

基于现代智能控制技术的水轮机自适应工况 PID 调速器研究

曹程杰^{1,2}, 莫岳平¹

(1. 扬州大学能源与动力工程学院, 江苏 扬州 225000; 2. 南瑞自动控制有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对水轮机常规 PID 调速器不能根据系统的动态过程自动调整控制参数的缺点, 提出一种新的基于现代智能控制技术的水轮机自适应工况 PID 调节方法。该方法根据水轮机模型综合特性曲线划分水轮机工况, 采用一种改进遗传算法对水轮机的不同工况求取最优调节参数, 利用神经网络做到运行工况与最优参数间的平滑切换。经过仿真表明, 该控制方法具有良好的静态和动态性能, 并具有很强的鲁棒性。

关键词: 水轮机调速器; 自适应 PID; 遗传算法; 神经网络

Research of self-adaptive PID hydraulic turbine governor based on modern intelligence control technology

CAO Cheng-jie^{1,2}, MO Yue-ping¹

(1. Yangzhou University, Yangzhou 225000, China; 2. NARI Automatic Control Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to overcome the flaw of general hydraulic turbine PID governor, a new self-adaptive PID control based on the modern intelligence control technology is proposed. First, it divides the condition of hydraulic turbine according to synthetic characteristic curve, then calculates the optimal parameter for different conditions using an improved genetic algorithm, and smoothly switches the parameter by means of ANN. The simulation result shows that the new control method has excellent static and dynamic performance, in addition, it has a strong robust performance.

Key words: hydraulic turbine governor; self-adaptive PID; genetic algorithm; neural network

中图分类号: TM761; TK730 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0081-05

0 引言

随着社会的不断发展和进步, 人们对电能质量的要求也越来越高。由于水电机组具有启动快、开停机迅速、机组平均效率高等优点, 因此很适宜担任系统的调峰调频任务。当机组并入大电网运行时, 水轮机调速器主要作为电网一次调频/负荷控制器、电网二次调频和电网负荷频率控制的功率控制器使用。由此可见, 水轮机调速器的性能是影响电能质量的关键因素之一。目前水轮机调速器的控制规律基本还是 PID 控制, 不断发展的 PID 控制策略以其算法简单、控制效果良好而备受人们的青睐, 但水轮发电机组的调节系统是一个由引水系统、水轮机、发电机和调速器等组成的水机电综合控制系统。由于水流惯性带来的水锤效应, 水轮机各环节的非线性和大惯性, 以及电网负荷变化带来的扰动使得水轮发电机组的调节十分困难。现行的 PID 控

制, 往往只是在机组投运时, 通过现场调试结合经验公式设定一组参数, 对于机组工况的变化及调节模式的改变均缺乏良好的适应性, 而水轮机的运行工况随时有可能偏离设定的工况, 使得固定参数的 PID 控制很难满足现代电力系统的需求^[1]。

本文根据水轮机模型综合特性曲线划分运行工况, 针对每一种工况运用一种改进的遗传算法离线计算最优 PID 调节参数, 然后利用神经网络可以精确逼近未知非线性函数的特点建立各种工况与最优 PID 调节参数之间的映射关系, 做到在运行中根据工况自适应改变调节参数^[2]。

1 水轮机运行工况的划分及传递函数的计算

由水轮机相似理论可知, 同系列水轮机在相似工况下其单位转速 n_{11} 及单位流量 Q_{11} 分别相等, 因此一定的 n_{11} 、 Q_{11} 值就决定了一个相似工况。水轮

机模型综合曲线用 n_{11} 、 Q_{11} 为参变量表示同系列水轮机在不同工况下的效率 η 、导叶开度 a 及空化系数 σ 等的变化情况，因此该曲线包含了水轮机在不同工况下的运行信息，可作为划分水轮机工况的依据。

小波动情况下具有单一调节机构的水轮机线性力矩方程和流量方程可表示为：

$$\begin{aligned} m_t &= e_x x + e_y y + e_h h \\ q &= e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h \end{aligned} \quad (1)$$

式中： q 、 m_t 、 y 、 x 、 h 分别为流量、力矩、接力器行程、转速、水头的相对偏差； e_{qy} 、 e_{qx} 、 e_{qh} 分别为水轮机流量对导叶开度、转速、水头的传递系数； e_y 、 e_x 、 e_h 分别为水轮机力矩对导叶开度、转速、水头的传递系数。

由式(1)可知，水轮机的动态特性是用六个传递系数来描述的，实际水轮机的特性将随着水轮机工况点的变化而改变，这就是水轮机非线性特性的一种表现。反映在六个传递系数上就表现在其不为常数。为此，在对水轮机调节系统进行小波动仿真计算时，对每个工况点分别求取各个传递系数值，就可以较好地反映水轮机的这种非线性特性，提高动态模拟计算精度。

利用水轮机模型综合特性曲线计算传递系数如图 1 所示，首先在图上确定稳态工作点 0，然后在其周围取 1、2、3、4 点。其中 1、2 点在等流量线上，而 3、4 点在等开度线上。于是可以读出各点的 Q_{11i} 、 n_{11i} 、 η_i 、 a_i 等参数，同时可计算出各点的力矩 M_i 、水头 H_i ($i=1, 2, 3, 4$)。传递系数可按式 (3) 计算：

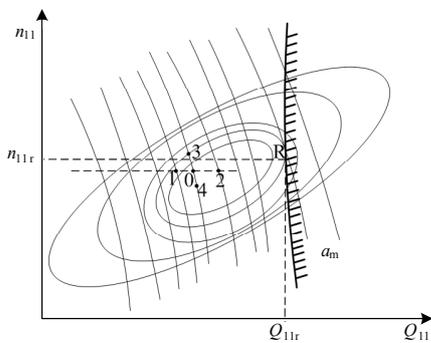


图 1 由综合特性曲线计算传递系数

Fig.1 Calculating transfer coefficient according to synthetic characteristic curve

$$\begin{aligned} e_y &= \frac{\partial m_t}{\partial y} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta y} = \frac{(M_2 - M_1) / M_r}{(a_2 - a_1) / a_M} \\ e_x &= \frac{\partial m_t}{\partial x} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta x} = \frac{(M_4 - M_3) / M_r}{(n_4 - n_3) / n_r} \\ e_h &= \frac{\partial m_t}{\partial h} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta h} = \frac{(M_4 - M_3) / M_r}{(n_4 - n_3) / n_r} \\ e_{qy} &= \frac{\partial q}{\partial y} \approx \frac{\Delta q}{\Delta y} = \frac{(Q_2 - Q_1) / Q_r}{(a_2 - a_1) / a_M} \\ e_{qx} &= \frac{\partial q}{\partial x} \approx \frac{\Delta q}{\Delta x} = \frac{(Q_4 - Q_3) / Q_r}{(n_4 - n_3) / n_r} \\ e_{qh} &= \frac{\partial q}{\partial h} \approx \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{(Q_4 - Q_3) / Q_r}{(H_4 - H_3) / H_r} \end{aligned} \quad (2)$$

式中：

$$\begin{aligned} M_i &= 93740 \frac{Q_{11i} \eta_i}{n_{11i}} D_1^3 H_0 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad i=1,2,3,4 \\ M_r &= 93740 \frac{Q_{11r} \eta_r}{n_{11r}} D_1^3 H_r (\text{N}\cdot\text{m}) \\ Q_i &= Q_{11i} D_1^2 \sqrt{H_0} (\text{m}^3/\text{s}) \quad i=1,2,3,4 \\ Q_r &= Q_{11r} D_1^2 \sqrt{H_r} (\text{m}^3/\text{s}) \\ n_i &= n_{11i} \sqrt{H_0} / D_1 (\text{l}/\text{min}) \quad i=3,4 \\ n_r &= n_{11r} \sqrt{H_r} / D_1 (\text{l}/\text{min}) \\ H_i &= \left(\frac{n_0 D_1}{n_{11i}}\right)^2 \quad i=3,4 \end{aligned} \quad (3)$$

2 水轮机调节系统的数学模型

理论计算采用弹性水击下的线性化小波动水轮机模型，调速器形式为并联 PID 型，发电机模型采用暂态电势 E'_q 恒定的二次模型^[3]。

二阶弹性水击传递函数为：

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -h_w \frac{T_r s}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2} \quad (4)$$

式中： h_w 为管道特征系数； T_r 为水锤压力波反射时间，即水锤相长。

线性化小波动水轮机模型为：

$$\begin{aligned} m_t &= e_x x + e_y y + e_h h \\ q &= e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h \end{aligned} \quad (5)$$

式中：各量含义如前所述。

并联 PID 调速器传递函数为：

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_d s} \quad (6)$$

式中： K_p 、 K_I 、 K_D 分别为比例系数、积分系数、微分系数； T_d 为暂态反馈时间常数。

机械液压模块传递函数为:

$$G_y(s) = \frac{1}{(1+T_{y1}s)(1+T_y s)} \quad (7)$$

式中: T_{y1} 为辅助接力器反应时间常数; T_y 为主接力器反应时间常数。

二阶发电机模型为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m + \frac{\omega_0}{H} P_{m0} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \end{cases} \quad (8)$$

$$P_e = \frac{E'_q}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{V_s^2}{2} \left(\frac{x'_d - x'_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

$$x_{d\Sigma} = x'_d + x_t + x_l$$

$$x_{q\Sigma} = x'_q + x_t + x_l$$

式中: δ 为功角; ω 、 ω_0 为发电机角速度和同步角速度; P_m 为输入机械功率; P_{m0} 为机械功率初始稳态值; P_e 为发电机输出电磁功率; H 为机械转动惯量; D 为阻尼系数; V_s 为发电机机端电压; x'_d 、 x'_q 、

x_t 、 x_l 分别为发电机 d 轴暂态电抗、q 轴同步电抗、变压器短路电抗、输电线路电抗; $x'_{d\Sigma}$ 为系统 d 轴总暂态电抗, $x_{q\Sigma}$ 为系统 q 轴总电抗。 E'_q 为发电机 q 轴暂态电势。

水轮机调节系统模型框图如图 2 所示。图中 K1、K2、K3 为调节模式转换开关, 这些开关的不同位置组合可以构成水轮机调节系统不同的调节模式, 如表 1 所示。

表 1 水轮机 PID 调节模式

Tab.1 PID regulation mode of hydro-turbine

调节模式	开关位置			E_f	$E_{y/p}$
	K1	K2	K3		
频率	②	①	①	退出	投入
开度	①	①	①	投入	退出
功率	①	②	②	投入	退出

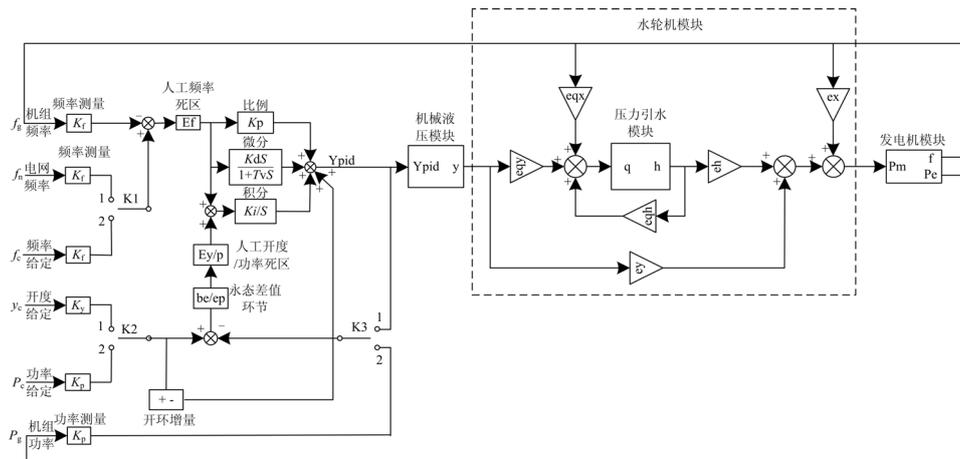


图 2 水轮机调节系统模型框图

Fig.2 Model diagram of hydro-turbine governing system

3 不同工况下最优 PID 参数的计算

工程中设定 PID 调节参数往往采用现场试验加经验公式的方法, 但受现场条件的制约, 不一定能整定到最优参数。本文根据现场人员调试经验, 采用一种改进遗传算法进行最优调速器参数离线整定^[4-5]。

3.1 水轮机 PID 调速系统参数的编码方法

将待优化的水轮机 PID 调速系统参数用二进制编码。各调节参数的二进制字符串表示值与实际值

之间有如下关系:

$$(b_L b_{L-1} \cdots b_0)_2 = \left(\sum_{i=0}^L b_i 2^i \right)_{10} = X' \quad (9)$$

$$X = X_{\min} + X' \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^{L+1} - 1}$$

式中: $(b_L b_{L-1} \cdots b_0)$ 表示参数 X 的二进制编码; X_{\max} 、 X_{\min} 为 X 的取值范围。

根据相关行业标准, 调节参数的调整范围必须包容如下规定值: 比例增益 K_P : 0.5~20; 积分增益 K_I : 0.05~10 1/s; 微分增益 K_D : 0~5 s。

3.2 最优调节参数整定步骤

为了避免同时调节三个参数所带来的调节效果的不确定性，借鉴工程中广泛使用的经验试凑法，程序计算步骤如下：

1)令调速器参数 $K_I=0, K_D=0$ 。用遗传算法按纯比例系数整定 K_P ；

2)将求得的最优 K_P 值扩大 1.2 倍，用遗传算法整定积分系数 K_I ；

3)在已求得的 K_P 值附近重新整定，寻找最优 K_P 值。

4)在有需要的情况下，用遗传算法整定微分系数 K_D 。

3.3 适应度函数的确定

因为是分别调整三个参数，且每个参数对过渡过程的影响均不相同，因此需要针对三个参数的不同特点分别设计适应度函数

1) 比例系数 K_P 的适应度函数

比例调节是对被控参数的粗调，追求的目标是“稳”。因为纯比例调节是一种有差调节，因此无论是基于最小偏差原则的指标函数如 IAE、ITAE 等，还是用于衡量过渡过程性能的参数如稳态误差、上升时间等，在此处作为适应度函数都不合适。为了判断比例系数的优劣，衡量纯比例调节的控制效果，本文引入了概率统计、数值分析中用来描述随机变量分布形状与对称形式的偏斜度与峰度等相关概念，构造的适应度函数如下：

$$J = IQR(y) \cdot w + Kurtosis(y) - Skewness(y) \tag{10}$$

式中： IQR 为求变量 y 的四分位差运算； $Kurtosis$ 为求变量 y 的峰度运算； $Skewness$ 为求变量 y 的偏斜度运算； w 为权值。

变量 y 的四分位差即样本在 75%分位点与 25%分位点上取值之差。

变量 y 的峰度定义为

$$Kurtosis(y) = \frac{E(y - E(y))^4}{[D(y)]^2} \tag{11}$$

变量 y 的偏斜度定义为

$$Skewness(y) = \frac{E(y - E(y))^3}{[D(y)]^{3/2}} \tag{12}$$

式 (11) 与式 (12) 中 E 定义为求期望的运算； D 定义为求方差的运算。

2) 积分系数 K_I 的适应度函数

积分调节是对被控参数的微调，追求的目标是“准”。积分调节可以完全消除被控系统的静差，但积分系数整定不当会引起较大的超调，这在水轮机控制中是不希望出现的，因此采用 ITAE 函数作为基础，设计相应的目标函数如下：

$$J = \int_0^T (w_1 t |e_1(t)| + w_2 t |e_2(t)|) dt \tag{13}$$

式中： $e_1(t)$ 为未超调部分的误差； $e_2(t)$ 为产生超调部分的误差， $w_1、w_2$ 为针对不同误差部分的权值；令 $w_2 > w_1$ ，以惩罚产生超调的积分系数。

3) 微分系数 K_D 的适应度函数

微分调节是对被控参数的微调，追求的目标是“快”。针对微分系数 K_D 设计的目标函数如下：

$$J = \int_0^T (t |e(t)|) dt + w t_s \tag{14}$$

式中： $e(t)$ 为控制系统的误差； t_s 为过渡过程的上升时间； w 为系数。

4 建立运行工况与最优调节参数的非线性映射

水轮机运行工况包括非负载状态（例如空载、开机过程、停机过程等）、负载状态（例如机组油开关投入、并入电网运行等），调速器调节模式有频率调节模式、开度调节模式、功率调节模式。不同的运行工况，不同的调节模式，都需要整定相应的最优调节参数，但针对所有可能出现的情况进行优化计算即不可能也无必要，利用神经网络强大的自学习、自适应能力，将前期计算所得数据作为样本进行充分训练，即可建立各种运行工况、调节模式与最优调节参数的非线性映射关系，做到在线自适应改变调节参数。

5 仿真计算实例

5.1 水轮机传递系数计算

选择某型号水轮机，根据其转轮综合特性曲线由图 (1) 及式 (2)、式 (3) 计算各工况下传递系数如表 2 所示。

5.2 水轮机最优 PID 调节系数优化计算

在 Matlab 中建立水轮机调节系统模型如图 2，应用本文提出的改进遗传算法计算最优调节参数。系统参数如下： $T_{y1}=0.3, T_y=0.3, T_r=0.2, h_w=5, T_d=2.5, b_p=0, E'_q=1.2, V_s=1.0, \delta_0=43^\circ, D=5, H=10 \text{ s}, x'_d=0.211, x_q=0.535, x'_f=0.125, x_f=1.4, P_{mo}=\dots$

0.8, $\omega_0=314$ rad/s。在频率调节模式及功率调节模式下计算所得最优调节参数如表 2 所示。

表 2 水轮机不同工况下的传递系数及各调节方式下的最优调节参数

Tab. 2 Transfer coefficient of hydro-turbine in different conditions and optimal parameter in different regulation modes

水头 H/m	水轮机传递系数						频率调节			功率调节		
	E_y	E_x	E_h	E_{qy}	E_{qx}	E_{qh}	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d
176	0.7075	-1.1378	1.5681	0.8902	-0.1756	0.5876	2.024	0.385	0.01	4.532	2.096	1.323
177.1	0.7374	-1.1425	1.5644	0.9117	-0.1787	0.5855	1.991	0.378	0.01	4.337	1.988	1.220
178.7	0.7721	-1.1422	1.5564	0.9336	-0.1853	0.5802	1.886	0.359	0.04	4.058	1.901	1.211
179.9	0.7981	-1.1422	1.5564	0.9488	-0.1853	0.5802	1.881	0.356	0.01	3.741	1.763	1.198
180.6	0.8174	-1.1453	1.5542	0.9598	-0.1869	0.5792	1.800	0.341	0.01	3.596	1.655	1.032
...
204.7	1.4806	-1.2382	1.3921	1.1467	-0.2183	0.4662	1.338	0.269	0.02	2.845	1.086	0.835
206.3	1.5134	-1.2291	1.3773	1.1587	-0.2155	0.4599	1.314	0.264	0.03	2.609	0.933	0.811
208.3	1.5464	-1.2211	1.3659	1.1708	-0.2112	0.4538	1.300	0.256	0.01	2.517	0.847	0.779
209.6	1.5721	-1.2155	1.3563	1.1812	-0.2088	0.4494	1.295	0.255	0.04	2.374	0.796	0.785
210.1	1.5839	-1.2143	1.3513	1.1867	-0.2087	0.448	1.290	0.249	0.01	2.225	0.707	0.763

5.3 神经网络控制器的训练

神经网络控制器的输入包括水头信号、水轮机运行工况信号、调速器调节模式信号等, 输出则为 PID 调节系数 K_p 、 K_i 、 K_d , 构建结构为 6-40-3 的三层前向 BP 神经网络, 输入层与中间层的传递函数采用 S 型正切函数, 中间层与输出层的传递函数采用纯线性函数, 用变步长加动量项算法进行训练, 达到精度要求后即可用于控制系统中。

5.4 频率扰动仿真试验

在水头波动情况下, 采用本文提出的自适应工况 PID 调速器及传统固定参数调速器针对频率扰动的响应如图 3 所示, 可以看出, 固定参数 PID 调速器在水头上升时容易产生超调, 而在水头下降时调节时间过长, 自适应工况调速器则可以根据水头变化选择最优调节参数, 调节曲线快、准、稳。

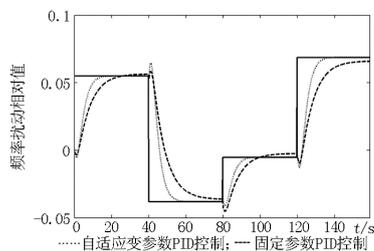


图 3 频率扰动波形比较

Fig.3 Waveform comparison of frequency disturbance

6 结论

从上面的仿真结果可以看出, 本文提出的基于

智能控制技术的自适应变参数 PID 控制方法与常规 PID 控制相比, 调节更为平衡平稳, 调节速度更快。当系统参数或外界环境发生变化时, 系统仍能保持良好的动态调节品质。这说明该方法具有较强的鲁棒性。但同时应当看到, 实际运行中的水轮机其运行工况更加复杂多变, 而仿真研究中的水轮机模型则是在忽略了诸多次要因素的条件下建立的, 因此试图用仿真准确地反映水轮机调节系统的实际过程并得到精确的定量结果是十分困难的。本文也只是从定性的、理论的意义, 对水轮发电机组控制提出一种新思路、新方法, 希望可以为以后的研究工作提供决策支持。

参考文献

- [1] 于波, 肖慧民. 水轮机原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 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 Dong-hai, JIANG Xue-zhi, et al. Simulation Study on Nonlinear Controller for Hydro Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 91-96.
- [3] 桂小阳, 胡伟, 刘锋. 基于水轮发电机综合非线性模型的调速器控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 18-22.
GUI Xiao-yang, HU Wei, LIU Feng. Governor Control Design Based on Nonlinear Hydraulic Turbine Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 18-22.

(下转第 94 页 continued on page 94)



图 6 自动测试软件系统界面
Fig.6 Auto-test software system GUI

表 1 部分自动测试结果

Tab.1 Part of auto-test result

项目	报告	信号
1 光纤差动保护 m1.05 高 定值 A 相	电流差动保护 13 ms	跳 A
2 光纤差动保护 m1.05 高 定值 B 相	电流差动保护 12 ms	跳 B
3 光纤差动保护 m1.05 高 定值 C 相	电流差动保护 14 ms	跳 C
4 光纤差动保护 m0.95 低 定值 A 相	起动	---
5 光纤差动保护 m0.95 低 定值 B 相	起动	---
6 光纤差动保护 m0.95 低 定值 C 相	起动	---
7

5 结论

随着电网规模的进一步扩大，微机继电保护设备作为一种最重要的二次设备之一在电网中要担当越来越重要的角色，为了减少保护测试中的人工干预所带来的繁重工作量和人为错误，未来对保护设备的自动化测试技术的研究也会越来越深入，本系

统的出现解决了部分保护专业人员的繁重又重复的定值整定测试工作，从自动化的角度实现了保护设备的远程自动化测试，有一定的现实社会效益。

考虑到本系统的解决方案目前还只是针对单台保护设备的自动测试，而将来需要考虑一种系统级的，比如对一条线路上的所有保护设备进行并发自动化测试的解决方案，这方面的研究还有待进一步开展。

参考文献

[1] Webb A C , Webb M. Automated Testing of Power System Protection Relays[J]. Power Engineering Journal, 1988(11) : 291-296.

[2] Cristian Paduraru. Automated Testing of Protective Relays Using Advanced Visual Test Software[A]. in:Proceedings of the 2002 Large Engineering System Conference on Power Engineering[C]. 2002. 143-146.

[3] IEC 60870-5-103, Transmission Protocols 2 Companion Standard for Informative Interface of Protection Equipment 1997[S].

[4] 电力行业标准 DL/PT 667-1999 idt IEC 60870-5-103 :1997 [S].

[5] 陈皓.新一代微机继电保护测试仪及基本性能[J] .电力自动化设备, 2002, 22(5): 61-63.

CHEN Hao. Test Device of Protective Relay and Its Property[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5): 61-63.

[6] 梁志琴, 刘建飞, 等. 基于 PC 内置便携式微机保护测试系统的研制[J] . 继电器, 2001, 29 (11): 44-46.

LIANG Zhi-qin, LIU Jian-fei, et al. Development of a Test System for Microprocessor Protection Based on Integral Portal PC[J]. Relay, 2001, 29 (11): 44-46.

收稿日期：2009-03-03； 修回日期：2009-03-25

作者简介：

赖 擎 (1976-)，男，硕士，从事电力系统分析应用软件研究开发；E-mail:laiqing7617@163.com

华建卫 (1967-)，男，高工，从事继电保护研究；

吕 云 (1971-)，女，高工，从事电力系统信息化研究。

(上接第 85 页 continued from page 85)

[4] 谭群峰, 李朝晖. 基于工况的水轮机调速系统性能分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 34-37.

TAN Qun-feng, LI Zhao-hui. Performance Analysis for Hydroturbine Governing System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 34-37.

[5] 孙郁松, 孙元章, 卢强. 水轮发电机水门非线性控制规律的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 33-36.

SUN Yu-song, SUN Yuan-zhang , LU Qiang . Research on Nonlinear Control Strategy for Hydroturbine

Governor[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 33-36.

收稿日期：2009-02-26； 修回日期：2009-06-02

作者简介：

曹程杰 (1982-)，男，硕士研究生，主要研究方向为自动控制理论，电力系统控制等；E-mail: bluesky_wflts@163.com

莫岳平 (1962-)，男，博士，教授，主要从事电机及其控制的教学及研究工作。