

# 水轮机调速器功率调节模式下负荷调节过渡过程稳定性研究

鲍海艳<sup>1</sup>, 龙丽婷<sup>1</sup>, 付亮<sup>2</sup>, 魏加富<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙, 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙, 410007)

**摘要:** 作为电力系统中调峰调频的骨干电源, 水电机组负荷调节过渡过程稳定性对电网安全运行及源网协调意义重大。该文采用理论分析及数值仿真的方法对水轮机调速器功率模式下负荷调节过渡过程的稳定性进行了深入分析, 得出了以调速器参数为变量的机组运行稳定域, 并推导出满足稳定性的判别式。分析了水流惯性、接力器响应特性以及水轮机特性对稳定域的影响, 得出水流惯性不利于系统的稳定, 而接力器响应特性对系统稳定性有利, 及水轮机特性最不利工况为水轮机综合特性系数与水轮机传递系数  $e_3$  乘积值最大处。该文的研究成果能够准确地找到负荷调节稳定性的最不利工况, 有效的指导水轮机调速器功率模式下参数整定, 保障水电机组的稳定运行。

**关键词:** 水电站; 水轮机; 功率模式; 负荷调节; 稳定性; 调速器参数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.007

中图分类号: TK43

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-17-0050-08

鲍海艳, 龙丽婷, 付亮, 魏加富. 水轮机调速器功率调节模式下负荷调节过渡过程稳定性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 50-57. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.007 http://www.tcsae.org

Bao Haiyan, Long Liting, Fu Liang, Wei Jiafu. Stability of load regulation transition process of hydro turbine governor in power regulation mode[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 50-57. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.007 http://www.tcsae.org

## 0 引言

目前中国电力系统已基本形成了以特高压为骨干网架的交直流混联电网, 随着大量的风电、太阳能等间歇性能源投运, 电网的安全稳定问题愈加突出。作为电力系统中调峰调频的骨干电源, 水电机组负荷调节过渡过程的稳定性及调节品质直接影响到了电网的安全及网源协调<sup>[1-4]</sup>。

为维持电网频率的稳定及功率的平衡, 电网调度部门通过自动发电控制系统 (automatic generation control) 实时向水电厂计算机监控系统下达目标负荷调节指令, 水电机组接受到 AGC 负荷调节指令后自动调节机组有功功率<sup>[5]</sup>, 对于已投入 AGC 的水电机组每天的负荷调节次数非常频繁, 如凤滩水电厂日调节次数就超过了 2 000 次<sup>[6]</sup>。目前水轮机调速器负荷调节主要有 2 种模式: 开度模式和功率模式<sup>[7]</sup>。相比开度模式, 功率模式下监控系统只需下发功率目标值, 由调速器自动完成功率闭环调节, 其响应快且能够实现一次调频与 AGC 的协调控制, 已在很多大型水电机组中得到应用。由于水轮机调节系统“水锤效应”及水轮机非线性参数时变的特性, 水电机组功率调节性能十分复杂, 一旦控制参数设置不当就容易恶化负荷调节性能甚至出现功率振荡, 严重危及电网安全<sup>[8-10]</sup>。特别是对于水电比例相对较高的区域电网, 水电机组本身的功率振荡易诱发

电网的低频振荡<sup>[11-17]</sup>, 因此电网调度部门对水电机组参与 AGC 调节的性能极为重视, 各区域电网均出台了相应的考核办法, 同时也建立了电网低频振荡预警系统, 对水电机组功率调节过程中出现的失稳及功率振荡进行预警并进行严格控制<sup>[18]</sup>。

目前对于水轮机调速器功率模式下负荷调节过渡过程的研究主要集中在控制逻辑、试验仿真以及控制参数优化三个方面。文献[19]分析了功率调节模式的直接式和间接式调节结构及其实现方法, 并在此基础上提出了功率调节的适应式变参数策略及其在水电厂 AGC 系统中的应用情况。文献[20]提出了一种基于自适应 PID 控制的水电站有功功率调节。文献[21]提出了基于三段速度调节方式的功率反馈调节模式。文献[22]对带变项高尾水洞水电机组调速器功率模式下负荷调节及一次调频进行了仿真和试验, 优化了控制参数。文献[23]提出了一种改进型控制结构结合增量式 PID 算法的功率调节控制逻辑。文献[24]对调速器功率模式下一次调频试验方法进行了探讨。

综上所述, 目前的研究成果中对于调速器功率模式调节过程中稳定性问题很少涉及, 而实际有多个水电厂在运行过程中就曾出现过调速器功率模式下失稳的问题, 导致了功率的振荡, 影响了电网的正常运行及网源协调<sup>[25-26]</sup>。本文试图采用理论分析及数值仿真的方法对水轮机调速器功率模式下负荷调节过渡过程稳定性进行深入分析, 得到调速器功率模式下调节稳定域, 分析水锤现象、水轮机特性、调速器响应特性对稳定域的影响, 提出调速器参数优化方法从而控制功率振荡的风险。

收稿日期: 2018-12-21 修订日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51309033)

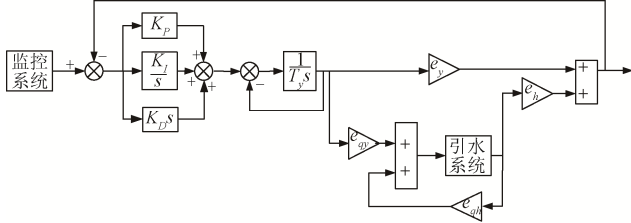
作者简介: 鲍海艳, 副教授, 博士, 从事水电站过渡过程的研究。

Email: 83369537@qq.com

### 1 基于弹性水击模型的数值分析

#### 1.1 数学模型

水电机组负荷调节过程中并网运行，此时认为机组转速无变化，因此其调节原理如图 1 所示，各子系统数学模型如下所示。



注：\$K\_p\$、\$K\_I\$、\$K\_D\$ 为水轮机调速器参数，其中 \$K\_p\$ 为比例增益，\$K\_I\$ 为积分增益，\$K\_D\$ 为微分增益；\$T\_y\$ 为接力器响应时间常数，\$s\$；\$e\_y\$ 为水轮机转矩对导叶开度的传递系数；\$e\_h\$ 为水轮机转矩对水头的传递系数；\$e\_{qy}\$ 为水轮机流量对导叶开度的传递系数；\$e\_{qh}\$ 为水轮机流量对水头的传递系数；\$s\$ 为拉普拉斯算子。  
 Note: \$K\_p\$, \$K\_I\$ and \$K\_D\$ are hydro turbine governor parameters, \$K\_p\$ is the proportional gain, \$K\_I\$ is the integral gain, \$K\_D\$ is the derivative gain; \$T\_y\$ is the servomotor response time constant, \$s\$; \$e\_y\$ is the transmission coefficient of hydro turbine to guide vane opening; \$e\_h\$ is the transmission coefficient of hydro turbine to head; \$e\_{qy}\$ is the transmission coefficient of discharge to guide vane opening; \$e\_{qh}\$ is the transmission coefficient of discharge to head; \$s\$ is laplace operator.

图 1 水电机组负荷调节原理图

Fig.1 Block diagram of turbine load regulating system

引水管道数学模型：忽略水头损失，采用弹性水击模型，变量取相对偏差形式并利用拉氏变换可得

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w \frac{\frac{1}{24} T_r^2 s^3 + s}{\frac{1}{8} T_r^2 s^2 + 1} \quad (1)$$

式中 \$q=(Q-Q\_0)/Q\_r=\Delta Q/Q\_r\$、\$h=(H-H\_0)/H\_r=\Delta H/H\_r\$。\$Q\_0\$ 和 \$H\_0\$ 分别为扰动前的流量(\$m^3/s\$)和水头(\$m\$)；\$T\_w\$ 为水流加速时间，\$s\$；\$T\_r\$ 为水击波相长，\$s\$；\$T\_r=L/c\$，\$L\$ 为引水系统长度，\$m\$，\$c\$ 为水击波波速，\$m/s\$；\$s\$ 为拉普拉斯算子。如果不考虑水流及管道的弹性，令 \$T\_r=0\$，可得到刚性水击引水系统传递函数 \$G(s)=-T\_w s\$。

水轮机数学模型：采用在稳态工况点局部线性化的方法，用水轮机的传递系数来表述的水轮机稳态特性如下式所示

$$q = e_{qh} h + e_{qx} x + e_{qy} y \quad (2)$$

$$m_t = e_h h + e_x x + e_y y \quad (3)$$

式中 \$x=(n-n\_0)/n\_0=\Delta n/n\_0\$，\$n\_0\$ 和 \$n\$ 分别为扰动前后水轮机的转速，\$r/min\$。由于机组负荷调节过程中并网运行，此时认为转速无变化，即 \$x=0\$；\$y=(\tau-\tau\_0)/\tau\_0=\Delta \tau/\tau\_0\$，\$\tau\_0\$ 和 \$\tau\$ 分别为扰动前后的水轮机开度；\$m\_t=(M\_t-M\_{t0})/M\_{t0}=\Delta M\_t/M\_{t0}\$，\$M\_t\$ 和 \$M\_{t0}\$ 分别为扰动前后作用于水轮机的水力力矩；\$e\_{qh}\$、\$e\_{qx}\$、\$e\_{qy}\$、\$e\_h\$、\$e\_x\$、\$e\_y\$ 为水轮机 6 个传递系数。

对于水轮机调速器功率控制模式，在并网后一般采用 PI 调节<sup>[7]</sup>，可以得到其传递函数为

$$\frac{y(s)}{m_g - m_t} = \frac{1}{T_y s + 1} (K_p + \frac{K_I}{s}) \quad (4)$$

式中 \$m\_g\$ 为水轮机阻力力矩变化相对值，其值可以反映水轮机有功功率变化的大小。

根据以上各子系统数学模型可推导出水电机组负荷调节过渡过程总传递函数为

$$G(s) = \frac{m_t(s)}{m_g(s)} = \frac{b_0 s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4}{c_0 s^5 + c_1 s^4 + c_2 s^3 + c_3 s^2 + c_4 s + c_5} \quad (5)$$

式中 \$b\_0 = (e\_y e\_{qh} - e\_h e\_{qy}) K\_p T\_w T\_r^2\$；

$$b_1 = 3e_y K_p T_r^2 + K_I (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w T_r^2；$$

$$b_2 = 3e_y K_I T_r^2 + 24K_p (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w；$$

$$b_3 = 24e_y K_p + 24K_I (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w；$$

$$b_4 = 24e_y K_I；$$

$$c_0 = e_{qh} T_w T_r^2 T_y；$$

$$c_1 = (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) K_p T_w T_r^2 + e_{qh} T_w T_r^2 T_y + e_{qy} T_w T_r^2；$$

$$c_2 = 3e_y K_p T_r^2 + K_I (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w T_r^2 + 3T_r^2 + 24e_{qh} T_w T_y；$$

$$c_3 = 3e_y K_I T_r^2 + 24K_p (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w + 24T_y + 24e_{qh} T_w；$$

$$c_4 = 24e_y K_p + 24K_I (e_y e_{qh} - e_h e_{qy}) T_w + 24；$$

$$c_5 = 24e_y K_I。$$

#### 1.2 稳定性数值分析

根据常微分方程稳定理论，当式 (5) 所示系统的特征方程的各系数只有满足以下 Routh-Hurwitz 稳定条件

1) 各项系数大于 0，即 \$c\_0>0, c\_1>0, c\_2>0, c\_3>0, c\_4>0, c\_5>0\$；

2) 各系数组成的 Hurwitz 行列式大于 0，即 \$\Delta\_2=c\_1 c\_2 - c\_0 c\_3 > 0, \Delta\_4=(c\_1 c\_2 - c\_0 c\_3)(c\_3 c\_4 - c\_2 c\_5) - (c\_1 c\_4 - c\_0 c\_5)^2\$，系统才是稳定的。

取理想水轮机参数 \$e\_y=1.0, e\_h=1.5, e\_{qy}=1.0, e\_{qh}=0.5\$，\$T\_w\$ 值可根据实际水电站设计图纸计算得到，本次计算取 5.268 s，\$T\_y\$ 值可根据实测辨识获得<sup>[27]</sup>，本次计算取 0.04 s，取水击波波速 \$c\$ 分别为 1 400、1 000、800 m/s，同时采用刚性水击模型，得到以调速器参数 \$K\_p\$、\$K\_I\$ 为变量的稳定域如图 2 所示，图中各曲线为刚性水击以及不同水击波速下的稳定域边界，图中位于曲线左下部为稳定区域，反之则为不稳定区域。

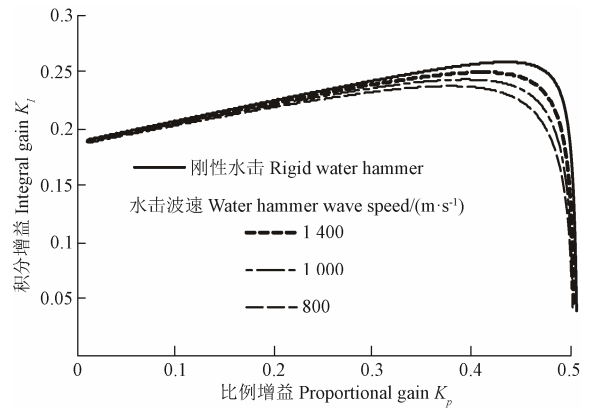


图 2 不同波速计算结果

Fig.2 Simulation results with different wave velocity

由图 2 可知，随着波速的变化稳定边界线的两端几乎无变化，边界线的中间段随着波速的增大，稳定域增

大, 且接近刚性水击稳定边界线。

由于弹性水击下的系统为 5 阶系统, 很难从理论上推导稳定域, 根据文献[28]的研究成果, 对于水轮机控制系统, 由于其波动周期为数秒钟, 可用刚性水击模型, 分析图 2 可知弹性水击与刚性水击的临界稳定边界线差别不大。因此可以采用刚性水击模型对稳定域进行理论分析, 其具有一定的指导意义。

### 2 基于刚性水击的稳定域理论推导

基于刚性水击从理论上推导水电站调速器功率模式下负荷调节过渡过程稳定域, 得出合理的调速器参数  $K_P$ 、 $K_I$  取值范围。

令式 (5) 各项系数中的  $T_r=0$ , 则得到刚性水击下系统总的传递函数。该系统的特征方程为

$$a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = 0 \quad (6)$$

式中  $a_0=24e_{qh}T_yT_w$ ;  $a_1=-24e_yeT_wK_P+24T_y+24e_{qh}T_w$ ;  $a_2=24e_yK_P-24e_yeK_I T_w+24$ ;  $a_3=24e_yK_I$ , 其中  $e=e_{qy}e_h/e_y-e_{qh}$ , 为水轮机综合特性系数<sup>[24]</sup>。

根据 Routh-Hurwitz 稳定条件可知  $a_0>0$ ,  $a_1>0$ ,  $a_2>0$ ,  $a_3>0$  及 Hurwitz 行列式  $\Delta_2>0$  时系统才是稳定的。显然  $a_0>0$  及  $a_3>0$  是恒成立的, 只需分析  $a_1>0$ ,  $a_2>0$  及  $\Delta_2>0$ 。

在进行稳定域推导之前, 首先分析特征方程系数中的水轮机传递系数  $e_y$ 、 $e_{qh}$  和  $e$  的正负值。 $e_y$  为水轮机力矩对导叶开度的偏导数, 其值总大于 0;  $e_{qh}$  为水轮机流量对水头的偏导数, 其值也是恒大于 0 的;  $e$  为水轮机综合特性系数, 由文献[29]可知,  $e=-(q/h)$  反映的是出力不变、转速不变的条件下, 水轮机流量相对变化率  $q$  与水头相对变化率  $h$  的关系, 由于  $q$  与  $h$  是成反比的, 因此  $e$  恒大于 0。

由于  $e_y$ 、 $e_{qh}$  和  $e$  恒大于 0, 故可根据  $a_1>0$ ,  $a_2>0$  及  $\Delta_2=a_1a_2-a_0a_3>0$ , 得出

$$K_P < \frac{T_y + e_{qh}T_w}{e_y e T_w} \quad (7)$$

$$K_I < \frac{e_y K_P + 1}{e_y e T_w} \quad (8)$$

$$K_I < \frac{(e_y K_P + 1)(T_y + e_{qh}T_w - e_y e K_P T_w)}{e_y e T_w (T_y + e_{qh}T_w - e_y e K_P T_w) + e_y e_{qh} T_y T_w} \quad (9)$$

$T_y=0.1$  s、 $T_w=3.0$  s 时式 (7)~式 (9) 取等号时对应的曲线, 可知式 (9) 为双曲线, 式 (8) 为该双曲线的一条渐近线, 式 (7) 为双曲线下半支与 X 轴的交点, 即当  $K_I=0$  时, 根据式 (9) 可得出  $K_P=(T_y+e_{qh}T_w)/e_y e T_w$ , 此式刚好为式 (7) 取等号的情况。由图 3 易得出, 稳定区域即为双曲线下半支包含的区域。

由以上分析可知, 基于刚性水击满足水电站调速器功率模式下负荷调节过渡过程稳定性的条件为

$$\begin{cases} K_P < \frac{T_y + e_{qh}T_w}{e_y e T_w} \\ K_I < \frac{(e_y K_P + 1)(T_y + e_{qh}T_w - e_y e K_P T_w)}{e_y e T_w (T_y + e_{qh}T_w - e_y e K_P T_w) + e_y e_{qh} T_y T_w} \end{cases} \quad (10)$$

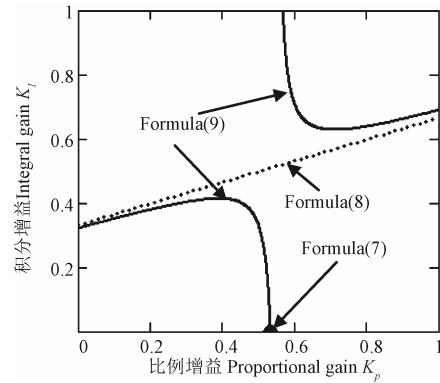
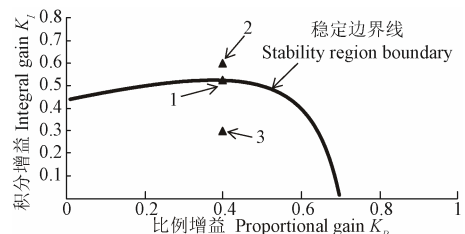


图 3 式 (7) - 式 (9) 所示边界线  
Fig.3 Boundary line of formula (7)-(9)

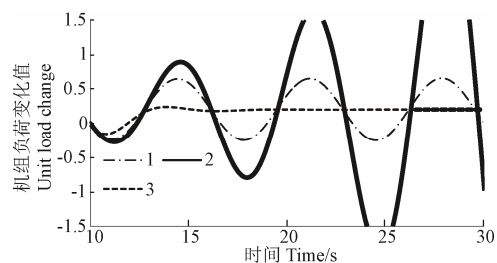
### 3 本文稳定域计算公式的验证

根据本文推导的稳定域判别式 (10), 取理想水轮机参数  $e_y=1.0$ ,  $e_h=1.5$ ,  $e_{qy}=1.0$ ,  $e_{qh}=0.5$ , 及  $T_y=0.4$ s、 $T_w=2.0$ s, 计算得出水电站功率调节模式下负荷调节过渡过程稳定域边界线如图 4a 所示。由动力系统稳定域理论可知, 当参数取值位于稳定域边界上则系统受小扰动后波动是等幅振荡的; 当参数取值位于稳定域边界外 (图 4a 中稳定域边界线右上方) 则系统受小扰动后波动是发散的; 当参数取值位于稳定域边界内 (图 4a 中稳定域边界线左下方) 则系统受小扰动后波动是稳定收敛的。

为验证本文稳定域的计算公式, 分别在稳定域边界上任取一点 1 ( $K_P=0.4$ 、 $K_I=0.526$ ), 稳定域边界外任取一点 2 ( $K_P=0.4$ 、 $K_I=0.6$ ), 稳定域边界上任取一点 3 ( $K_P=0.4$ 、 $K_I=0.3$ ), 进行  $m_g$  向上阶跃 0.2 时的负荷调节过渡过程模拟, 计算结果如图 4b 所示。



a. 功率调节模式下负荷调节稳定域  
a. Stability region of load regulation in power mode



b. 不同区域机组负荷变化过程图  
b. Variations of unit load in different areas

注: 特征点 1 位于稳定域边界, 特征点 2 位于稳定域边界右上方 (边界外), 特征点 3 位于稳定域边界左下方 (边界内)。

Note: Feature point 1 is on the boundary of stability region, feature point 2 is on the upper right of stability region boundary (outside the boundary), and feature point 3 is on the lower left of stability region boundary (inside the boundary).

图 4 稳定域及验证计算结果

Fig.4 Results of stability region and verification calculation

由图 4 可知，稳定边界线上的计算结果是等幅振荡的，在边界外的点（即不稳定区域）计算结果是发散的，在边界内的点（即稳定区域）是收敛的，在 18.6 s 时稳定在目标值。由此亦可佐证本文推导的稳定条件的正确性。

### 4 稳定域影响因素分析

#### 4.1 $T_w$ 值及 $T_y$ 值对系统稳定域的影响

根据式 (10)，取理想水轮机参数，分析  $T_w$  及  $T_y$  对系统稳定域的影响，如图 5 所示。图 5a 以  $T_w$  为参变量， $T_y$  取固定值 0.4 s，图 5b 以  $T_y$  为参变量， $T_w$  取固定值 2.0 s。

分析图 5a 可知，随着  $T_w$  值的增大，稳定域面积不断缩小，不利于系统的稳定；图 5b 中可用对角线将稳定域边界线分为上、下半支，随着  $T_y$  值的增大，边界线上半支下移，对稳定性不利，但下降幅度不大；边界线下半支右移，对稳定性有利，且变化幅度较大；由此可知当  $T_y$  值变大时， $K_p$  可取大值，而  $K_I$  则应取小值。总体来看，随着  $T_y$  值的增大，稳定域面积增大，有利于系统的稳定。

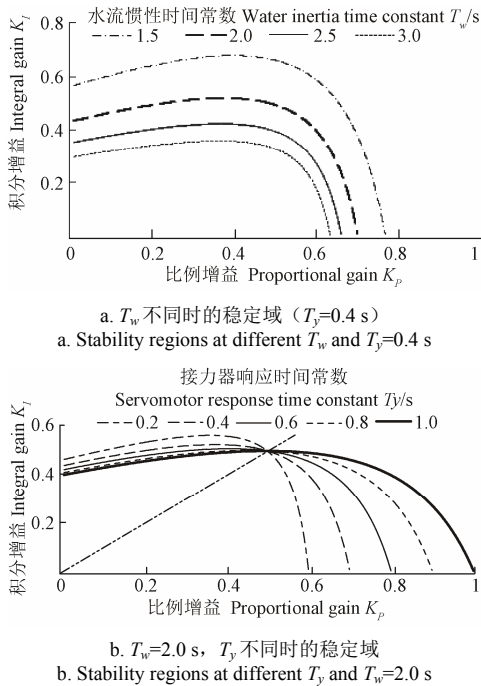


图 5 不同  $T_w$  及  $T_y$  下的稳定域  
Fig.5 Stability regions at different  $T_w$  and  $T_y$

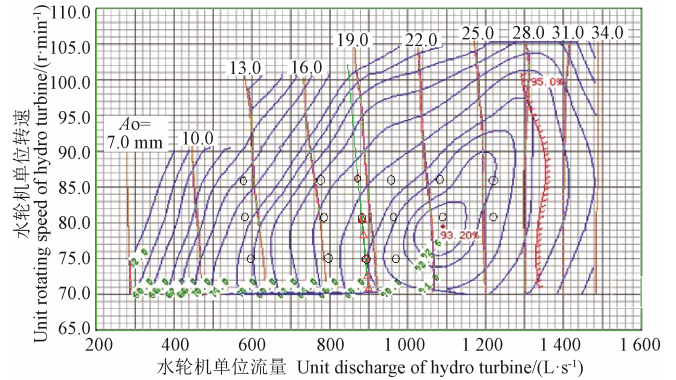
#### 4.2 水轮机运行工况对系统稳定域的影响

本文以某实际水电站为例，分析水轮机运行工作范围内不同工况点下的稳定域。某单管单机水电站基本参数为：水轮机额定出力 44.92 MW，额定水头 42.40 m，最小水头 38.00 m，最大水头 54.99 m，额定转速 136.4 r/min，额定流量 118.04 m<sup>3</sup>/s， $T_w$  值为 5.268 s，转轮直径 3.85 m，转轮型号 A551-35.2，水轮机特性曲线如图 6 所示。

##### 4.2.1 不同水头下稳定域的变化规律

取  $T_y$  为 0.4 s，导叶相对开度 66.12%（绝对开度 18.51 mm，如图 6 绿线所示），分析最小水头 38.00 m、额定水头 42.40、45.00、49.00、52.00 m，最大水头 54.99 m 下稳定域的变化规律，此 6 种水头对应的工况点如图 6 中  $\Delta$  所示，传递系数如表 1 所示。各工况点下计算的稳

定域如图 7 所示。



注：图中标记  $\Delta$  的为相同导叶开度（66.12%）下，不同水头下的工况点；图中标记  $\circ$  的为在 3 个特征水头下（38.00、42.40、49.00 m），相同水头不同导叶开度下的工况点。

Note: In the figure, marked  $\Delta$  is the operating points under different water heads with the same guide vane opening (66.12%). Marked  $\circ$  in the figure is the operating points under three characteristic water heads (38.00, 42.40, 49.00 m) with the same water head and different guide vane opening.

图 6 A551-35.2 水轮机综合特性曲线  
Fig.6 Hill chart for francis turbine A551-35.2

表 1 不同水头下水轮机传递系数（开度为 66.12%）  
Table 1 Turbine transfer coefficients at different water heads (guide vane opening is 66.12%)

| 水头 Water head/m | $e_y$   | $e_{qh}$ | $e$     | $e e_y$ |
|-----------------|---------|----------|---------|---------|
| 38.00           | 0.9680  | 0.452 0  | 0.658 6 | 0.637 5 |
| 42.40           | 1.151 1 | 0.432 3  | 0.591 0 | 0.680 3 |
| 45.00           | 1.208 2 | 0.409 7  | 0.573 6 | 0.693 0 |
| 49.00           | 1.297 8 | 0.393 3  | 0.555 7 | 0.721 2 |
| 52.00           | 1.380 8 | 0.374 4  | 0.547 0 | 0.755 4 |
| 54.99           | 1.439 9 | 0.364 9  | 0.525 0 | 0.755 9 |

分析图 7 可知，当开度相同时，随着水头的增大，稳定域面积越小，稳定性越差。其主要原因为随着水头的增大， $e_{qh}$  逐渐减小， $e_y$  逐渐增大，因此  $K_p$ （如式 (10) 可知）逐渐减小，稳定域减小。由于最大水头时  $e_y e$  最大，因此其稳定性最差。

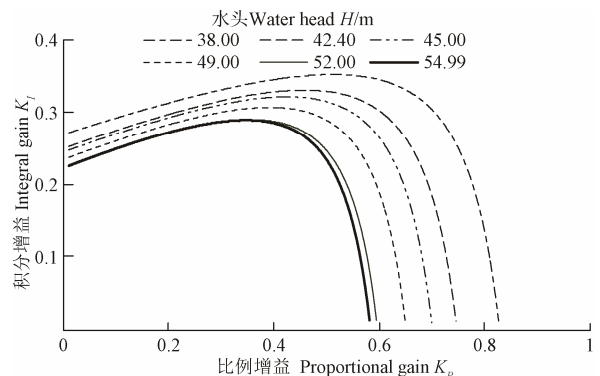


图 7 相同开度不同水头下的稳定域  
Fig.7 Stability regions at same guide vane opening and different water heads

##### 4.2.2 不同开度下稳定域的变化规律

取  $T_y$  为 0.4 s，分析最小水头 38.00 m、额定水头 42.4 和 49.00 m 水头下，不同开度时稳定域的变化规律。3 种水头下，各开度对应的工况点如图 6 中  $\circ$  点所示，传递系

数如表2所示。各工况点下计算的稳定域如图8、9所示。

表2 3种水头下各开度水轮机传递系数

Table 2 Turbine transfer coefficients of different guide vane opening under three water heads

| 水头<br>Water head/m | 导叶开度<br>Guide vane opening/% | $e_y$   | $e_{gh}$ | $e$     | $e_y e$ |
|--------------------|------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| 38.00 (最小水头)       | 92.04 (额定开度)                 | 0.674 3 | 0.522 6  | 1.075 5 | 0.725 2 |
|                    | 81.15                        | 0.960 8 | 0.519 8  | 0.876 7 | 0.842 3 |
|                    | 73.36                        | 1.081 3 | 0.493 5  | 0.780 0 | 0.843 4 |
|                    | 66.12                        | 0.968 0 | 0.452 0  | 0.658 6 | 0.637 5 |
|                    | 57.72                        | 1.036 2 | 0.432 3  | 0.540 2 | 0.559 7 |
| 42.40 (额定水头)       | 92.04 (额定开度)                 | 0.710 1 | 0.512 8  | 1.153 4 | 0.819 0 |
|                    | 81.15                        | 1.001 8 | 0.487 7  | 0.934 8 | 0.936 5 |
|                    | 73.36                        | 1.310 5 | 0.461 0  | 0.666 5 | 0.873 5 |
|                    | 66.12                        | 1.151 1 | 0.432 3  | 0.591 0 | 0.680 3 |
|                    | 57.72                        | 1.231 7 | 0.398 1  | 0.474 2 | 0.584 1 |
| 49.00              | 73.04 (发额定出力对应的开度)           | 1.535 1 | 0.411 9  | 0.568 6 | 0.872 8 |
|                    | 66.12                        | 1.297 8 | 0.393 3  | 0.555 7 | 0.721 2 |
|                    | 57.72                        | 1.420 1 | 0.372 3  | 0.461 9 | 0.655 9 |
|                    | 45.09                        | 1.708 1 | 0.265 9  | 0.309 7 | 0.529 1 |

分析图8可知,3种水头下最小稳定域分别发生在导叶开度为73.36%、81.15%及73.04%的工况点处,对比表2可知,这3种开度对应的工况点的 $e_y e$ 值分别是相同水头下的最大值。因此可以得出,相同水头下稳定域最不利的工况点为 $e_y e$ 值最大处。

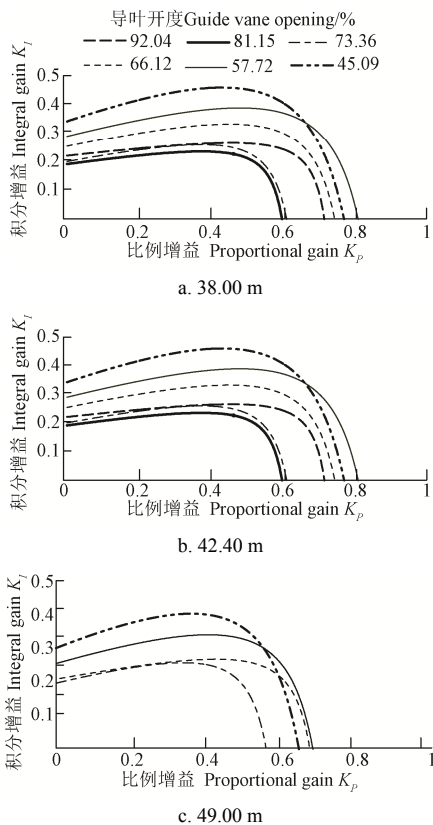


图8 不同水头下不同导叶开度下的稳定域  
Fig.8 Stability regions at different guide vane opening with different water heads

#### 4.2.3 最不利工况分析

由4.2.1及4.2.2两小节的分析来看, $e_y e$ 值最大处为稳定性最不利的工况点。根据图6所示的综合特性曲线,计算得出任一工况点的 $e_y e$ 值,如图9所示,图中红色线为该电站水轮机运行工作范围边界线。

对比图6和图9可知,在高效率区附近 $e_y e$ 值较大,在高效率区下方出现最大值,因此高效率区下方的高水头工况为稳定性最不利工况。在实际工程中可以根据水轮机的工作范围与高效区的相对位置,来初步确定最不利工况,如本水电站水轮机工作范围包含高效区,因此在大于额定水头小于最大水头满负荷运行时的工况为最不利工况。

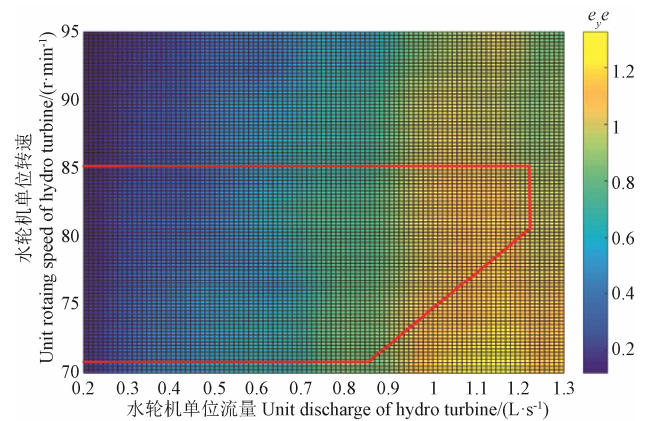


图9 A551-35.2水轮机任一工况点的 $e_y e$ 值分布图  
Fig.9 Distribution of  $e_y e$  at any operating points of turbine A551-35.2

## 5 结论

本文对水轮机调速器功率模式下负荷调节过渡过程的稳定性进行了分析,得出了以调速器参数为变量的机组运行稳定域,并推导出了满足调速器功率模式下负荷调节过渡过程稳定性的判别式,分析了水流惯性、继电器响应特性以及水轮机特性对稳定域的影响,得出以下主要结论:

1) 通过对不同水锤波速下机组稳定域的对比可知,水锤波的波速对调速器功率模式稳定域的影响有限,弹性水锤模型和刚性水锤模型下得到的稳定域差别不大。

2) 水流惯性时间常数 $T_w$ 值对稳定域的影响较大。随着 $T_w$ 值的增大,稳定域面积不断缩小,不利于系统的稳定。

3) 调速器反应时间常数 $T_y$ 值对稳定域的影响较大。随着 $T_y$ 值的增大,稳定边界 $K_I$ 略有减小但 $K_P$ 有明显的增加。总体来看,随着 $T_y$ 值的增大,稳定域面积增大,有利于系统的稳定。当 $T_y$ 值减小时,为保证功率调节过程的稳定,调速器 $K_P$ 值应减小。

4) 水轮机运行工况对系统稳定域有较大影响。本文通过某一水电站工程实例对“相同开度,不同水头”及“相同水头,不同开度”下的工况点进行稳定域计算,得出随着水头的增大,水轮机综合特性系数 $e$ 与水轮机传递

系数  $e_3$  乘积值 (即  $e_3 e$ ) 逐渐增大, 稳定域面积逐渐减小, 稳定性变差; 同时得出稳定域大小与  $e_3 e$  值密切相关,  $e_3 e$  值越大, 系统稳定域越小, 稳定性越差。根据水轮机综合特性曲线计算得出任一点  $e_3 e$  值, 发现在高效率区附近  $e_3 e$  值较大, 在高效区下方出现最大值。因此由水轮机的工作范围与高效区的相对位置, 可初步确定负荷调节稳定性的最不利工况点, 如本文实例中水轮机工作范围包含高效区, 因此在大于额定水头小于最大水头满负荷运行时的工况为最不利工况。

#### [参 考 文 献]

- [1] 程春田, 励刚, 程雄, 等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 549—560.  
Cheng Chuntian, Li Gang, Cheng Xiong, et al. Large-scale ultra High voltage direct current hydropower absorption and its experiences[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 549—560. (in Chinese with English abstract)
- [2] 易跃春. “十三五”我国水电及新能源发展路径[J]. 中国电力企业管理, 2017, 4(7): 27—30.  
Yi Yuechun. “Thirteenth Five-Year Plan” development path of hydropower and new energy in China[J]. China Power Enterprise Management, 2017, 4(7): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [3] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 侯君, 刘映尚. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64—70.  
Lu Xiaomin, Chen Lei, Chen Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64—70. (in Chinese with English abstract)
- [4] 周益华, 竺炜. 水轮机及其调速系统对电力系统低频振荡的影响分析[J]. 中国水能及电气化, 2012(4): 13—18.  
Zhou Yihua, Zhu Wei. The study of low-frequency oscillations of hydro-turbine speed control system in power system[J]. China Water Power & Electrification, 2012(4): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄海军, 王秋晨, 刘照友. 论 AGC 功能在大型水电机组中应用的优化策略[J]. 云南水力发电, 2018, 34(3): 119—123.  
Huang Haijun, Wang Qiuchen, Liu Zhaoyou. Discussion on optimization tactics of application of the AGC function to large hydropower plant power generation units[J]. Yunnan Water Power, 2018, 34(3): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [6] 乔亮亮, 李晨坤, 付亮, 等. 某 250MW 水电机组振动区划分及 AGC 避振方法应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 152—154.  
Qiao Langliang, Li Chenkun, Fu Liang, et al. Vibration zone division of a 250 MW hydropower unit and application of AGC vibration avoidance method[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9): 152—154. (in Chinese with English abstract)
- [7] 魏守平. 水轮机调节[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 40—42.
- [8] Wang Guoteng, Xu Zheng, Guo Xiangyang, et al. Mechanism analysis and suppression method of ultra-low-frequency oscillations caused by hydropower units[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 103: 102—114.
- [9] Yang Weijia, Per Norrlund, Johan Bladh, et al. Hydraulic damping mechanism of low frequency oscillations in power systems: Quantitative analysis using a nonlinear model of hydropower plants[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1138—1152.
- [10] 黄伟, 段荣华, 江崇熙, 等. 多机系统超低频振荡稳定分析与调速器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 185—193.  
Huang Wei, Duan Ronghua, Jiang Chongxi, et al. Stability analysis of ultra-low frequency oscillation and governor parameter optimization for multi-machine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 185—193. (in Chinese with English abstract)
- [11] Mo Weike, Chen Yiping, Chen Haoyong, et al. Analysis and measures of ultra-low-frequency oscillations in a large-scale hydropower transmission system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1077—1085.
- [12] 徐敏, 涂亮, 柳勇军, 等. 水电机组高占比电网频率振荡问题分析[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 46—52.  
Xu Min, Tu Liang, Liu Yongjun, et al. Analysis on frequency oscillation of power grid with high-proportion hydro-electric generating set[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [13] 高海翔, 伍双喜, 苗璐, 等. 发电机组引发电网功率振荡原因及其抑制措施研究综述[J]. 电网分析与研究, 2018, 46(7): 49—55, 66.  
Gao Haixiang, Wu Shuangxi, Miao Lu, et al. Overview of reasons for generator-induced power oscillations & its suppression measures[J]. Grid Analysis & Study, 2018, 46(7): 49—55, 66. (in Chinese with English abstract)
- [14] 伍双喜, 徐衍会, 张莎, 等. 机组引发低频振荡的传播特性分析及定位研究[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1917—1921.  
Wu Shuangxi, Xu Yanhui, Zhang Sha, et al. Research on

- propagation characteristics and locating method of low frequency oscillations induced by turbine generator unit[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1917—1921. (in Chinese with English abstract)
- [15] 关欣. 大惯性比率水电机组对现代电力系统稳定性的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Guan Xin. The Influence of Large Inertia Ratio Hydro-Power Unit on the Stability of Modern Electric System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [16] Sun Zhenglong, Cai Guowei, Yang Deyou, et al. Application of power system energy structures to track dominated oscillation paths and generator damping contribution during low-frequency oscillations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 52—68.
- [17] Wang Guoteng, Xu Zheng, Guo Xiangyang, et al. Mechanism analysis and suppression method of ultra-low-frequency oscillations caused by hydropower units[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 103: 102—114.
- [18] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35—39.
- Zhang Jianxin, Liu Chunxiao, Chen Yiping, et al. Countermeasures and experiments on ultra-low frequency oscillation of yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [19] 魏守平, 王雅军, 罗萍. 数字式电液调速器的功率调节[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(4): 20—22.
- Wei Shouping, Wang Yajun, Luo Ping. Power adjustment of digital electric-hydraulic governor[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(4): 20—22. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈艳, 李学礼. 基于自适应 PID 控制的水电站有功功率调节[J]. 大电机技术, 2016(1): 62—64.
- Chen Yan, Li Xueli. Active power regulation based on self adapting PID controller[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2016(1): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [21] 魏加富, 邹桂丽, 孟佐宏, 等. 基于三段速度调节的水电机组功率调节模式探讨[J]. 水电自动化与大坝监测, 2014, 38(3): 3—4, 29.
- Wei Jiafu, Zou Guili, Meng Zuohong, et al. Power regulation mode study based on three-stage speed regulation of hydropower unit[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2014, 38(3): 3—4, 29. (in Chinese with English abstract)
- [22] 付亮. 带变顶高尾水洞水电机组调速器功率模式优化研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 88—95.
- Fu Liang. Optimization of governor power mode for hydro-turbine units with slope ceiling tail tunnels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 88—95. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘国富, 王晓瑜, 金玉成. 水轮机调速器改进型控制结构结合增量式 PID 算法的功率调节及一次调频的实现[J]. 大电机技术, 2016(4): 61—64.
- Liu Guofu, Wang Xiaoyu, Jin Yuchen. The realization of improved power regulation control structure and the frequency primary regulation for hydraulic turbine governor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2016(4): 61—64. (in Chinese with English abstract)
- [24] 高晓光, 唐戡群. 构皮滩水电机组功率模式下的一次调频功能试验研究[J]. 水电站机电技术, 2015, 38(9): 25—28.
- Gao Xiaoguang, Tang Jiqun. Study on pfr function test of Goupitan hydropower unit in power mode[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2015, 38(9): 25—28. (in Chinese with English abstract)
- [25] 尹利群, 王雄, 付亮, 等. 水电机组有功波动分析及处理[J]. 湖南电力, 2017, 37(5): 51—59.
- Ying Liqun, Wang Xiong, Fu Liang, et al. Analysis and treatment on active power fluctuation of hydro generator[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(5): 51—59. (in Chinese with English abstract)
- [26] 纪可可, 徐亮, 汪志华. 二滩水电站 3 号机组低频振荡原因分析[J]. 人民长江, 2016, 47(21): 103—105.
- Ji Keke, Xu Liang, Wang Zhihua. Cause analysis of low frequency oscillation of unit 3 in Ertan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2016, 47(21): 103—105. (in Chinese with English abstract)
- [27] 国家能源局. 同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则: DL/T 1235—2013 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [28] 沈祖谥. 水轮机调节系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [29] 杨建东, 赖旭, 陈鉴治. 水轮机特性对调压室稳定断面面积的影响[J]. 水利学报, 1998, 29(2): 7—11.
- Yang Jiandong, Lai Xu, Chen Jianzhi. The effect turbine characteristic on stable sectional area of surge tank[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(2): 7—11. (in Chinese with English abstract)

## Stability of load regulation transition process of hydro turbine governor in power regulation mode

Bao Haiyan<sup>1</sup>, Long Liting<sup>1</sup>, Fu Liang<sup>2</sup>, Wei Jiafu<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Whether the load regulation transition process of the hydropower unit can be stably carried out will have an important impact on the safe operation of the power grid and the coordination of the source network as it is the backbone power supply for peak and frequency modulation in the power system. During the load regulation transition process, the governor power mode automatically completes the power closed-loop regulation by the governor, and quickly responds to the load adjustment command issued by the AGC, which responds fast and realizes the coordinated control of the primary frequency modulation and the AGC. Due to the combination of water hammer effect, the nonlinearity of the turbine and the time-varying parameters, the stability characteristics of load regulation transition process of hydropower units become more complicated than imagined. At present, the research on governor power mode mostly focuses on control logic, experimental simulation and control parameters optimization and rarely involves the stability problem of load regulation. Yet there are actually more than one hydropower plants that have experienced instability during operation. The problem of instability in the power mode leads to power oscillation, endangering the security of the grid and the coordination of the source network. In this paper, the method of theoretical analysis and numerical simulation is used to deeply analyze the stability of the transition process of load regulation under the governor power mode of hydraulic turbine, therefore the stability region of unit operation with the governor parameters as variables is obtained and the discriminant for the stability of load regulation transition process in the power mode of governor is deduced. Through this discriminant, the stable condition of load regulation transition process can be obtained quickly, and the parameter setting of governor in power mode can be effectively guided to ensure the stable operation of hydropower unit. The influence of water flow inertia  $T_w$ , servo response characteristic  $T_y$  and turbine characteristics on the stability domain are analyzed. The results show that the value of  $T_w$  has a great influence on the stability region. As the value of  $T_w$  increases, the area of the stable region decreases, which is not conducive to the stability of the system. With the increase of  $T_y$ 's value, the area of the stability region increases, which is conducive to the stability of the system. When  $T_y$ 's value decreases, the governor parameter  $K_p$  should be reduced in order to ensure the stability of the power regulation process. The study also indicates that the operating condition of water turbine has a great impact on the system's stability region. The size of the stability region is closely related to the product value of the comprehensive characteristic coefficient of water turbine  $e$  and the transfer coefficient of water turbine  $e_y$ . The larger the product value, the smaller the system's stability region. Based on the research results of this paper, a detailed analysis of a case of hydropower unit is carried out. According to the comprehensive characteristic curve of the turbine, the most unfavorable working condition of power regulation stability can be accurately found. The research results of this paper can effectively guide the safe operation of hydropower units, which is of great significance to the safety of the power grid and the coordination of the source network.

**Keywords:** hydropower station; hydro turbine; power mode; load regulation; stability; governor parameters