程

图 8 和图 9 表明:在机组甩荷条件下,工况 D1 转速变化相对值的动态变化趋势基本一致,对应的机组调节品质评价指标接近(表 2、表 3),而工况 D3 转速变化相对值衰减过程存在较明显的差别,即不同机组型号下,第 1 个调节周期内机组最大转速不同和振荡衰减趋势明显不一致,在调节过程中相关

参数动态过程亦受不同的尾水隧洞明满流过渡段和明流段的影响;左岸 1 号和右岸 8 号水力单元输水系统特别是尾水系统布置存在一定的差异,其中 8 号水力单元尾水隧洞较长,表现出两个水力单元衔接隧洞出口断面 2—2 测压管水头的变化趋势基本一致,其中工况 D1 衔接隧洞出口断面为有压状态,呈周期性振荡衰减,右岸 8 号水力单元对应的振荡周期略长,工况 D3 衔接隧洞出口断面为无压状态,测压管水头快速衰减并趋于稳定。

3 结 论

- a. 依据整定的调速器参数、电网负荷自调节系数等相关参数,考虑尾水系统多流态特性,白鹤滩水电站典型输水发电系统水力干扰过渡过程是稳定的,随着机组运行水头的逐渐增大,受扰机组的调节品质逐步改善。
- b. 机组运行水头相对较低且尾水系统全线有压时,尾水系统衔接隧洞出口断面测压管水头呈周期性振荡衰减,而运行水头较高且尾水隧洞下游段为明满流段或明流段时,尾水系统衔接隧洞出口断面流态为明流,测压管水头呈快速趋于稳定的动态过程。
- c. 在机组甩荷条件下,左岸 1 号和右岸 8 号水力单元不同机组型号对应的转速、尾水系统衔接隧洞出口断面测压管水头的动态变化趋势基本一致,对应的机组调节品质评价指标接近,表明两种机组型号对应水力干扰稳定性和受扰机组调节品质接近。

参考文献:

[1] 俞晓东,张健,刘甲春. 联合运行水电站水力机械系统小波动稳定性研究[J]. 水利学报,2017,48(2): 234-240. (YU Xiaodong, ZHANG Jian, LIU Jiachun. Investigation on small fluctuation in governor turbine hydraulic system under interconnected operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2): 234-240. (in Chinese))

[2] 赵修龙,张健,李良权. 调压室对水电站输水系统小波动过渡过程的影响[J]. 人民长江,2019,50(2): 202-206. (ZHAO Xiulong, ZHANG Jian, LI Liangquan. Impacts of surge chamber on small fluctuation transition process of water conveyance system in hydropower plant[J]. Yangtze River,2019,50(2): 202-206. (in Chinese))

[3] 杨秀维,俞晓东,张磊,等. 设置尾水连通管的抽水蓄能电站引水发电系统小波动稳定分析[J]. 水利学报,2019,50(9): 1145-1154. (YANG Xiuwei, YU Xiaodong, ZHANG Lei, et al. Stability analysis of hydroelectric generating system of the pumped storage power plant with connection pipe between tailrace tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (9): 1145-1154. (in Chinese))

- Chinese))
- [4] 王明疆,杨建东,王煌. 含明渠尾水系统小波动调节稳定性分析[J]. 水力发电学报,2015,34(1):161-168. (WANG Mingjiang, YANG Jiandong, WANG Huang. Analysis of stability of tailrace open channel in small fluctuation governing system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(1): 161-168. (in Chinese))
- [5] 陈刚,周建旭,胡明. 尾水洞出现明满流的水电站小波动稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):70-73. (CHEN Gang, ZHOU Jianxu, HU Ming. Stability analysis of small fluctuation for hydropower stations with free-surface-pressurized flows in tail tunnels[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(3): 70-73. (in Chinese))
- [6] 张梦宇. 含引水和尾水明渠输水的水电站过渡过程分析[J]. 水电能源科学,2020,38(6):80-83. (ZHANG Mengyu. Hydraulic transient process analysis of water-diversion hydropower station with water diversion channel and tail channel[J]. Water Resources and Power,2020,38(6): 80-83. (in Chinese))
- [7] 王超,杨建东. 连接管长度对调压室稳定面积和小波动调节品质的影响[J]. 水力发电学报,2015,34(1):93-98. (WANG Chao, YANG Jiandong. Effect of lateral pipe length of surge tank on its stable section area and regulation quality [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(1): 93-98. (in Chinese))
- [8] 刘俊平,周建旭,乔艳伟,等. 考虑水电站水力瞬变流特性的水轮机选型[J]. 水电能源科学,2014,32(12):135-138. (LIU Junping, ZHOU Jianxu, QIAO Yanwei, et al. Turbine type selection considering fluid transients characteristics of hydropower station[J]. Water Resources and Power,2014,32(12): 135-138. (in Chinese))
- [9] 周建旭. 长输水系统电站振动特性与稳定性分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [10] 杨建东,陈鉴治,赖旭. 上下游调压室系统水位波动稳定分析[J]. 水利学报,1993,24(7):50-56. (YANG Jiandong, CHEN Jianzhi, LAI Xu. Stability analysis of water level fluctuation in upstream and downstream surge tank system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1993,24(7): 50-56. (in Chinese))
- [11] 郭文成,杨建东,王明疆. 基于 Hopf 分岔的变顶高尾水洞水电站水轮机调节系统稳定性研究[J]. 水利学报,2016,47(2):189-199. (GUO Wencheng, YANG Jiandong, WANG Mingjiang. Stability analysis of hydro-turbine governing system of hydropower station with inclined ceiling tailrace based on Hopf bifurcation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(2): 189-199. (in Chinese))
- [12] YU X, ZHANG J, FAN C, et al. Stability analysis of governor-turbine-hydraulic system by state space method and graph theory[J]. Energy,2016,114: 613-622.
- [13] ZHOU J X, HU R, CAO Q. Effect analysis of regulation mode on small disturbance stability in hydropower stations [C] //IEEE Proceedings of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Gulin:[s. n.],2009:606-609.
- [14] 翟晓娟,郑源,黄青松,等. 孤网下水电机组的稳定性分析[J]. 广东电力,2012,25(4):25-29. (ZHAI Xiaojuan, ZHENG Yuan ,HUANG Qingsong, et al. Stability analysis on hydropower generating units in isolated power system [J]. Guangdong Electric Power,2012,25(4): 25-29. (in Chinese))
- [15] CHEN S, LI G, WANG D, et al. Impact of tail water fluctuation on turbine start-up and optimized regulation [J]. Energies,2019,12(15): 2883.
- [16] YU X, YANG X, YU C, et al. Direct approach to optimize PID controller parameters of hydropower plants [J]. Renewable Energy,2021,173: 342-350.
- [17] 马安婷,杨建东,杨威嘉,等. 总体矩阵法在水电站频率调节稳定性分析中的应用[J]. 水利学报,2019,50(2):263-272. (MA Anting, YANG Jiandong, YANG Weijia, et al. Application of overall matrix method in operation stability analysis for frequency regulation mode of hydropower stations [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(2): 263-272. (in Chinese))
- [18] 周建旭,张健,姜伯阳. 长引水式水电站取消尾水调压室的优化分析[J]. 水利水电技术,2008,39(4):73-75. (ZHOU Jianxu, ZHANG Jian, JIANG Boyang. Optimized analysis on canceling arrangement of tailwater surge tank for diversion-type hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2008,39(4): 73-75. (in Chinese))
- [19] HUANG Q S, ZHAI X J, ZHENG Y, et al. Study on stability of hydroelectric generating set influenced by the governor parameters under isolated grid[J]. Advanced Materials Research,2014,875: 1799-1803.
- [20] 李玲,杨建东,刘梅清. 无穷大电网下带超长引水隧洞的水电站小波动过渡过程研究[J]. 水力发电学报,2015,34(4):105-110. (LI Ling, YANG Jiandong, LIU Meiqing. Study on small-fluctuation transient process in long diversion tunnel of hydropower station on infinite power grid [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(4): 105-110. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-19 编辑:骆超)