

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231249

孤网模式下水电机组智能鲁棒控制

陈金保^{1,2}, 张智^{1,2}, 郑阳^{1,3}, 王俊青^{1,2}, 肖志怀^{1,3}, 李广^{1,2}

(1. 湖北省智慧水电技术创新中心, 湖北 武汉 430000; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002;
3. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对孤网模式下水电机组 PID 控制策略鲁棒性差的缺点, 设计了适用于非线性水轮机调节系统(hydraulic turbine regulating system, HTRS)的基于状态动态测量、反馈线性化和改进黏菌算法(improved slime mold algorithm, ISMA)的智能鲁棒控制器(intelligent robust controller, IRC), 以实现水电站全工况实时最优控制。首先, 充分考虑水轮机非线性、随动系统限速环节和高阶发电机特性, 构建非线性、复杂 HTRS 数值仿真模型, 并引入系统跟踪偏差的积分, 推导出了孤网模式下考虑系统跟踪偏差的 HTRS 高阶状态空间方程模型。然后, 结合高阶状态空间方程和 H_∞ 控制实现了 HTRS 鲁棒控制。进一步, 基于 ISMA 对 H_∞ 控制器参数进行智能寻优。最后, 结合某电站真实数据构建非线性、复杂 HTRS 仿真平台, 验证了所提控制策略对系统参数和工况的敏感性、频率扰动下的强鲁棒性。

关键词: 水电机组; 孤网模式; H_∞ 控制; 改进黏菌算法; 智能鲁棒控制

Intelligent robust control of hydropower units in islanding mode

CHEN Jinbao^{1,2}, ZHANG Zhi^{1,2}, ZHENG Yang^{1,3}, WANG Junqing^{1,2}, XIAO Zhihui^{1,3}, LI Guang^{1,2}

(1. Hubei Technology Innovation Center for Smart Hydropower, Wuhan 430000, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There is poor robustness of the PID control strategy for hydropower units in islanding mode. Thus an intelligent robust controller (IRC) based on state dynamic measurement, feedback linearization, and improved slime mold algorithm (ISMA) is designed for a nonlinear hydraulic turbine regulating system (HTRS) to achieve real-time optimal control of all operating conditions of hydropower stations. First, a nonlinear and complex HTRS numerical simulation model is constructed, one that fully considers the nonlinearity of the hydraulic turbine, the speed limiting link of the servo system, and the characteristics of a high-order generator. Integration of the system tracking deviation is introduced, and a high-order state space equation model of the HTRS considering the system tracking deviation in islanding mode is derived. Then, HTRS robust control is achieved by combining high-order state space equations and H_∞ control. Intelligent optimization of H_∞ controller parameters is performed based on ISMA. Finally, a nonlinear and complex HTRS simulation platform is constructed based on real data from a hydropower station. This is to verify the sensitivity of the proposed control strategy to system parameters and operating conditions, as well as its strong robustness to frequency disturbance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51979204).

Key words: hydropower unit; islanding mode; H_∞ control; improved slime mold algorithm; intelligent robust control

0 引言

随着规模不断增大、互联程度不断升高以及风

电、光伏等间歇性能源大规模接入, 现代电力系统结构日趋复杂, 调度运行方式发生显著变化, 使得系统的不确定性加剧、电网安全稳定运行的风险不断增大^[1-3]。当电网发生严重故障时, 为确保重要负荷的持续供电, 水电机组将根据需要运行在频率控制模式, 即孤网模式。PID 控制具有原理简单、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51979204); 湖北省智慧水电技术创新中心开放研究基金项目资助(1523020038)

易实现等一系列优点,是水电站广泛采用的控制策略^[4-5]。然而,PID控制具有对系统运行状态敏感的缺点,且其参数整定存在较大困难。此外,PID控制的反馈信息只考虑机组输出反馈,对系统众多内部状态信息考虑不足^[6]。

随着电力系统智能化水平不断提高、水电站传感器布设和在线监测技术日臻完善,水电机组的先进控制研究对提高机组控制品质和电力系统稳定性具有深刻意义^[7-8]。在基于状态反馈的先进控制器中,主要有预测控制器、鲁棒控制器、模糊控制器、滑模控制器等。在预测控制器方面,主要有基于输入和输出的模型预测控制器、基于状态反馈的模型预测控制器、基于神经网络的预测控制器。文献[9]建立含时滞环节的水轮机调节系统的分数阶模型,并基于系统输入输出实现了考虑时滞的水轮机调节系统模型预测控制。文献[10]针对抽水蓄能机组PID参数整定困难的问题,提出一种约束广义预测控制(constrained generalized predictive control, CGPC)与经典PID相结合的分层模型预测控制(model predictive control, MPC)方案。结果表明,所提出的分级MPC方案不仅在速度跟踪和振荡阻尼方面表现出色,而且可以减弱水泵水轮机反“S”特性引起的不稳定现象。文献[11]研究了基于神经网络的PID控制器,并在功率需求逐步增加和正弦功率需求下,验证了所设计的控制器相比传统PID控制器的优势。在鲁棒控制器方面,文献[12]考虑时滞实现了基于 H_{∞} 的频率模式下水轮机调节系统(hydraulic turbine regulating system, HTRS)鲁棒控制;文献[13]实现了基于 H_{∞} 的频率模式下分数阶HTRS鲁棒控制;文献[14]针对具有超长引水隧洞的水电站构建了HTRS状态方程,并基于 H_{∞} 实现对该模型的鲁棒控制;文献[15]考虑随动系统故障的不确定性,研究了含时滞环节的HTRS相关稳定条件。在模糊控制器方面,文献[16]结合 H_2/H_{∞} 和Takagi-Sugeno(T-S)模糊线性化研究了HTRS频率控制方法。在滑模控制器方面,文献[17]考虑外部扰动、不确定性对系统的影响,设计了开度控制模式下基于 H_2/H_{∞} 的滑模控制器,并在极端工况下验证了该控制器相比PID控制器的优势。总的来说,预测控制器具有在线计算量大的缺点,导致系统采样时间难以达到工程实际要求;模糊控制器和滑模控制器对HTRS工况变化较为敏感,一般需要结合其他控制理论进行优化,导致其结构更为复杂;以 H_{∞} 控制为代表的鲁棒控制器,因其对工况变化敏感性较低,可采用离线训练方式,具有极大的应用价值。此外,目前这几种控制器的研究工作均未充分考虑水轮机非线性、随动系统限速环节及3阶以上发电机特性,且

对系统跟踪误差考虑不足。

从应用前景角度出发,控制器设计不应忽略水轮机非线性、随动系统限速环节和高阶发电机特性等关键因素。水轮机是水轮机调节系统的核心部件,由于在实际运行中受到水流变化、转速变化等多种因素的影响,其动态特性呈现强非线性;作为控制器的执行机构,随动系统包含防止系统调节超速的保护机制,即液压限速系统;由于工况复杂多变,发电机的饱和效应、齿槽效应等非线性特性极易影响系统行为及稳定性^[3]。因此,设计控制器时应充分考虑水轮机非线性、随动系统限速环节和高阶发电机特性,以全面评价控制器稳定性、鲁棒性。

考虑 H_{∞} 控制优势以及目前研究存在的不足,本文充分考虑水轮机非线性、随动系统限速环节和高阶发电机特性,构建了非线性、复杂的HTRS数值仿真模型。在此基础上,提出了考虑系统跟踪偏差积分但不考虑控制器的新型状态方程。然后,结合新型状态方程和 H_{∞} 控制实现了孤网模式下水电机组鲁棒控制。进一步,基于改进黏菌算法(improved slime mold algorithm, ISMA)和综合目标函数对 H_{∞} 控制器参数进行智能寻优。最后结合某巨型水电站真实数据验证了所提控制策略对系统参数、工况的敏感性,及在常规频率扰动下的强鲁棒性。

1 水轮机调节系统模型

水轮机调节系统模型包含引水系统、水轮机、调速器、发电机、励磁系统等模型^[2]。

1.1 引水系统模型

对于压力管道较短的水电站,采用式(1)所示的刚性水击模型足以满足精度要求^[3]。

$$G_h(s) = -T_w s \quad (1)$$

式中, T_w 为水流惯性时间常数。

1.2 基于BPNN的非线性水轮机模型

基于BP神经网络(back propagation neural network, BPNN)的非线性水轮机模型包括流量特性神经网络(discharge characteristic neural network, DCNN)和力矩特性神经网络(torque characteristic neural network, TCNN),其输入为单位转速 n_{11} 和导叶开度 Y ,输出分别为单位流量 Q_{11} 和单位力矩 M_{11} ^[6]。 Q_{11} 和 M_{11} 可由式(2)和式(3)得出。

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (2)$$

$$M_{11} = \frac{M_t}{D^3 H} \quad (3)$$

式中: Q 为流量; D 为转轮直径; H 为工作水头; M_t 为水轮机力矩。

在小波动运行条件下, 可获得线性水轮机模型^[8]如式(4)所示。

$$\begin{cases} q = e_{qv}y + e_{qx}x + e_{qh}h \\ m_t = e_y y + e_x x + e_h h \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 和 y 为转速 X 和 Y 的相对变化值; m_t 、 h 和 q 为 M_t 、 H 和 Q 的相对变化值; e_{qv} 、 e_{qx} 和 e_{qh} 分

别为 q 对 y 、 x 和 h 的传递系数; e_y 、 e_x 和 e_h 分别为 m_t 对 y 、 x 和 h 的传递系数。

基于 BPNN 的非线性水轮机模型结构如图 1 所示, 其中: Y_0 、 X_0 、 H_0 、 M_0 和 Q_0 分别是 Y 、 X 、 H 、 M_t 和 Q 的初始值; H_r 、 X_r 、 M_r 和 Q_r 分别为 H 、 X 、 M_t 和 Q 的额定值。

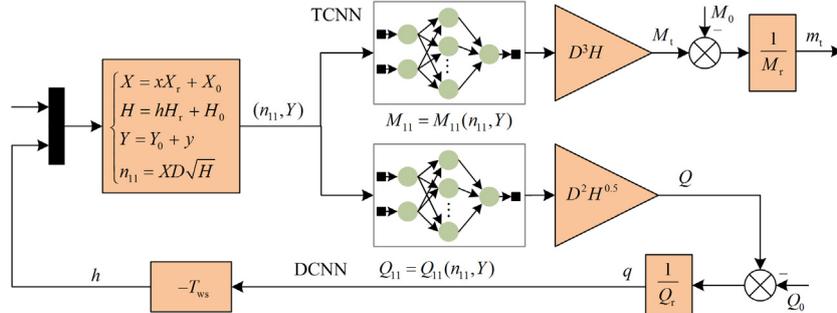


图 1 基于 BPNN 的水轮机模型及引水系统模型结构

Fig. 1 Structure of the BPNN-based hydro-turbine model and diversion system

1.3 调速器模型

水电站调速器包含控制器和随动系统, 控制器传递函数 $G_c(s)$ 如式(5)所示, 随动系统包含一个综合放大器、一个主伺服电机和非线性限速器^[18], 如图 2 所示, 其线性部分 $G_c(s)$ 如式(6)所示。其中, T_{1v} 为微分环节时间常数; u 为控制器输出; e 为跟踪误差; K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分增益; t_{c1} 、 t_{c2} 和 t_{c3} 为分段关闭时间; t_o 为全开时间; Y_{c1} 和 Y_{c2} 为分段关闭拐点; T_y 为主伺服电机反应时间常数; K_y 为综合放大器系数。

$$G_c(s) = \frac{u}{e} = \frac{(K_D + T_{1v}K_p)s^2 + (K_p + T_{1v}K_i)s + K_i}{T_{1v}s^2 + s} \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{y}{u} = \frac{K_y}{T_y s + K_y} \quad (6)$$

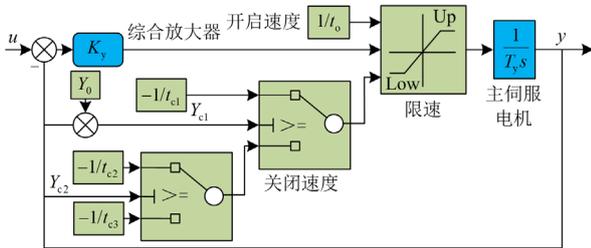


图 2 随动系统结构

Fig. 2 Structure of the servo-system

1.4 发电机模型

在不考虑定子瞬态的情况下, 考虑转子阻尼绕

组的影响, 但忽略 q 轴的 G 绕组, 采用经典的五阶发电机模型, 如式(7)和式(8)^[19-21]所示。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 \omega \\ 2H_G \dot{\omega} = M_t - M_e \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = E_f - E'_q - I_d(X_d - X'_d) \\ T''_{d0} \dot{E}''_q = E'_q - E''_q - I_d(X'_d - X''_d) \\ T''_{q0} \dot{E}''_d = -E''_d + I_q(X_q - X''_q) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_e = V_d I_d + V_q I_q \\ V_d = E''_d + I_q X''_q \\ V_q = E''_q - I_d X''_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: δ 为发电机功角; ω_0 为同步角速度; ω 为水电机组角速度; H_G 为发电机惯性时间常数; M_e 为电磁转矩; T'_{d0} 和 T''_{d0} 分别为 d 轴开路暂态时间常数和次暂态时间常数; T''_{q0} 为 q 轴开路次暂态时间常数; E'_q 和 E''_q 分别为 q 轴暂态电势和次瞬态电势; E''_d 为 d 轴次瞬态电势; E_f 为励磁电势; I_d 和 I_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电流分量; X_d 、 X'_d 和 X''_d 分别为 d 轴同步电抗、暂态电抗和次暂态电抗; X_q 和 X''_q 分别为 q 轴同步电抗和次暂态电抗; V_d 和 V_q 分别为机端电压 V_g 的 d 轴和 q 轴分量, $V_g^2 = V_d^2 + V_q^2$ 。

网络电压^[22-23]可表示为

$$\begin{cases} U_x = R_{sl}I_x - X_{sl}I_y \\ U_y = R_{sl}I_y + X_{sl}I_x \end{cases} \quad (9)$$

式中： U_x 和 U_y 为网络电压； R_{sl} 为变压器、线路和负载的电阻之和； X_{sl} 为变压器、线路和负载的阻

抗之和； I_x 和 I_y 为网络电流。

发电机和网络坐标变换表达式^[8]如式(10)所示，基于式(10)可建立发电机和网络模型，如图3所示。其中， P_m 为发电机机械功率。

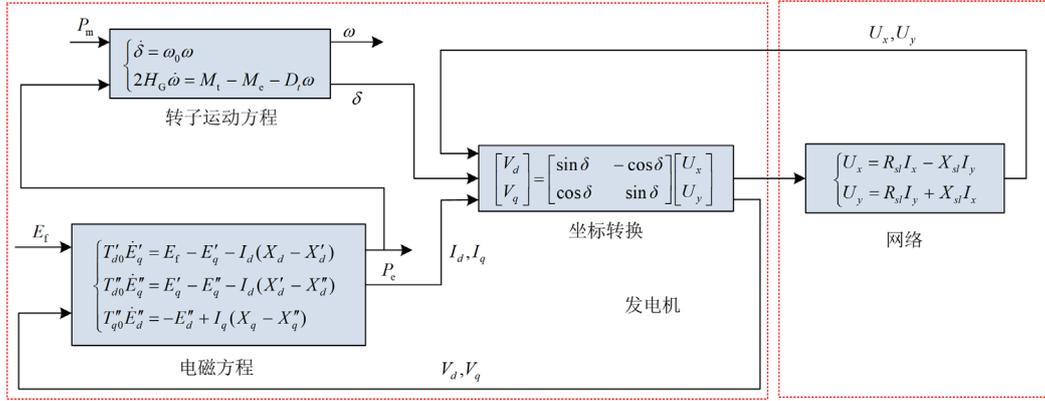


图3 发电机和网络模型

Fig. 3 Generator and network models

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

1.5 励磁系统模型

采用不考虑电力系统稳定器的一阶励磁系统简化模型(automatic voltage regulator, AVR)，如图4和式(11)^[8]所示。其中 K_a 和 T_r 分别为等效励磁系统增益和时间常数； V_{ref} 为参考值， $V_{ref} = 0$ 。

$$G_c(s) = \frac{K_a}{T_r s + 1} \quad (11)$$

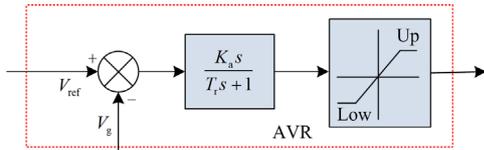


图4 AVR模型

Fig. 4 AVR model

1.6 非线性水轮机调节系统模型

根据各子模型可得含PID控制器的非线性HTRS模型，如图5所示。其中： ω_c 为给定转速； y_c 为给定开度； b_p 为永态转差系数。

2 智能鲁棒控制器

结合 H_∞ 理论、HTRS高阶状态空间方程和ISMA^[24]即可实现基于智能鲁棒控制器(intelligent

robust controller, IRC)的水电机组智能鲁棒控制。

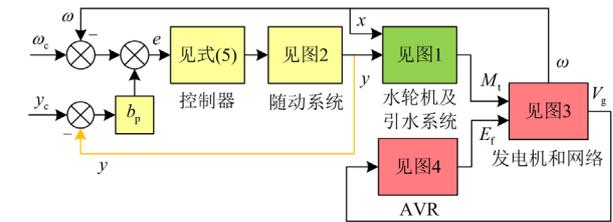


图5 含PID控制器的非线性HTRS模型

Fig. 5 Nonlinear HTRS model containing PID controller

2.1 HTRS 高阶状态空间方程

在孤网模式下，电网侧可近似为阻抗形式的变压器、输电线路和孤立负荷^[19-21]，相应的网络方程如式(12)所示。

$$(R_{sl} + jX_{sl})(I_x + jI_y) = U_x + jU_y \quad (12)$$

联立式(8)、式(10)和式(12)，可得出

$$\begin{cases} I_d = \frac{X_{q\Sigma} E_q'' + R_{sl} E_d''}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ I_q = \frac{R_{sl} E_q'' - X_{d\Sigma} E_d''}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ V_d = \frac{X_q'' R_{sl} E_q'' + (R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{sl}) E_d''}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ V_q = \frac{(R_{sl}^2 + X_{q\Sigma} X_{sl}) E_q'' - X_q'' R_{sl} E_d''}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $X_{d\Sigma} = X_d'' + X_{sl}$ ； $X_{q\Sigma} = X_q'' + X_{sl}$ 。

利用泰勒展开将式(13)中代数变量局部线性化得

$$\begin{cases} \Delta I_d = K_1 \Delta E_q'' + K_2 \Delta E_d'' \\ \Delta I_q = K_3 \Delta E_q'' + K_4 \Delta E_d'' \\ \Delta V_g = K_5 \Delta E_q'' + K_6 \Delta E_d'' \\ \Delta M_e = K_7 \Delta E_q'' + K_8 \Delta E_d'' \end{cases} \quad (14)$$

式中: Δ 表示信号变化量; 系数 $K_1 - K_8$ 如式(15)所示。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{X_{q\Sigma}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ K_2 = \frac{R_{sl}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ K_3 = \frac{R_{sl}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ K_4 = \frac{-X_{d\Sigma}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ K_5 = \frac{V_d X_q'' R_{sl} + V_q (R_{sl}^2 + X_{q\Sigma} X_{sl})}{V_g (R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma})} \\ K_6 = \frac{-V_q X_d'' R_{sl} + V_d (R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{sl})}{V_g (R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma})} \\ K_7 = \frac{I_d X_q'' R_{sl} + V_d X_{q\Sigma} + I_q (R_{sl}^2 + X_{q\Sigma} X_{sl}) + V_q R_{sl}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \\ K_8 = \frac{I_d (R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{sl}) + V_d R_{sl} - I_q X_d'' R_{sl} - V_q X_{d\Sigma}}{R_{sl}^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \end{cases} \quad (15)$$

联合式(1)、式(4)、式(6)、式(7)、式(11)和式(14), 并取 $T_j = 2H_G$, 可得不含控制器的水轮机调节系统的状态空间方程如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{y} = \frac{K_y}{T_y} (u - y) \\ \dot{x} = \frac{e_y y}{T_j} + \frac{e_h h}{T_j} + \frac{e_x x}{T_j} - \frac{K_7}{T_j} E_q'' - \frac{K_8}{T_j} E_d'' \\ \dot{h} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} \dot{x} - \frac{e_{qy}}{e_{qh}} \dot{y} - \frac{1}{e_{qh} T_w} h \\ \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}'} E_q' - \frac{(X_d - X_d') K_1}{T_{d0}'} E_q'' - \frac{(X_d - X_d') K_2}{T_{d0}'} E_d'' + \frac{1}{T_{d0}'} E_f \\ \dot{E}_q'' = -\frac{1}{T_{d0}''} E_q'' - \frac{(X_d' - X_d'') K_1 + 1}{T_{d0}''} E_q'' - \frac{(X_d' - X_d'') K_2}{T_{d0}''} E_d'' \\ \dot{E}_d'' = \frac{(X_q - X_q') K_3}{T_{q0}''} E_q'' + \frac{(X_q - X_q'') K_4 - 1}{T_{q0}''} E_d'' \\ \dot{E}_f' = -\frac{K_a K_5}{T_r} E_q'' - \frac{K_a K_6}{T_r} E_d'' - \frac{1}{T_r} E_f \\ \dot{e}_i = K_i (\omega_c - \omega) + K_i b_p (y_c - y) \end{cases} \quad (16)$$

孤网模式下系统跟踪误差如式(17)所示。

$$e = \omega_c - \omega + b_p (y_c - y) \quad (17)$$

为便于实现转速跟踪控制, 将系统跟踪误差 e 后增加增益为 K_i 的积分环节, 如图6所示。其中, e_i 为积分环节的输出。根据 $\Delta M_e = P_m$, 联合式(16)和式(17), 可得不含控制器的水轮机调节系统新型状态空间方程, 如式(18)所示。

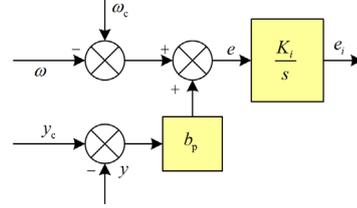


图6 HTRS跟踪误差的积分环节

Fig. 6 Integration link of HTRS tracking error

$$\begin{cases} \dot{y} = \frac{K_y}{T_y} (u - y) \\ \dot{x} = \frac{e_y y}{T_j} + \frac{e_h h}{T_j} + \frac{e_x x}{T_j} - \frac{K_7}{T_j} E_q'' - \frac{K_8}{T_j} E_d'' \\ \dot{h} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} \dot{x} - \frac{e_{qy}}{e_{qh}} \dot{y} - \frac{1}{e_{qh} T_w} h \\ \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}'} E_q' - \frac{(X_d - X_d') K_1}{T_{d0}'} E_q'' - \frac{(X_d - X_d') K_2}{T_{d0}'} E_d'' + \frac{1}{T_{d0}'} E_f \\ \dot{E}_q'' = -\frac{1}{T_{d0}''} E_q'' - \frac{(X_d' - X_d'') K_1 + 1}{T_{d0}''} E_q'' - \frac{(X_d' - X_d'') K_2}{T_{d0}''} E_d'' \\ \dot{E}_d'' = \frac{(X_q - X_q') K_3}{T_{q0}''} E_q'' + \frac{(X_q - X_q'') K_4 - 1}{T_{q0}''} E_d'' \\ \dot{E}_f' = -\frac{K_a K_5}{T_r} E_q'' - \frac{K_a K_6}{T_r} E_d'' - \frac{1}{T_r} E_f \\ \dot{e}_i = K_i (\omega_c - \omega) + K_i b_p (y_c - y) \end{cases} \quad (18)$$

式(18)对应状态空间模型为

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{AS} + \mathbf{BU} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{S} = [y, x, h, E_q', E_q'', E_d'', E_f', e_i]^T$; $\mathbf{U} = [u, \omega_c]^T$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} & a_{26} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} & a_{36} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & 0 \\ a_{81} & a_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{88} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{K_y}{T_y} & 0 & -\frac{e_{qy}K_y}{e_{qh}T_y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_i \end{bmatrix}^T$$

其中, $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{88}$ 满足:

$$a_{11} = -\frac{K_y}{T_y}, a_{21} = \frac{e_y}{T_j}, a_{22} = \frac{e_x}{T_j}, a_{23} = \frac{e_h}{T_j}, a_{25} = -\frac{K_7}{T_j},$$

$$a_{26} = -\frac{K_8}{T_j}, a_{31} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} a_{21} - \frac{e_{qy}}{e_{qh}} a_{11}, a_{32} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} a_{22},$$

$$a_{33} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} a_{23} - \frac{1}{e_{qh}T_w}, a_{35} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} a_{25}, a_{36} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} a_{26},$$

$$a_{44} = -\frac{1}{T'_{d0}}, a_{45} = -\frac{(X_d - X'_d)K_1}{T'_{d0}},$$

$$a_{46} = -\frac{(X_d - X'_d)K_1}{T'_{d0}}, a_{47} = \frac{1}{T'_{d0}}, a_{54} = -\frac{1}{T''_{d0}},$$

$$a_{55} = -\frac{(X'_d - X''_d)K_1 + 1}{T''_{d0}}, a_{56} = -\frac{(X'_d - X''_d)K_2}{T''_{d0}},$$

$$a_{65} = \frac{(X_q - X''_q)K_3}{T''_{q0}}, a_{66} = \frac{(X_q - X''_q)K_4 - 1}{T''_{q0}},$$

$$a_{75} = -\frac{K_a K_5}{T_r}, a_{76} = -\frac{K_a K_6}{T_r}, a_{77} = -\frac{1}{T_r},$$

$$a_{81} = -K_i b_p, a_{82} = -K_i, a_{88} = K_i$$

2.2 IRC 策略

针对式(19), H_∞ 控制器设计要求^[17]如下。

1) $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ 是 HTRS 局部渐近稳定平衡点, 即对于任意初始状态 $\mathbf{S}(0) \in \mathbf{R}^8, \mathbf{S}(t) \rightarrow \mathbf{0}$, 其中: \mathbf{R}^8 表示所有元素都是实数时的 8 维向量空间; $\mathbf{S}(0)$ 为初始时刻的 \mathbf{S} , $\mathbf{S}(t)$ 为 t 时刻的 \mathbf{S} 。

2) HTRS 对于任意扰动 $\varepsilon \in L_2[0, +\infty)$ 具有扰动抑制性能, 即

$$\int_0^\infty [q_1 y^2(t) + q_2 x^2(t) + q_3 h^2(t) + q_4 E_q'^2(t) + q_5 E_q''^2(t) + q_6 E_d''^2(t) + q_7 E_r'^2(t) + q_8 e_i^2(t) + \rho u^2(t)] dt < \int_0^\infty \varepsilon^2(t) dt \quad (20)$$

式中: $q_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, 8)$ 和 ρ 均为加权系数, $\rho > 0$; $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻的扰动值。

定义 $\mathbf{z} = \mathbf{C}_1 \mathbf{S} + \mathbf{D}_{11} \varepsilon + \mathbf{D}_{12} u$ 为 HTRS 控制性能评价信号, 且

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{q_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{q_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{q_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{q_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{q_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{q_7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{q_8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{11} = \mathbf{0}, \mathbf{D}_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \sqrt{\rho}]^T$$

则式(20)等价于式(21)。

$$\|\mathbf{z}\|_2 < \|\varepsilon\|_2 \quad (21)$$

式中, ε 为 ε 构成的向量。

取 ε 至 \mathbf{z} 的闭环传递函数为 $T_{s\varepsilon}(s)$, 则 HTRS 扰动抑制性能等价于 $\|T_{s\varepsilon}(s)\|_\infty < 1$ 。其中, $T_{s\varepsilon}(s)$ 满足式(22)。

$$\|T_{s\varepsilon}(s)\|_\infty = \sup_{\varepsilon \neq 0} \frac{\|\mathbf{z}\|_2}{\|\varepsilon\|_2} \quad (22)$$

为求解 H_∞ 控制器, 引入定理 1。

定理 1 对带有控制输入干扰 ε 的模型式(20), 给定 $\gamma > 0$, 存在半正定矩阵 $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_1^T > \mathbf{0}$ 和 \mathbf{P}_2 , 若满足不等式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1\mathbf{A}^T + \mathbf{B}_2\mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2^T\mathbf{B}_2^T + \gamma^{-2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T & (\mathbf{C}_1\mathbf{P}_1 + \mathbf{D}_{12}\mathbf{P}_2)^T \\ \mathbf{C}_1\mathbf{P}_1 + \mathbf{D}_{12}\mathbf{P}_2 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (23)$$

则状态反馈鲁棒控制器输出为

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{S} = \mathbf{P}_2\mathbf{P}_1^{-1}\mathbf{S} \quad (24)$$

式中, $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6 \ k_7 \ k_8]$, $k_1 \sim k_8$ 为待求取的参数。

采用定理 1 求解式(24)的状态反馈控制增益 \mathbf{K} 时, 采用式(23)和式(25)。

$$-\mathbf{P}_1 < \mathbf{0} \quad (25)$$

对于 H_∞ 控制器关键调节参数 (q_i 和 ρ), 基于 ISMA^[24] 获取其最优值, 获取过程如图 7 所示。其中, k 为当前迭代代数, k_{\max} 为最大迭代代数; ISMA 的目标函数采用兼顾时间乘误差绝对值积分 (integrated time and absolute error, ITAE)、超调量 σ_1 、反调量 σ_2 和上升时间 t_r 的综合 ITAE 指标如式(26)所示。

$$J_{\text{COM-ITAE}} = \int_0^{t_{\text{sum}}} t |e(t)| dt + \omega_1 e^{\sigma_1} + \omega_2 e^{\sigma_2 + 0.002} + \omega_3 t_r \quad (26)$$

式中: t_{sim} 为仿真时间; σ_1 为超调量; σ_2 为反调量; t_r 为上升时间; ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为 σ_1 、 σ_2 和 t_r 的权重系数, 可根据实际需要进行调整。由于 IRC 鲁棒性强, 在考虑减少上升时间的同时, 本文侧重降低超调量和反调量, 并分别取权重系数为 0.4、0.4 和 0.2。

根据图 7 获取最优 q_i 和 ρ 后, 即可实现基于 IRC 的 HTRS 自适应智能鲁棒控制。基于 IRC 的非线性

HTRS 整体模型如图 8 所示, 其中“采集 HTRS 状态量”模块实时测量、更新状态量。

3 仿真实验及对比研究

以中国西南部某大型水电站为例, 构建非线性 HTRS 数值模拟平台, 施加 $x_c = 0.003$ 的频率扰动(数值上 $\omega_c = x_c$), 验证 IRC 的可行性。该电站孤网模式下系统参数如表 1 所示。

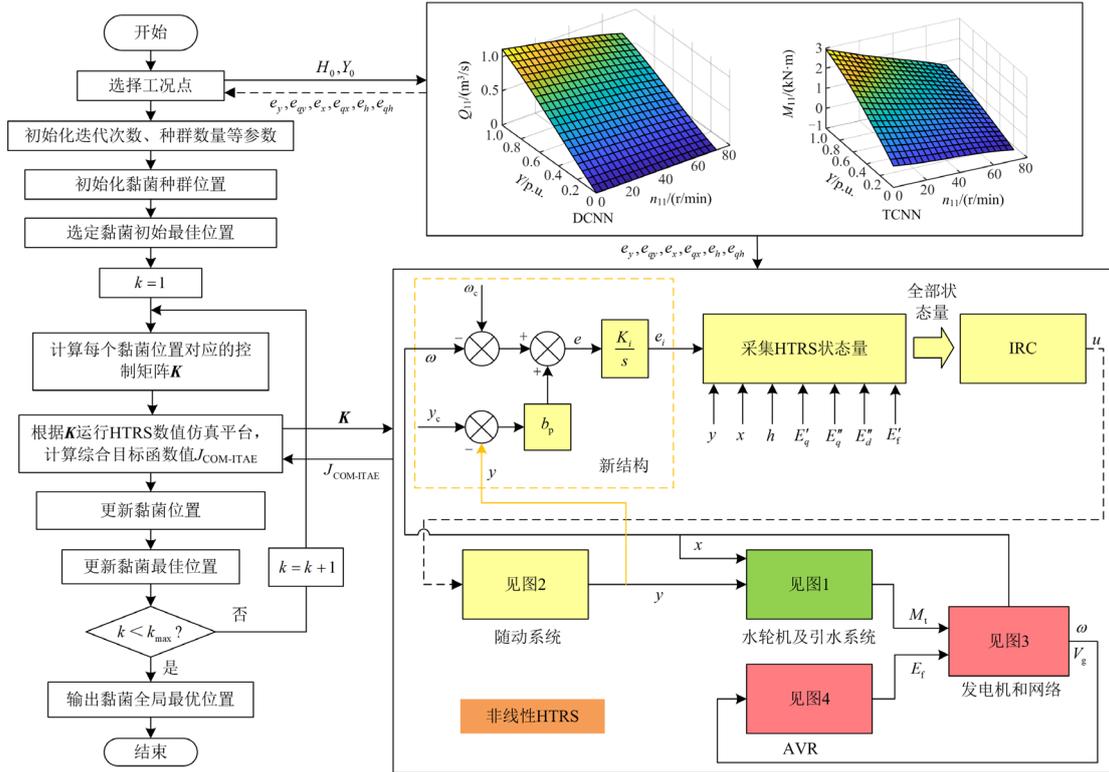


图 7 基于 ISMA 的 IRC 控制变量的系数优化过程

Fig. 7 Optimization process of IRC control variable coefficients based on ISMA

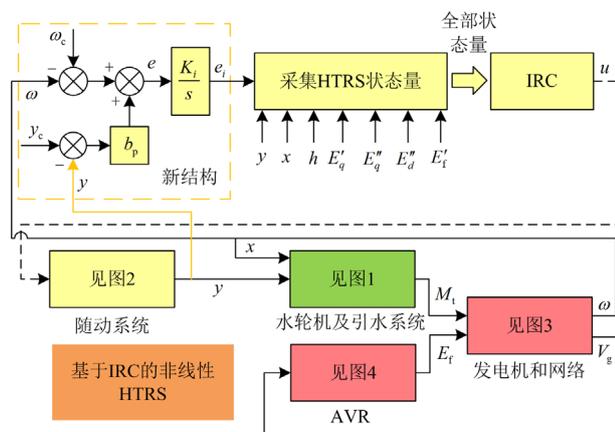


图 8 基于 IRC 的非线性 HTRS 整体模型

Fig. 8 Nonlinear HTRS overall model based on IRC

表 1 某水电站系统参数

Table 1 System parameters of a hydropower station

子系统	参数
控制器及随动系统	$b_p = 0.04, K_p = 2, K_I = 0.2, K_D = 0, K_y = 0.25,$ $T_y = 0.4594, t_{c1} = 10.5714, t_{c2} = 26.5392,$ $t_{c3} = 91.304, t_0 = 34.8123$
水轮机及引水系统	$D = 6.223 \text{ m}, H_r = 197 \text{ m},$ 最大水头 $H_{max} = 229.4 \text{ m},$ 最小水头 $H_{min} = 154.6 \text{ m}, Q_r = 432.7 \text{ m}^3/\text{s}, T_w = 1.29$
发电机及网络	$X_r = 125, X_d = 0.985 \text{ p.u.}, X'_d = 0.326 \text{ p.u.}, X''_d = 0.241 \text{ p.u.},$ $X_q = 0.665 \text{ p.u.}, X''_q = 0.26 \text{ p.u.}, T'_{d0} = 11.72, T''_{d0} = 0.12,$ $T'_{q0} = 0.25, T_j = 12.24, R_{sl} = 0 \text{ p.u.}, X_{sl} = 0.3 \text{ p.u.}, \omega_0 = 314$
AVR	$K_a = 100, T_r = 0.12$

3.1 鲁棒性分析

为验证 IRC 的鲁棒性, 在额定水头下, $Y = 80\%$

时, 取不同 T_w 进行仿真对比试验, 结果如图 9(a)所示, 取不同 T_y 进行仿真对比试验, 结果如图 9(b)所示; 在 $Y = 80\%$ 时, 取不同 H 进行仿真对比试验,

结果如图 9(c)所示; 在额定水头下, 取不同 Y 进行仿真对比试验, 结果如图 9(d)所示。从图 9 可以看出, IRC 对 T_w 、 T_y 、 H 和 Y 的敏感性均极低。

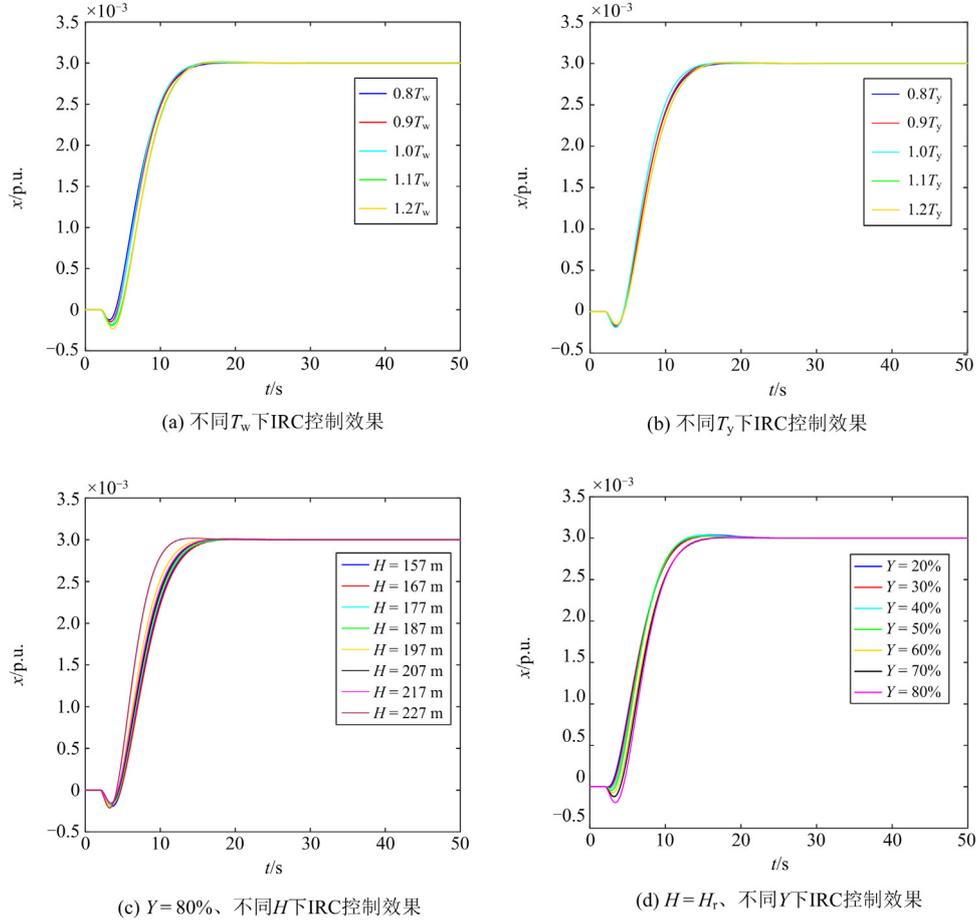


图 9 IRC 鲁棒性分析结果

Fig. 9 IRC robustness analysis results

3.2 控制效果对比

为验证 IRC 控制策略的优势, 在 6 个具有代表性的工况点模拟频率扰动, 并从调节时间 t_s 、上升时间、超调量和反调量的角度比较 IRC、常规 PID(取值与实际水电站一致)、基于 BP 神经网络的自适应调节 PID(BP neural network-based PID control, BPNN-PID)^[11]和广义预测控制(generalized predictive control, GPC)^[10]等控制方式的调节效果。考虑实际应用, 4 个控制器均作用于离散系统模型, 采样时间 $T_s = 0.1\text{s}$ 。GPC 和 BPNN-PID 控制器的关键参数如表 2 所示。各工况点仿真试验结果如图 10 所示, 可以看出: GPC 控制器在初始训练阶段具有较大的反调量和超调量, 且在第 4 个仿真工况存在由于误差积累导致的抖振现象; BPNN-PID 控制器用于水电机组频率控制时反调量极小, 但具有较长的调节时间,

即有必要对其进行优化; 采用 IRC 时, HTRS 在各工况下均具有较小的调节时间和上升时间, 表明针对 IRC 所选目标函数及其权重系数的合理性; IRC 和 PID 控制器作用下 HTRS 的反调量均较小, 但相比 PID, 采用 IRC 时 HTRS 的超调量、反调量和调节时间更符合实际需求。与 PID 相比, IRC 优势明显, 具有较强的应用前景。

表 2 GPC 和 BPNN-PID 控制器参数

Table 2 Parameters of GPC and BPNN-PID controllers

控制器类型	参数
GPC	最小输出长度 $N_1 = 1$, 预测长度 $N = 60$, 输入延迟 $d = 1$, 控制长度 $N_u = 10$, 输出柔化系数 $S_c = 0.9$
	输入层神经元个数 $N_i = 3$, 隐含层神经元个数 $N_h = 5$, 输出层神经元个数 $N_o = 3$, 学习率 $L_r = 0.2$, 惯性系数 $I_c = 0.05$

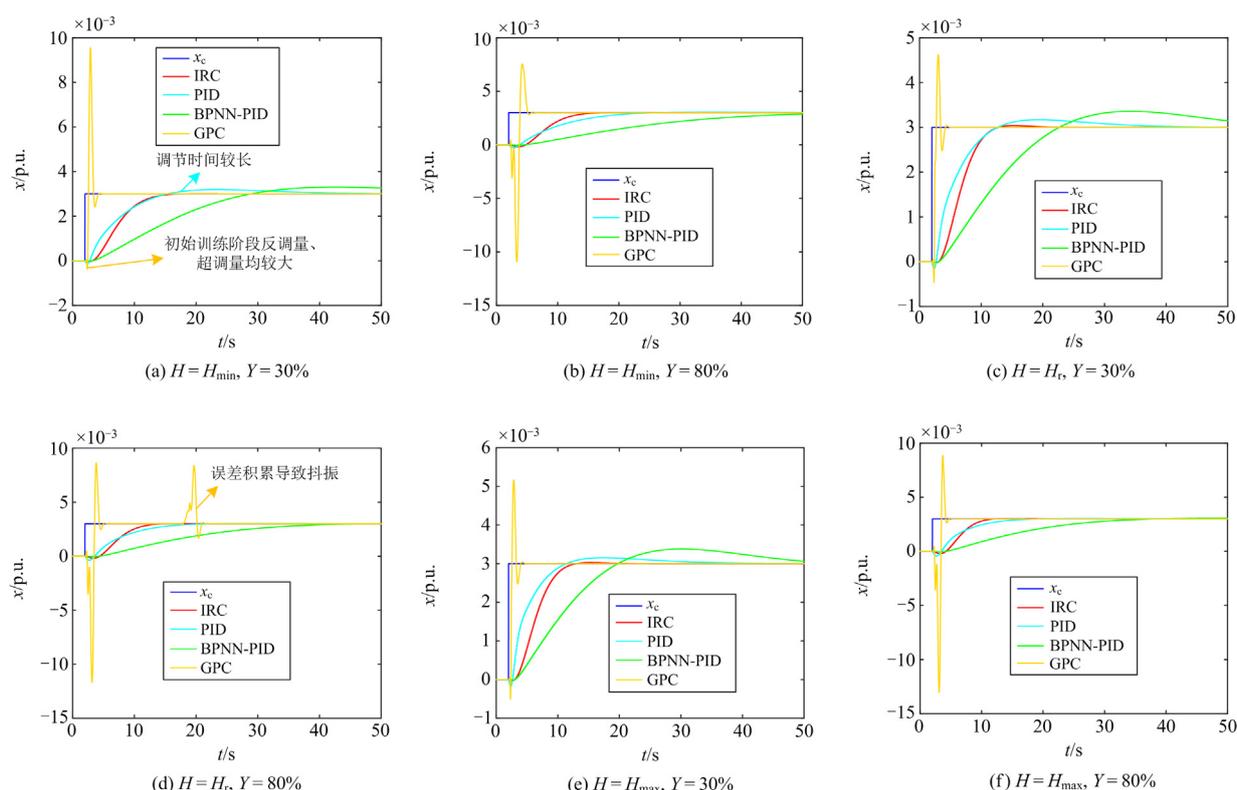


图 10 仿真对比试验结果

Fig. 10 Simulation comparison test results

4 结论

为更好地应对孤网模式下水电机组扰动不确定性, 基于高阶状态空间方程、ISMA、状态动态测量和反馈线性化, 设计了一个适用于非线性、复杂水轮机调节系统的智能鲁棒控制器, 并结合某电站真实数据构建非线性 HTRS 仿真平台, 对所设计的 IRC 性能进行了验证, 得出结论如下:

1) 由于将系统跟踪误差作为状态量, 所得 IRC 能较好应对孤网模式下频率扰动, 且对系统参数和工况变化的敏感性较低, 具有较强的鲁棒性;

2) 相比常规 PID 控制器, IRC 在频率扰动过程中调节效果更好, 具有较好的应用前景;

本文从理论层面设计 IRC, 未考虑状态量测量技术限制, 状态量选取方式及控制器试验验证有待进一步研究。

参考文献

[1] 贲保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon”

mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.

[2] 陈金保, 任刚, 丁其琦, 等. 孤网模式下基于 HBBC 的水轮机调节系统稳定性量化分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 60-69.

CHEN Jinbao, REN Gang, DING Qiqi, et al. Study on a quantitative stability analysis method of a hydraulic turbine regulating system based on HBBC in frequency control mode[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 60-69.

[3] 刘冬, 胡晓, 曾荃, 等. 基于输入-输出修正的水轮机特性曲线精细化模型[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 555-564.

LIU Dong, HU Xiao, ZENG Quan, et al. Refined hydro-turbine characteristic curve model based on input-output correction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(5): 555-564.

[4] 丁理杰, 刘姗姗, 史华勃. 水电高占比电网中水轮机模型对频率振荡特性影响及其适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 174-180.

DING Lijie, LIU Shanmei, SHI Huabo. Influence of a turbine model on frequency oscillation characteristics and its adaptability in a high hydro-ratio power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 174-180.

[5] 李世明, 李波, 郭文鑫, 等. 高比例水电孤网的振荡抑制与快速调频协调策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 118-124.

- LI Shiming, LI Bo, GUO Wenxin, et al. Coordination strategy of oscillation suppression and fast frequency modulation in a high hydropower proportion isolated network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 118-124.
- [6] CHEN Jinbao, XIAO Zhihui, LIU Dong, et al. Nonlinear modeling of hydroturbine dynamic characteristics using LSTM neural network with feedback[J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(11): 1961-1972.
- [7] LIU Dong, LI Chaoshun, MALIK O P. Nonlinear modeling and multi-scale damping characteristics of hydro-turbine regulation systems under complex variable hydraulic and electrical network structures[J]. *Applied Energy*, 2021, 293: 116949.
- [8] CHEN Jinbao, ZHENG Yang, LIU Dong, et al. Quantitative stability analysis of complex nonlinear hydraulic turbine regulation system based on accurate calculation[J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121853.
- [9] TIAN Yuqiang, WANG Bin, CHEN Diyi, et al. Design of a nonlinear predictive controller for a fractional-order hydraulic turbine governing system with mechanical time delay[J]. *Energies*, 2019, 12(24): 4727.
- [10] ZHENG Yang, CHEN Qijuan, XU Yanhe, et al. Hierarchical MPC scheme for the speed governing of PSU with complex conduit system[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14: 316-329.
- [11] VINOD J, SARKAR BK. Francis turbine electrohydraulic inlet guide vane control by artificial neural network 2 degree-of-freedom PID controller with actuator fault[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I-Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235: 1494-1509.
- [12] MA Teng, WANG Bin, ZHANG Zhe, et al. A Takagi-Sugeno fuzzy-model-based finite-time H-infinity control for a hydraulic turbine governing system with time delay[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 132: 107152.
- [13] LIU Le, WANG Bin, WANG Sijie, et al. Finite-time H-infinity control of a fractional-order hydraulic turbine governing system[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 57507-57517.
- [14] QU Fangle, GUO Wencheng. Robust H-infinity control for hydro-turbine governing system of hydropower plant with super long headrace tunnel[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124.
- [15] VISAKAMOORTHY B, MUTHUKUMAR P, RAJCHAKIT G, et al. Stabilization of fuzzy hydraulic turbine governing system with parametric uncertainty and membership function dependent H-infinity performance[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 23063-23073.
- [16] LI Lisheng, QIAN Jing, ZOU Yidong, et al. Optimized Takagi-Sugeno fuzzy mixed H-2/H-infinity robust controller design based on CPSOGSA optimization algorithm for hydraulic turbine governing system[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4771.
- [17] ZOU Yidong, HU Wenqing, XIAO Zhihui, et al. Design of intelligent nonlinear robust controller for hydro-turbine governing system based on state-dynamic-measurement hybrid feedback linearization method[J]. *Renewable Energy*, 2023, 204: 635-651.
- [18] 刘冬, 张辉, 任刚, 等. 特征线法及其变体在水轮机及引水系统非线性建模中的对比研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(4): 448-457.
- LIU Dong, ZHANG Hui, REN Gang, et al. Comparative study of characteristic line method and its variants in nonlinear modeling of hydraulic turbine and water diversion system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(4): 448-457.
- [19] LIU Dong, LI Chaoshun, MALIK O P. Operational characteristics and parameter sensitivity analysis of hydropower unit damping under ultra-low frequency oscillations[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 136: 107689.
- [20] YU Xiaodong, YANG Xiuwei, YU Chao, et al. Direct approach to optimize PID controller parameters of hydropower plants[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 342-350.
- [21] GUO Wencheng, PENG Zhiyuan. Order reduction and dynamic performance of hydropower system with surge tank for grid-connected operation[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 40: 100777.
- [22] QU Fangle, GUO Wencheng. Robust H-infinity control for hydro-turbine governing system of hydropower plant with super long headrace tunnel[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124: 106336.
- [23] 邹明, 赵成勇, 许建中. 永磁同步发电机电磁暂态等效建模方法及稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 25-36.
- ZOU Ming, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. Electromagnetic transient equivalent modeling method and stability analysis of a permanent magnet synchronous generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 25-36.
- [24] YU Tianyu, PAN Jiawen, QIAN Qian, et al. Improved slime mould algorithm by perfecting bionic-based mechanisms[J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2023, 22(1): 1-15.

收稿日期: 2023-09-23; 修回日期: 2024-02-26

作者简介:

陈金保(1992—), 男, 博士, 研究方向为水电机组建模与优化控制; E-mail: chenjinbaovip@163.com

郑 阳(1991—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为水电机组建模与控制。E-mail: zhengyang@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)