

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.004

水轮发电机组闭环开机特性仿真及优化

刘志淼¹, 张德虎¹, 曹林宁¹, 黄智达²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对水轮机转轮叶片裂纹现象, 从水轮机调速器的开机规律对转轮的影响角度出发, 建立计入非线性环节的电液随动系统模型和基于模型综合特性曲线的水轮机模型, 分析按一段直线规律变化的闭环开机特性, 提出了考虑水轮机工作水头偏差等因素的综合性能指标, 并基于该指标对某水电站机组开机过程进行仿真优化。结果表明, 按综合指标优化得到的闭环开机过程有优越的动态性能, 减少了开机规律对转轮的影响。

关键词: 叶片裂纹; 水轮发电机组; 开机规律; 闭环开机; 粒子群优化

中图分类号: TK730.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)03-0209-05

Simulation and optimization of closed-loop start-up characteristics for hydraulic turbines

LIU Zhimiao¹, ZHANG Dehu¹, CAO Linning¹, HUANG Zhida²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the crack phenomenon in a hydraulic turbine runner blade, from the perspective of the influence of the start-up law of the turbine governor on the runner, an electro-hydraulic servo system model considering nonlinear parts and a hydraulic turbine model based on comprehensive characteristic curves were established. The closed-loop start-up characteristics for hydraulic turbines whose rising curve of the expected rotation speed shows a straight line rule were analyzed. Considering the deviation of working head and other factors, a comprehensive index is proposed. The start-up process of a Francis hydraulic turbine in China was simulated. The results show that the closed-loop start-up process based on the comprehensive index can obtain a strong dynamic performance and reduce the impacts of the start-up laws on the runner.

Key words: blade crack; hydraulic turbine; start-up law; closed-loop start-up; particle swarm optimization

水轮机转轮叶片裂纹现象在国内外普遍存在, 如国外的大古力、萨阳等水电站, 国内的岩滩、大朝山、李家峡等水电站^[1]。水轮机转轮叶片裂纹严重影响水电站的安全稳定运行, 是目前水电行业备受关注的问题。吴永智等^[2]通过对小湾水电站机组开机方式分析, 指出在不同的开机规律下水轮机转轮叶片上的应力差别比较大, 开机规律不合理成为转轮产生裂纹的重要原因之一。黄登海等^[3]结合糯扎渡水电站现场试验结果, 通过延长调速器开机速率能较好地改变转轮的动态效应。可见, 水轮机调速器的开机规律对水轮机有重要影响。

目前, 我国水轮机调速器的开机规律通常采用接力器两段开机规律和闭环开机规律^[4]。接力器两段开机规律的参数选取有较严重的盲目性和任意性, 并且容易受空载开度的影响^[5-6]。闭环开机规律依靠调速器闭环调节能力使机组实际转速上升跟踪期望特性, 克服了两段开机规律的不足。张江滨等^[7]基于线性水轮机模型, 按推荐公式整定控制器参数得到的开机过程并不是最优的。周彬等^[8]以时间乘以误差绝对值积

收稿日期: 2015-06-29

作者简介: 刘志淼(1991—), 男, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要从事水力机组过渡过程控制与仿真研究。E-mail: yi_miao@foxmail.com

分(ITAE)作为性能指标寻找最优开机参数,但没有考虑使开机时间尽量短的要求。上述研究是采用刚性水击和水轮机线性化模型进行的,忽略了水轮发电机组原动机及引水系统的非线性,适用于小波动情况下,而开机过程属于大波动情况,非线性因素不能忽略。

为了降低水轮机调速器的开机规律对水轮机转轮动态应力的不良影响,保证水电站的安全稳定,本文建立了结合电液随动系统及水轮机非线性环节的水轮发电机组闭环开机仿真模型;提出了一种考虑了水轮机工作水头、开机时间和超调量的综合指标,运用粒子群算法优化开机规律参数;以一段直线开机规律为例,通过与按ITAE指标优化的试验结果对比,按综合指标优化开机规律能有效降低有压引水管道压力变化和水轮机力矩波动。

1 开机过程仿真模型

水轮机调速器广泛采用的是并联PID控制规律结构^[9],有压引水系统采用三阶弹性水击模型。

1.1 电液随动系统模型

水轮机调速器的电液随动系统具有若干种结构形式^[10],其传递函数为

$$\frac{y(s)}{y_{pid}(s)} = \frac{1}{T_y T_{y1} s^2 + T_y s + 1} \quad (1)$$

式中: $y(s)$ ——主接力器行程的拉氏变换; $y_{pid}(s)$ ——控制器输出的拉氏变换; T_{y1} ——辅助接力器反应时间常数; T_y ——主接力器反应时间常数; s ——拉氏算子。

在实际应用中,电液随动系统还包含配压阀死区、主接力器行程限制及主接力器速度限制等各类非线性环节。这些非线性环节会严重影响整个控制系统的动态品质^[11-13],笔者采用计入非线性环节的电液随动系统模型,如图1所示。

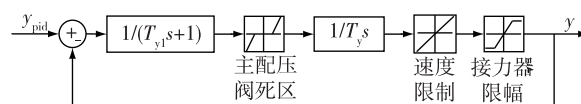


图1 电液随动系统模型框图

Fig. 1 Block diagram of electro-hydraulic servo system model

1.2 水轮机模型

基于模型综合特性曲线的水轮机模型与线性化模型和非线性解析模型^[14]相比,前者能更加真实地反映水轮机的动态特性,其数学模型为

$$\begin{cases} m_t = f_M(Y, n_{11}) \frac{h + h_0}{M_{11r}} - m_0 \\ q = f_Q(Y, n_{11}) \frac{\sqrt{h + h_0}}{Q_{11r}} - q_0 \\ n_{11} = \frac{n_{11r}(x + x_0)}{\sqrt{h + h_0}} \\ h(s) = q(s) G_h(s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_t, m_0 ——主动力矩偏差相对值、初始相对值; q, q_0 ——流量偏差相对值、初始相对值; x, x_0 ——转速偏差相对值、初始相对值; h, h_0 ——水轮机工作水头偏差相对值、初始相对值; $M_{11r}, Q_{11r}, n_{11r}$ ——水轮机额定单位力矩、额定单位流量、额定单位转速; f_M, f_Q ——单位力矩、单位流量特性函数; Y ——主接力器实际行程; n_{11} ——单位转速; $G_h(s)$ ——有压引水系统传递函数; $h(s), q(s)$ ——有压引水系统水压、流量的拉氏变换。

2 基本粒子群算法

设在一个 D 维搜索空间有 n 个粒子,它们所组成的种群为 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。在第 t 次迭代时,第 i 个粒子在搜索空间中的位置表示为 $X_i(t)=(x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \dots, x_{i,D}(t))$,飞行速度表示为 $V_i(t)=(v_{i,1}(t), v_{i,2}(t), \dots, v_{i,D}(t))$,此时粒子自身的最优位置为 $P_i(t)=(p_{i,1}(t), p_{i,2}(t), \dots, p_{i,D}(t))$,整个种群的最优位置为 $P_g(t)=(p_{g,1}(t), p_{g,2}(t), \dots, p_{g,D}(t))$ 。在第 $t+1$ 次迭代时,粒子根据下述规则来更新自己的速度与位置:

$$\begin{aligned} v_{i,d}(t+1) &= wv_{i,d}(t) + c_1 r_1 [p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,d}(t) - x_{g,d}(t)] \\ x_{i,d}(t+1) &= x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: w ——惯性权重; c_1, c_2 ——学习因子; r_1, r_2 —— $(0,1)$ 之间的随机数; d ——搜索空间的维数, $d=1,2,\dots,D$ 。

3 实例分析

对国内某混流式水电站机组建立开机过程仿真模型,相关参数如下:机组惯性时间常数 $T_a=5.9$,水流惯性时间常数 $T_w=1.632$,水击相长 $T_r=1.178$, $T_y1=0.05$, $T_y=0.2$ 。粒子群算法的参数设置为:种群总数 20,最大迭代次数 100, $c_1=c_2=2.0$ 。

3.1 闭环开机特性分析

目前常见设置的闭环开机期望转速上升曲线有按一段直线规律变化、按两段直线规律变化和按指数曲线变化等^[15]。本文针对按一段直线规律变化的闭环开机进行仿真分析,期望转速为

$$C = \frac{1}{T_c} t \quad 0 \leq t \leq T_c \quad (4)$$

式中: t ——时间; T_c ——期望转速由 0 升至额定转速的时间; C ——期望转速。

图 2 是 T_c 分别取 0s、10s、20s 时的闭环开机过程主接力器实际行程 Y 、转速 n 、工作水头 H 的仿真曲线,其中双画线为期望转速上升曲线。图 3 是 T_c 取 20s,不同电站参数 T_w 、 T_a 、 h_0 时的闭环开机特性对比曲线。

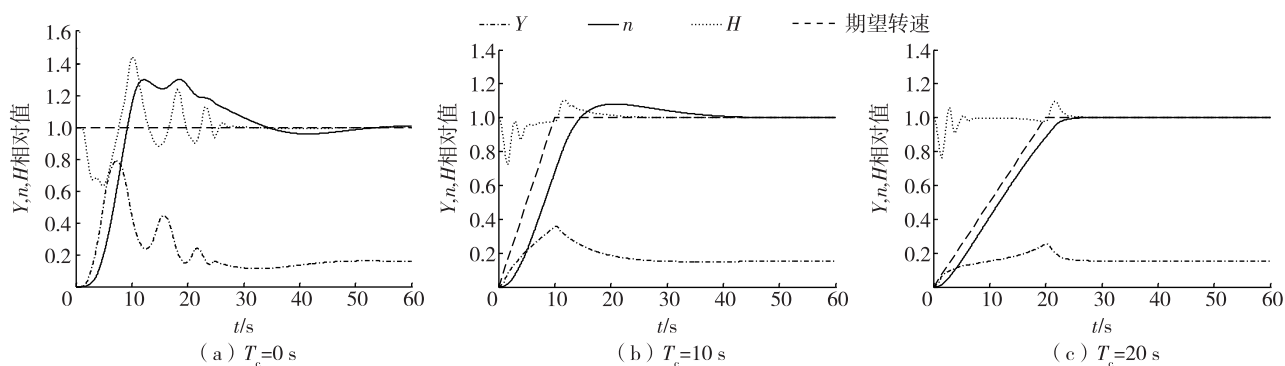


图 2 闭环开机过程仿真曲线

Fig. 2 Simulated curves of closed-loop start-up process

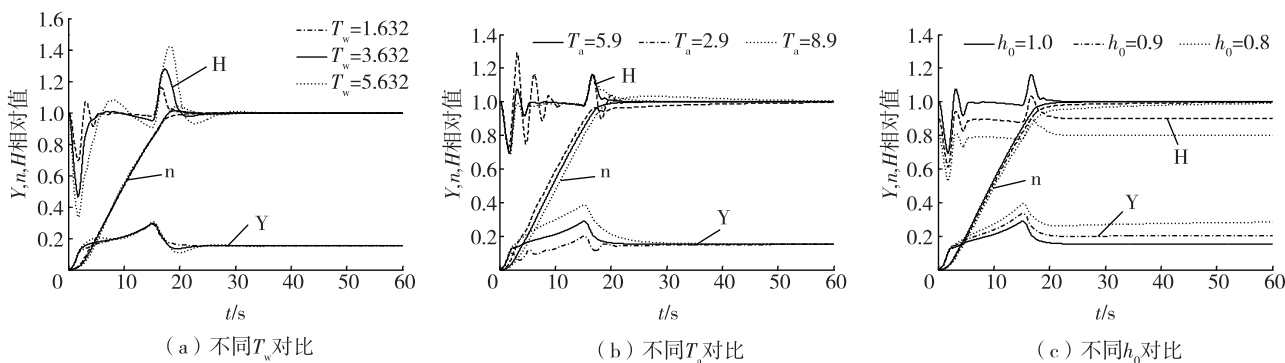


图 3 闭环开机特性对比曲线

Fig. 3 Comparison of closed-loop start-up characteristic curves

从图 2 可以看出:机组转速都不能完全跟踪期望转速上升曲线,原因是水击作用和机组惯性使得转速变化滞后; T_c 越小,开机过程波动越剧烈,原因是主接力器速度限制导致实际接力器行程滞后于控制器的输出; T_c 越大,开机过程越平稳,但转速到达额定转速的时间延长。从图 3 可以看出: T_w 越大,水轮机工作水头波动

偏差值越大; T_a 越小,转速响应越快;在相同 PID 参数下, h_0 越小,开机时间越长。综上可知,不同电站不同工况下的闭环开机过程应区别对待,以实现机组较优开机。

3.2 开机特性优化

工程实际中对水轮发电机组开机的性能要求主要有:机组从接收到开机指令至转速到达额定转速的时间短;机组转动力矩和轴向水推力波动小;机组压力引水管道的压力变化小。为了降低闭环开机过程中转轮叶片动态应力,减少转轮裂纹,笔者以水轮机工作水头偏差的相对值为控制量,综合考虑开机时间和超调量,提出了一种综合指标作为粒子的适应度函数。其表达式为

$$J_{ZH} = \int_0^{t_1} |h(t)| dt + \delta(\sigma) + k_1 t_s + k_2 |h(t)|_{\max} + k_3 |e_{ss}|$$

$$\delta(\sigma) = \begin{cases} 20\sigma & \sigma \geq 1\% \\ 0 & \sigma < 1\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: J_{ZH} ——综合指标; t_1 ——积分上限时间; $h(t)$ ——水轮机工作水头偏差相对值; σ ——最大转速偏差相对值; t_s ——机组转速从 0 升至额定转速的时间; e_{ss} ——机组转速稳态误差; k_1 、 k_2 、 k_3 ——权重系数, $k_1=0.1$, $k_2=10$, $k_3=100$ 。

将按本文提出的综合指标优化与按 ITAE 指标优化参数得到的一段直线规律变化的闭环开机过程进行比较,PID 参数及性能指标如表 1 所示,优化对比曲线如图 4 所示。

表 1 PID 参数及性能指标对比

Table 1 Comparison of PID parameters and performance indices

性能指标	比例增益	积分增益	微分增益	水头偏差峰值	t_s/s	σ	J_{ZH}
综合指标	0.8914	0.0700	0	0.2834	26.00	0.0007	4.9265
ITAE 指标	0.5773	1.3231	1.0143	0.5572	21.84	0.0132	9.8641

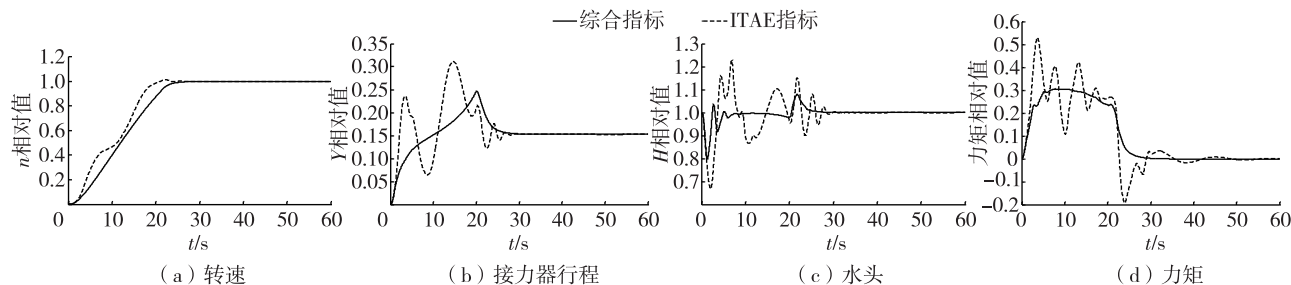


图 4 开机特性优化对比曲线

Fig. 4 Comparison of optimized start-up characteristic curves

从表 1 和图 4 可以看出,按综合指标与按 ITAE 指标优化相比,开机时间接近,几乎没有超调现象,水轮机工作水头波动小,机组转动力矩波动小。周彬等^[8]以 ITAE 指标优化的结果已经成功解决了小湾水电站开机过程中叶片应力值过高的问题,这为本文所做优化提供了工程应用支持,即按综合指标优化得到的闭环开机过程有优越的动态性能,能够有效地改善机组动态效应。

4 结 语

本文对电液随动系统加入限速、饱和等非线性环节,建立基于模型综合特性曲线的水轮机非线性模型,提高了水轮发电机组闭环开机仿真的真实性和可靠性。利用粒子群算法对闭环开机过程 PID 参数进行优化,提出了一种考虑水轮机工作水头偏差相对值的综合性能指标。实例仿真表明,笔者提出以综合指标优化开机控制参数能有效降低有压引水管道压力变化,减小水轮机力矩波动值,降低了开机规律对转轮的不良影响,为工程实践中水轮发电机组开机规律选择提供了参考。

参考文献:

- [1] 樊世英.混流式水轮机转轮裂纹原因分析及预防措施[J].水力发电,2002(5):38-41.(FAN Shiyong. Cause analysis and preventive measures of the francis turbine blade crack[J]. Water Power,2002(5):38-41.(in Chinese))
- [2] 吴永智,何常胜.调速器开机规律对机组转轮裂纹的影响[J].云南电力技术,2014,42(增刊1):74-76.(WU Yongzhi, HE Changsheng. Effects of the start-up law of the turbine governor on the runner [J]. Yunnan Electric Power, 2014,42(Sup1):74-76.(in Chinese))
- [3] 黄登海,张岗,陈金德.浅谈糯扎渡水轮机调速器开机规律[J].水电自动化与大坝监测,2014,38(4):11-16.(HUANG Denghai, ZHANG Gang, CHEN Jinde. Introduction of water turbine governor start-up laws of nuozechadu hydropower station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2014,38(4):11-16.(in Chinese))
- [4] 魏守平.水轮机调节系统仿真[M].武汉:华中科技大学出版社,2011:172.
- [5] 陈树勇,张贵山,赵瑞,等.水轮发电机组的规划式开机控制[J].电网技术,2005,29(22):76-79.(CHEN Shuyong, ZHANG Guishan, ZHAO Rui, et al. Program control based starting-up control strategy of hydroelectric generating sets[J]. Power System Technology, 2005,29(22):76-79.(in Chinese))
- [6] 王跃.抽水蓄能机组调速器智能启动策略研究[J].电网与清洁能源,2013,29(11):123-125,130.(WANG Yue. Study on governor intelligent starting strategy of pumped storage units[J]. Power System and Clean Energy, 2013,29(11):123-125,130.(in Chinese))
- [7] 张江滨,解建仓,焦尚彬.水轮发电机组最佳开机规律研究与实践[J].水利学报,2004,35(3):53-59.(ZHANG Jiangbin, XIE Jiancang, JIAO Shangbin. Study on optimum start-up rule for hydroelectric generating sets [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(3):53-59.(in Chinese))
- [8] 周彬,苏永亮,罗荣佳,等.两种水轮发电机组开机控制技术的比较及优化[J].水电自动化与大坝监测,2013,37(2):17-19,23.(ZHOU Bin, SU Yongliang, LUO Rongjia, et al. Comparison and optimization of two control technologies on hydraulic turbine start-up progress[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2013,37(2):17-19,23.(in Chinese))
- [9] 程远楚,张江滨,陈光大,等.水轮机自动调节[M].北京:中国水利水电出版社,2010:102-106.
- [10] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-28,33.(LI Hua, SHI Keqin, FAN Yue, et al. Structure analysis of water turbine governor model for stability calculation of power system [J]. Power System Technology, 2007,31(5):25-28,33.(in Chinese))
- [11] 凌代俭,沈祖诒.考虑饱和和非线性环节的水轮机调节系统的分叉分析[J].水力发电学报,2007,26(6):126-131.(LING Daijian, SHEN Zuyi. Bifurcation analysis of hydro-turbine governing system with saturation nonlinearity [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(6):126-131.(in Chinese))
- [12] 邢青青,郝继飞,白文宝.存在常见非线性环节系统PID参数的整定[J].电力自动化设备,2005,25(5):91-93.(XING Qingqing, HAO Jifei, BAI Wenbao. Tuning of PID controller parameters of system with common nonlinearity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(5):91-93.(in Chinese))
- [13] 范明树,郭江,张珂斐,等.调速器液压随动系统故障诊断系统[J].排灌机械工程学报,2014,32(6):505-510.(FAN Mingshu, GUO Jiang, ZHANG Kefei, et al. Fault diagnose system of governor hydraulic servo system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014,32(6):505-510.(in Chinese))
- [14] 刘昌玉,何雪松,何凤军,等.水电机组原动机及其调节系统精细化建模[J].电网技术,2015,39(1):230-235.(LIU Changyu, HE Xuesong, HE Fengjun, et al. Refined modeling of hydraulic prime mover and its governing system for hydropower generation unit[J]. Power System Technology, 2015,39(1):230-235.(in Chinese))
- [15] 康玲,叶鲁卿.水电机组闭环开机控制策略与仿真研究[J].水力发电学报,2000,19(1):55-61.(KANG Ling, YE Luqing. Studies on closed-loop start-up control strategy and simulation for hydroelectric generating units [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000,19(1):55-61.(in Chinese))