

# 利用水电机组水压反馈改善电力系统稳定性

程远楚<sup>1</sup>, 孙玉涵<sup>1</sup>, 叶鲁卿<sup>2</sup>, 徐德鸿<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北省 武汉市 430074; 3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Improving Power System Stability by Use of Water Pressure Feedback of Hydropower

CHENG Yuan-chu<sup>1</sup>, SUN Yu-han<sup>1</sup>, YE Lu-qing<sup>2</sup>, XU De-hong<sup>3</sup>

(1. School of Dynamic and Mechanics, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 2. School of Hydropower and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 3. College of Electric Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** By means of simulation of complex nonlinear model of hydropower generating unit, the impact of the control law of hydraulic turbine governor on power system stability is researched, and a control idea of adopting water pressure feedback to improve power system stability is proposed. Simulation results show that due to the water hammer effect of water diversion system for hydropower generating unit, the automatic regulation of prime mover may deteriorates system damping and makes the decay rate of rotor vacillation decelerated evidently; however, by means of introducing the derivative feedback of water pressure the attenuation of rotor vacillation can be accelerated and improve power system stability effectively. The proposed method is simple and easy to implement in hydraulic turbine governor.

**KEY WORDS:** hydropower generating unit; nonlinear model; water pressure feedback; governor; power system stability

**摘要:**通过对水电机组复杂非线性模型的仿真,研究了水轮机调速器控制规律对电力系统稳定性的影响,并提出了采用水压反馈改善电力系统稳定的控制思想。仿真研究结果表明:由于水电机组引水系统的水击效应,原动机的自动调节会恶化系统阻尼,使转子摇摆曲线的衰减速度明显减慢,而引入水压的微分反馈可加快振荡过程的衰减,有效改善电力系统的稳定性。文中所提方法简单,易于在水电机组调速器上实现。

**关键词:**水电机组;非线性模型;水压反馈;调速器;电力系统稳定性

## 0 引言

随着电力系统的发展,互联电网的容量不断扩

大,电力系统结构日趋复杂,电力系统的稳定成为保证电力系统安全、经济、高效运行的关键<sup>[1]</sup>。科学工作者对如何保证和提高电力系统的安全稳定性进行了研究,提出了许多有效的控制方法<sup>[2-7]</sup>,主要有:一方面是有功功率控制,如切机、切负荷、汽轮机快关汽门、电气制动等;另一方面是无功功率控制,如串联电容补偿、中间并联补偿、静止或旋转无功补偿,发电机励磁附加稳定控制等。目前采用较多的为发电机励磁附加控制<sup>[8-11]</sup>。在汽轮机调速器中引入附加控制也有相关研究<sup>[12]</sup>,其中,汽轮机快关汽门控制目前已被广泛研究<sup>[2,6,13]</sup>,并取得了较好效果。

由于水电机组一般远离负荷中心,其输电线路较长,稳定问题较火电机组更为突出,如我国已投运的二滩、白山等电站均存在大负荷的稳定问题,限制了输电线路的输送容量。一方面,在励磁系统中引入附加控制可改善稳定性;另一方面,考虑导叶最佳控制也可提高电力系统稳定性<sup>[14-17]</sup>。但由于水轮机引水系统水流惯性时间常数的影响,当水轮机导叶快速关闭(或开启)时,将在引水系统中产生水击压力上升(或下降),这使水轮机的输出力矩不能立即响应负荷力矩的变化。在系统遭受大干扰扰动时,水电机组不能像火电机组快关汽门那样通过快速关闭导叶来改善电力系统的稳定性。

当水电机组受扰后,其动态响应是一个由水力、机械、电磁过程耦合且紧密相关的复杂过渡过程。有关研究表明<sup>[18-20]</sup>,水轮机引水系统水流惯性时间常数对发电机的暂态过程有显著影响。当不考

虑水击作用时，原动机的自动调节对电力系统的暂态稳定是有利的；但当考虑水击对水轮机力矩变化的影响时，引水系统惯性时间常数  $T_w$  的增大会恶化系统阻尼，使转子摇摆曲线的衰减速度明显减慢。

文献[21]考虑了水击效应的动态补偿，以提高电力系统暂态稳定性为目标，设计了水轮机调速器的非线性最优控制器，多机系统的仿真证明了其有效性。但该文提出的控制律在现有的调速系统中实现有一定的难度，同时，该控制律中没有频率的积分控制，可能会影响到电力系统的频率稳定。本文将在传统水轮机调速器的基础上，通过引入附加控制信号来减少或消除水力机组水力过渡过程对电力系统的不利影响，改善电力系统的稳定性。

### 1 水轮机与引水系统的动力特性

为分析水电机组水流惯性时间常数的影响，首先讨论水轮机与引水系统的动力特性。为分析方便，取简化的理想水轮机及引水系统数学模型，其输出机械力矩与水轮机导叶开度的传递函数为

$$\frac{m_t(s)}{y(s)} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s}$$

为研究水轮机力矩随导叶度变化的关系，假定接力器行程阶跃变化，则单位阶跃响应函数为

$$m_t(t) = (1 - 3e^{-t/0.5T_w})y(t)$$

单位阶跃响应曲线如图 1 所示。

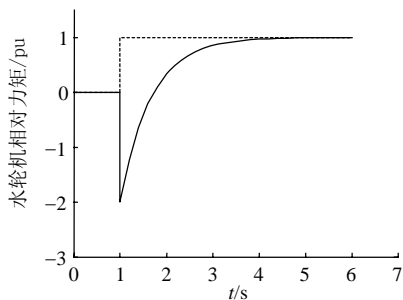


Fig. 1 Curve of turbine torque when servomotor steps

从图 1 可以看出：当接力器有阶跃变化时，水轮机力矩并不是立即跟随接力器的增大而增大，而是在阶跃的瞬间有一负的跃变，然后按指数规律逐渐上升，一直到稳态接力器开度所对应水轮机力矩。这说明当接力器突然开启时，水轮机输出力矩先降低，然后再逐渐升至对应值；反之，当接力器突然关闭时，水轮机输出力矩先升高，然后再逐渐降至对应值。水电机组由于水击效应，在开(关)机

初始阶段出现较大的反方向输出力矩(功率)，称为反调功率。正是由于水击效应导致的反调功率，使得考虑原动机调节作用后的电力系统稳定性变差，这是水电机组与汽轮发电机的根本区别。

对于理想水轮机及引水系统数学模型，考虑比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)调速器的控制作用，水轮机力矩与机组转速给定值之间的传递函数为

$$\frac{m_t(s)}{x_c(s)} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} \frac{1}{1 + T_y s} (K_P + K_I \frac{1}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_1 s})$$

对于转速的单位阶跃响应，水轮机力矩变化过程如图 2 所示。图中：实线为比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制时响应曲线，点线为比例-微分(proportional-derivative, PD)控制时的响应曲线，虚线为比例-积分(proportional-integral, PI)控制时的响应曲线，点划线为比例控制时的响应曲线。

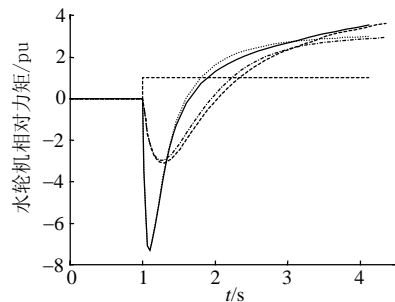


图 2 转速阶跃时力矩变化曲线

Fig. 2 Curve of turbine torque when speed steps

从图 2 中可以看出：在水轮机控制系统的调节过程中，由于接力器行程不会突变，反调功率不像图 1 那么大，但反调功率与调整功率的比值较大。调节过程中的反调功率增加了转速偏差的增长速率，从而使转子摇摆过程加剧。有微分时反调功率的幅值要比无微分时大得多，但其趋近于稳态值的速度较快。对于完全非线性的水轮机及引水系统模型，这种反调特性同样存在。

## 2 数学模型

### 2.1 发电机数学模型

发电机采用 7 阶数学模型，即

$$\begin{aligned} \psi_d &= -L_d i_d + L_{ad} i_f + L_{ad} i_{kd} \\ \psi_q &= -L_q i_q + L_{aq} i_{kq} \\ \psi_f &= -L_{ad} i_d + L_f i_f + L_{fkd} i_{kd} \\ \psi_{kd} &= -L_{ad} i_d + L_{fkd} i_f + L_{kqd} i_{kd} \\ \psi_{kq} &= -L_{aq} i_q + L_{kq} i_{kq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_d &= \frac{\dot{\psi}_d}{\omega_0} - (x+1)\psi_q + r_a i_d \\
v_q &= \frac{\dot{\psi}_q}{\omega_0} + (x+1)\psi_d - r_a i_q \\
v_t &= \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \\
e_f &= \frac{\dot{\psi}_f}{\omega_0} + r_f i_f \\
0 &= \frac{\dot{\psi}_{kd}}{\omega_0} + r_{kd} i_{kd} \\
0 &= \frac{\dot{\psi}_{kq}}{\omega_0} + r_{kq} i_{kq} \\
m_e &= i_q \psi_d - i_d \psi_q \\
\frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_0 = \omega_0 x \\
\frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{T_a} (m_t - m_e - \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt})
\end{aligned}$$

式中具有下标 d、q、0 的定子量为相应三相变量的 d、q 轴分量和零序分量。具有下标 f、k<sub>d</sub>、k<sub>q</sub> 的变量为转子励磁绕组和 d、q 轴等效阻尼绕组的变量。式中 L 表示电感系数大小。电感系数 L<sub>d</sub>、L<sub>q</sub>、L<sub>0</sub> 为定子绕组 d 轴、q 轴同步电感系数和零序电感系数。L<sub>f</sub>、L<sub>kd</sub>、L<sub>kq</sub> 为转子各绕组的电感系数；L<sub>ad</sub>、L<sub>aq</sub> 为定子绕组与转子绕组间的互感系数；L<sub>rkd</sub> 为转子绕组之间的互感系数。下标 a 表示定子绕组，f 表示转子励磁绕组。v<sub>t</sub> 表示机端电压；x 为发电机转速偏差相对值，x = (ω - ω<sub>0</sub>)/ω<sub>0</sub>；δ 为转子角；T<sub>a</sub> 为机组惯性时间常数。

## 2.2 水轮机数学模型

水轮机特性曲线难以用解析函数形式表达，通常用综合特性曲线描述。一般系统采用在工作点附近线性化的模型或理想水轮机模型。实际上水轮机是一个严重的非线性环节，线性化后的各传递系数随着运行工况会发生较大的变化，个别系数甚至会发生符号的改变，从而影响分析结果的可信度。为此，本研究中将水轮机的单位流量 Q<sub>11</sub> 和单位力矩 M<sub>11</sub> 用 3 层 BP 神经网络表示

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= f(y, n_{11}) = \text{simuf}((y, n_{11}), w_{q1}, b_{q1}, \\
&\quad \text{'tansig' }, w_{q2}, b_{q2}, \text{'tansig' }, w_{q3}, b_{q3}, \text{'purelin' }) \\
M_{11} &= f(y, n_{11}) = \text{simuf}((y, n_{11}), w_{m1}, b_{m1}, \\
&\quad \text{'tansig' }, w_{m2}, b_{m2}, \text{'tansig' }, w_{m3}, b_{m3}, \text{'purelin' })
\end{aligned}$$

式中：simuf 表示一反向传播(back propagation, BP)

神经网络函数；w 和 b 分别为权系数和阈值；tansig 为 sigmoid 函数；purelin 为线性输出函数。

因

$$n_{11} = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} = \frac{1+x}{\sqrt{h_0+h}} n_{11r}$$

又有

$$\begin{aligned}
Q &= Q_{11} D_1^2 \sqrt{H}, \quad q = \frac{Q}{Q_r} = \frac{Q_{11}}{Q_{11r}} \sqrt{h_0+h} \\
M_t &= M_{11} D_1^3 H, \quad m_t = \frac{M_t}{M_{11r}} = \frac{M_{11}}{M_{11r}} (h_0+h)
\end{aligned}$$

式中：n<sub>11r</sub> 额定单位转速；Q<sub>11r</sub> 为额定单位流量；M<sub>11r</sub> 为额定单位力矩；h<sub>0</sub>=H<sub>0</sub>/H<sub>r</sub> 为初始水头。

## 2.3 引水系统数学模型

当导叶开度发生改变，水轮机的流量和力矩均会发生相应的改变。流量的变化会在引水系统中产生水击，引起水头的变化。考虑水流与管壁的弹性，忽略水流与管壁间的摩擦，有

$$\frac{h(s)}{q(s)} = \frac{2T_w}{T_r} \frac{1-e^{-T_r s}}{1+e^{-T_r s}}$$

式中：T<sub>w</sub> 为水流惯性时间；T<sub>r</sub> 为水击波长，又称管道反射时间。

文献[18]通过大量的仿真研究表明，理想水轮机模型不能反映系统的真实情况，弹性水击模型较符合实际情况，刚性水击模型计算结果较为保守。在引水管道不是很长，T<sub>r</sub> 较小时，两者差别不大，只有当 T<sub>r</sub>/T<sub>w</sub>>1 时，两种模型下的转子摇摆曲线差别变大，这与秋元德三的水击理论是相吻合的。由 T<sub>r</sub> 和 T<sub>w</sub> 的定义可知，当 T<sub>r</sub>/T<sub>w</sub>>1 时，相应的电站水头将在 200 m 以上。为简化计算中低水头的电站，可采用刚性水击方程

$$h = -T_w \frac{dq}{dt}$$

## 2.4 调速器数学模型

### 2.4.1 调速器控制算法

调速器采用 PID 控制算法，控制输出 u 与转速偏差 e 的传递函数为

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D \frac{s}{1+T_1 s}$$

式中：K<sub>P</sub> 为比例系数；K<sub>I</sub> 为积分系数；K<sub>D</sub> 为微分系数；T<sub>1</sub> 为时间常数；e 为转速设定值与机组实际转速偏差的差值。

### 2.4.2 液压随动系统数学模型

简化的液压随动系统数学模型为一阶惯性环节：

$$y + T_y \frac{dy}{dt} = u$$

式中： $y$  为接力器行程； $T_y$  为接力器时间常数，在本算例中取  $T_y=0.2$  s。考虑实际工程中，接力器的开关时间受调节保证计算的限制，取最短关闭时间为 6.5 s。

### 2.5 励磁系统数学模型

励磁系统采用 IEEE 给出的 ST1A 型励磁系统数学模型，所配置的电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)采用 IEEE 推荐的 PSS1A 型电力系统稳定器数学模型。

## 3 水力系统对电力系统稳定的不利影响与控制对策

图 3 为一单机无穷大系统。图中， $x_{L1}=x_{L2}=0.6$ ， $r_{L1}=r_{L2}=0.1$ ， $x_T=0.01$ 。为研究水力系统对电力系统稳定的不利影响与控制对策，根据上节给出的数学模型，采用全非线性仿真平台<sup>[22]</sup>，研究在 2 s 时一条线路首端三相短路，2.15 s 时断路器跳闸，2.75 s 时重合闸成功这种扰动情况下不同  $T_w$  值时的转子振荡过程。

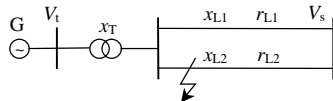


图 3 单机无穷大系统

Fig. 3 One-machine infinite-bus power system

首先研究调速器采用 PID 或 PI 控制规律，励磁调节器采用 PI+PSS 控制规律时的动态过程，当励磁控制采用 PI+PSS 调节功能，调速器分别采用 PI 和 PID 控制规律。 $T_w=0$ (假定不考虑水击的影响)时，发电机组的动态过程如图 4 所示； $T_w=1.328$  时，发电机组的动态过程如图 5 所示。

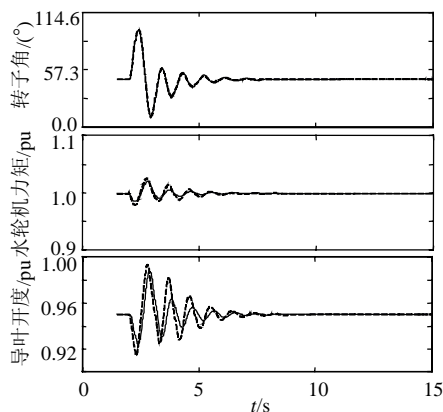


图 4  $T_w=0$  时的动态过程

Fig. 4 Dynamic course when  $T_w=0$

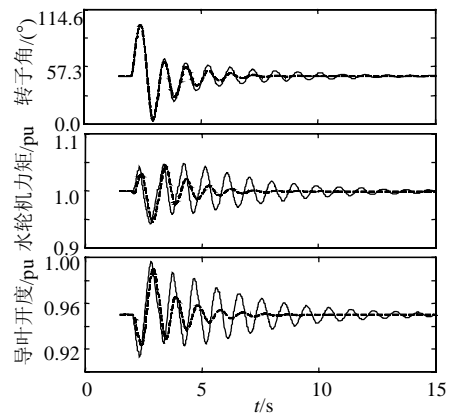


图 5  $T_w=1.328$  时的动态过程

Fig. 5 Dynamic course when  $T_w=1.328$

图 4 中，实线为调速器采用 PI 调节规律，虚线为调速器采用 PID 调节规律。从图中可以看出，当不考虑水力机组的水击效应时，调速器的微分调节作用有助于导叶的快速调节，使振荡衰减略微加快。

图 5 中，实线为调速器采用 PID 调节规律，虚线为调速器采用 PI 调节规律。从图中的  $m_t$  曲线可以明显看出，当  $T_w$  不为零时的水轮机力矩曲线与  $T_w$  为零时的水轮机力矩曲线变化趋势正好相反。因此，由于水击作用的影响，调速器的控制调节作用恶化了系统的阻尼特性。水力系统对电力系统暂态稳定特性的影响是由于导叶开度的变化引起的水力系统暂态过程而形成的。调速器的微分调节作用会减小机组的阻尼，使振荡衰减变慢。因此，为保证电力系统的稳定性，并入电力系统运行的水电机组应切除微分环节。

## 4 利用水压反馈改善电力系统暂态稳定性

水击作用的产生是由于导叶开度变化引起流量变化所导致。显然，通过合理的导叶开度调整可以将水击的这种不利作用降至最低。为改善长引水管的机组带孤立网负荷时的稳定性，文献<sup>[23]</sup>提出了一种水压反馈方案。试验证明引入水压反馈后能有效改善水轮机调速系统带孤立网负荷时的稳定性。借鉴该文思想，本文研究利用水压反馈改善电力系统稳定性。

为抑制水轮机的反调功率，引入了 3 种不同形式的水压反馈信号：一是直接采用水压信号，即构成比例反馈；二是采用水压信号的微分反馈；三是采用水压信号的比例微分反馈。当调速器采用 PID 控制规律，励磁调节器采用 PI 控制规律(无 PSS)，引入不同的水压反馈时，在前述扰动情况下，机组的动态过程如图 6、图 7 所示。

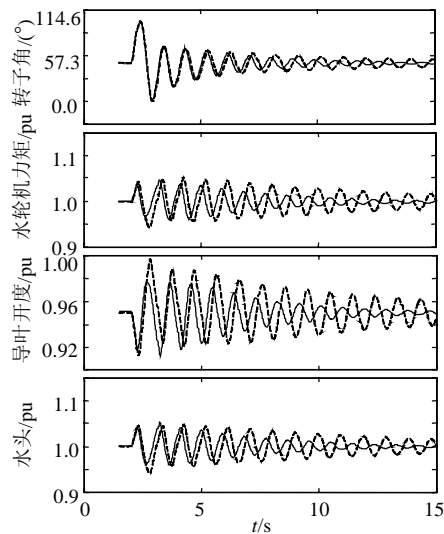


图 6 引入水压比例反馈时的动态过程波形

Fig. 6 Dynamic course when the proportion feedback of water pressure is introduced

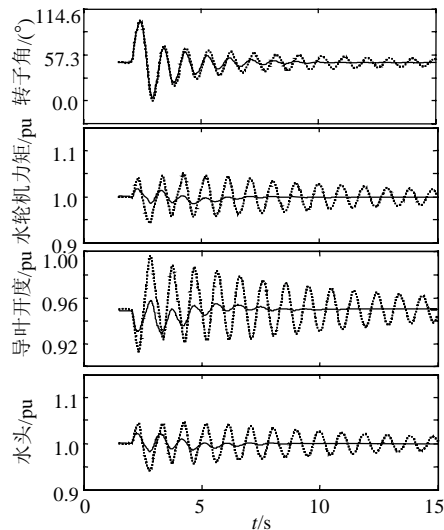


图 7 引入水压微分反馈时的动态响应过程

Fig. 7 Dynamic course when the differential feedback of water pressure is introduced

图 6 中, 实线为有水压反馈的动态响应过程, 虚线为无水压反馈时的动态响应过程。仿真研究表明: 引入水压反馈后, 当断路器关闭而使引水系统水压升高时, 通过水压反馈使断路器的关闭速度减慢。当水压升高多时, 断路器关闭速度减慢得多, 水压升高少时, 断路器关闭速度减慢得少, 从而使调节过程中水压变化的幅度大大减小, 有效地减少了动态过程中的水轮机反调功率, 改善了系统的稳定性。图 7 中, 实线为有水压反馈的动态响应过程, 虚线为无水压反馈时的动态响应过程。

从图 6 中可以看出, 引入水压的比例反馈后, 由于水击效应而产生的水轮机反调功率明显减小, 转子角的振荡过程衰减加快; 而引入水压的微分反

馈时, 反调功率减小最为明显, 转子角的振荡过程衰减明显加快; 而引入水压的比例微分反馈时, 其效果与纯微分反馈的效果非常接近(略差, 图中未给出)。因此, 引入水压的微分反馈将有利于改善电力系统的稳定性。

当调速器采用 PI 控制规律, 励磁调节器采用 PI 调节时, 引入水压微分反馈时机组动态过程如图 8 中的实线所示(虚线为无水压反馈时的动态过程曲线)。此时, 由于水击效应较调速器采用 PID 控制规律时小, 引入水压反馈的控制效果没有图 7 明显, 但引入水压反馈后, 对第一摆的衰减还是比较明显的。

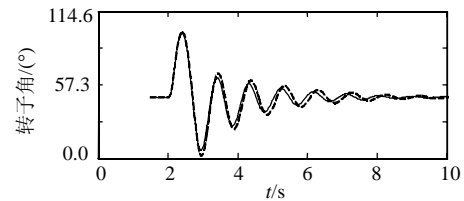


图 8 调速器采用 PI 控制规律时的动态过程

Fig. 8 Dynamic course when the governor adopt PI control regulation

## 5 结论

由于引水系统的水击效应, 在电力系统的暂态过程中, 原动机的自动调节会产生水轮机的反调功率, 从而恶化系统阻尼, 给电力系统的稳定带来明显的负面影响。水轮机调速器的微分作用, 会使水击效应产生的反调功率增大, 使转子摇摆曲线的衰减速度明显减慢, 甚至导致在暂态过程的尾部出现振荡。本文提出引入水压反馈来改善电力系统稳定的思想, 仿真结果表明水压微分反馈可有效地改善电力系统的稳定性。本文所提方法简单, 易于在水电机组调速器上实现。

## 参考文献

- [1] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
Zhu Fang, Zhao Hongguang, Liu Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [2] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 155-215.
- [3] Youngmoon P, Kwangho L, Myeonsong C, et al. A comparative study on the control methods of power system stabilization[J]. Power System Technology, 1995, 19(9): 8-14.
- [4] Kundur P. Power system stability and control[M]. Beijing: China

- Electric Power Press, 2001: 1104-1161.
- [5] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 35-39.  
Sun Huadong, Tang Yong, Ma Shiyong. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 35-39(in Chinese).
- [6] Subbarao G V, Iyer A. Nonlinear excitation and governor control using variable structures[J]. International Journal of Control, 1993, 57(6): 1325-1342.
- [7] 孙元章, 卢强, 孙春晓. 电力系统鲁棒非线性控制研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 361-365.  
Sun Yuanzhang, Lu Qiang, Sun Chunxiao. On the study of power system nonlinear robust control[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6): 361-365(in Chinese).
- [8] 康忠健, 陈学允. SVC 与发电机励磁的非线性状态 PI 协调控制[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 30-34.  
Kang Zhongjian, Chen Xueyun. Nonlinear state PI control for static VAR compensator(SVC) cooperating with excitation system of generator[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 30-34(in Chinese).
- [9] 方思立, 朱方. 快速励磁系统对电力系统稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 1986, 6(1): 20-28.  
Fang Sili, Zhu Fang. The effect of fast-response excitation system on the stability of power network[J]. Proceedings of the CSEE, 1986, 6(1): 20-28(in Chinese).
- [10] 苏建设, 柯宁, 陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS 协调策略设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 6-10.  
Su Jianshe, Ke Ning, Chen Chen. Coordinated design of generator excitation and FACTS for transient stability enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 6-10(in Chinese).
- [11] 刘增煌, 方思立. 电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他控制方式的比较[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 4-10.  
Liu Zenghuang, Fang Sili. The effect of power system stabilizer on power system dynamic stability and comparison with other control method[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 4-10(in Chinese).
- [12] 董清, 高曙, 鲍海. 同步发电机调速系统附加  $H^\infty$  鲁棒分散控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 47-51.  
Dong Qing, Gao Shu, Bao Hai. Governor additional  $H^\infty$  robust decentralize control of synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 47-51(in Chinese).
- [13] 张友. 快关汽门提高电力系统稳定水平的研究与试验[J]. 电网技术, 1996, 20(7): 19-21, 27.  
Zhang You. Study and test of steam turbine fast valving for improving power system stability[J]. Power System Technology, 1996, 20(7): 19-21, 27(in Chinese).
- [14] 孙元章, 卢强, 李国杰, 等. 水轮发电机水门非线性控制器研究[J]. 清华大学学报, 1994, 34(1): 7-14.  
Sun Yuanzhang, Lu Qiang, Li Guojie, et al. Nonlinear governor control for hydroturbine generators[J]. Journal of Tsinghua University, 1994, 34(1): 7-14(in Chinese).
- [15] 孙郁松, 孙元章, 卢强. 水轮发电机水门非线性控制规律研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 33-36.  
Sun Yusong, Sun Yuanzhang, Lu Qiang. Research on nonlinear control strategy for hydroturbine governor[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 33-36(in Chinese).
- [16] 孙郁松, 孙元章, 卢强, 等. 水轮机调节系统非线性  $H^\infty$  控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 56-59, 65.  
Sun Yusong, Sun Yuanzhang, Lu Qiang, et al. Reserch on nonlinear robust control strategy for hydro electric generator's valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 56-59, 65(in Chinese).
- [17] 刘翔, 李东海, 姜学智, 等. 水轮发电机组的非线性控制器仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 91-96.  
Liu Xiang, Li Donghai, Jiang Xuezhi, et al. Simulation study on nonlinear controller for hydro turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 91-96(in Chinese).
- [18] 陈舟, 刁勤华, 陈寿孙, 等. 水力系统模型对电力系统低频振荡分析的影响[J]. 清华大学学报, 1996, 36(7): 67-72.  
Chen Zhou, Diao Qinhu, Chen Shousun, et al. Study on the effect of hydraulic system models on power system dynamic stability analysis[J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36(7): 67-72(in Chinese).
- [19] 潘学萍, 鞠平, 卫志农, 等. 水力系统对低频振荡的影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 24-27.  
Pan Xueping, Ju Ping, Wei Zhinong, et al. The influence of hydraulic system on low frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 24-27(in Chinese).
- [20] Vournas C D. Second order hydraulic turbine models for multimachine stability studies[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1990, 5(2): 239-244.
- [21] 卢强, 桂小阳, 梅生伟, 等. 大型发电机组调速器的非线性最优 PSS[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 15-19.  
Lu Qiang, Gui Xiaoyang, Mei Shengwei, et al. A novel nonlinear optimal power system stabilizer for the governor of large-scaled generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 15-19(in Chinese).
- [22] 程远楚, 叶卫华, 叶鲁卿, 等. 发电机励磁调节和电磁过程对机组转速控制的影响[J]. 大电机技术, 2005, (5): 51-53.  
Cheng Yuanchu, Ye Weihua, Ye Luqing, et al. Effects of the electromagnetic process and excitation of generators on speed governing[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2005, (5): 51-53(in Chinese).
- [23] 沈宗树, 张勇传. 水电站机组稳定与控制[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988: 53-55.



程远楚

收稿日期: 2008-03-11.

作者简介:

程远楚(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统及水电机组控制与稳定, E-mail: ycheng@whu.edu.cn.

(编辑 王晔)