

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230327

基于改进灰狼搜索耦合杜鹃算法的水力发电机组启动优化

李佰霖, 龚子锐, 杨林明, 杨建, 何强

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为缩短水力发电机组开机时间, 提高机组开机过程和空载稳定性, 提出一种基于改进灰狼搜索耦合杜鹃算法的水力发电机组启动优化策略, 建立开机适应度函数, 该函数权衡机组开机频率 ITAE 指标和机组开机时间两个指标数值并将其标么化, 引入机组频率超调量和机组频率稳态误差两个惩罚函数, 从而有效改善机组启动性能评价指标, 且提出一种佳点集理论改进初始种群的改进灰狼搜索耦合杜鹃算法 (IGWSCSA) 针对机组启动参数进行精确优化。基于调速系统精细化模型的仿真试验得到最优参数使机组开机调节时间明显缩短, 超调量由 0.235 降低至 0.004, 极大优化了水力发电机组启动的开机速度和频率波动。

关键词: 水力发电机组; 启动优化; 标么值; 佳点集; 群智能算法; 参数优化

中图分类号: TK730; [TV734.1] **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)09-0180-05

1 引言

水电在承担电力系统调峰调频过程中发挥着重要作用, 为使水电迅速且稳定并网, 缩短水力发电机组启动时间, 提高水力发电机组启动稳定性有重要意义。目前, 在水力发电机组启动过程中, 机组普遍采用“开一闭环”控制规则, 为优化水力发电机组启动过程, 在启动第一阶段, 可采用最优脉冲控制策略^[1]调节导叶开度, 减轻机组的异常振动; 在启动第二阶段, 可采用粒子群优化算法^[2]、人工羊群算法^[3]、等群智能算法整定 PID 控制参数; 现有针对水电机组启动优化的研究, 在选择待优化参数部分考虑不够全面, 且在评价水力发电机组启动性能上多采用 ITAE 性能指标, 已无法满足优化水力发电机组开机性能的需求。对此, 本文以国内某大型水电站机组为例, 建立水电机组调速系统精细化仿真模型, 全面考虑“开一闭环”两个控制阶段的参数建立待优化向量, 并为评价水力发电机组启动过程建立了开机适应度函数, 提出 IGWSCSA 算法针对待优化向量参数进行精准优化, 并通过单样本 t 检验在目标函数对比试验中验证开机适应度函数性能, 通过独立样本 t 检验对比算法验证 IGWSCSA 算法优越性,

以期改善水力发电机调速系统启动速度和空载稳定性提供技术支撑。

2 调速系统精细化仿真模型

2.1 模型建立

水轮机调速系统精细化模型为包含给定元件、微机调速器、电液随动系统、水轮机、引水系统和发电机负载多个模块的调速系统精细化模型, 结构示意图见图 1。其中, PID 调节器采用并联结构; 电液随动系统模型采用数字调节器搭配电液

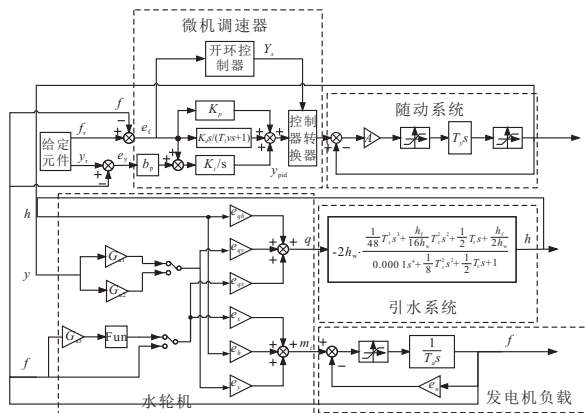


图 1 调速系统精细化模型结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the fine-tuned model for hydroelectric generator speed control system

收稿日期: 2023-03-06, 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 湖北省水电机械设备设计与维护重点实验室开放基金项目(2021KJX12)

作者简介: 李佰霖(1987-), 男, 博士、讲师、硕导, 研究方向为水力发电厂运维数字化, 电力设备在线监测与故障诊断, E-mail: libailin@ctgu.edu.cn

随动系统的结构,充分考虑实际工程中电液随动系统的死区、主配压阀和主接力器饱和的非线性环节;引水系统采用二阶弹性水击模型,采用六系数水轮机建立水轮机精细化模型, h 为水头偏差, f 为机组频率, $e_x, e_y, e_h, e_{qx}, e_{qy}, e_{qh}$ 均为水轮机传递系数, q 为水轮机流量相对偏差, m_t 为主动转矩;发电机负载模型中 T_a 为机组惯性时间常数, e_n 为考虑了水轮机自调节系数及负荷自调节系数。

2.2 待优化参数设计

采用“开—闭环”控制规则的水力发电机组启动过程,其开机波形见图 2。图 2 中, Y_s 为机组开机给定开度; X_s 为控制转换器参数; T_{pid} 为 PID 控制投入时刻; ϵ 为机组达空载状态频率稳态误差。首先导叶开度按照固定速率迅速达 Y_s 后保持恒定直到开环控制阶段结束,此时调速系统频率随开度增加而上升,直至达到额定频率比例 X_s 时开环控制阶段结束,此时 T_{pid} 投入 PID 控制阶段,随 PID 控制器控制,导叶开度为变化值,直到空载,导叶开度稳定;全面考虑“开—闭环”两个控制阶段,除优化 PID 参数 K_p, K_i, K_d 外,增加影响开机速度的开机开度参数 Y_s 和影响“开—闭环”控制稳定性的控制转换器参数 X_s ,建立待优化参数向量 $\mathbf{X}_i = [K_p, K_i, K_d, X_s, Y_s]$ 。

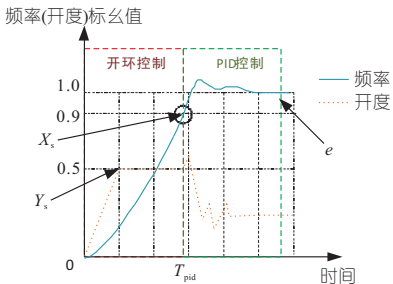


图 2 水力发电机组开机波形图

Fig. 2 Start-up waveform diagram of hydroelectric generator unit

2.3 目标函数与算法设计

为更好地优化水力发电机组开机启动过程,设计 IGWSCSA 算法和 $f_{\text{开机}}$ 目标函数优化参数,见图 3。 $f_{\text{开机}}$ 作为目标函数评价 IGWSCSA 算法寻优参数向量 \mathbf{X}_i 的性能,保留最优 \mathbf{X}_i 参数,从而有效改进调速系统开机性能和空载稳定性。

(1)目标函数。在调速系统 PID 参数优化整定中常用综合 ITAE 性能指标^[2]作为目标函数评价控制性能,综合 ITAE 指标 $J_{\text{综合ITAE}}$ 表示为:

$$J_{\text{综合ITAE}} = \int_0^{t_u} t |e(t)| dt + \omega_1 t_c + \omega_2 \delta(\sigma) \quad (1)$$

式中, t 为进入 PID 控制开始记录的時刻; $e(t)$ 为

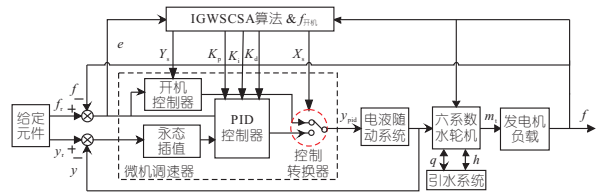


图 3 IGWSCSA 算法参数优化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of parameter optimization for IGWSCSA algorithm

t 时刻机组频率误差; t_u 为上限时刻; ω_1, ω_2 均为常数,一般均取为 1.0; t_c 为调节时间; $\delta(\sigma)$ 为关于系统超调量 σ 的惩罚函数。

在评价水电机组开机控制性能时,综合 ITAE 指标中 ω_1, ω_2 均为常数,并不能恰当权衡误差、调节时间和超调量三者的权重,使参数优化达到理想效果,将水力发电机仿真原始值作为基准值,标么化 $J_{\text{综合ITAE}}$ 的部分函数,且加入水电机组开机后空载状态频率的稳态误差的惩罚函数 $\epsilon(f)$,最终得目标函数 $f_{\text{开机}}$ 为:

$$\begin{cases} f_{\text{开机}} = J_{\text{ITAE}}/J_{\text{ITAE0}} + t_s/t_{s0} + \delta(\sigma) + \epsilon(f) \\ J_{\text{ITAE}} = \int_0^{t_u} t |e(t)| dt \end{cases} \quad (2)$$

式中, J_{ITAE} 为机组频率 ITAE 指标; J_{ITAE0} 为原始机组频率 ITAE 值; t_s 为调节时间,取机组频率进入新稳态值的 $\pm 2\%$; t_{s0} 为原始调节时间; $\delta(\sigma)$ 为机组频率超调量惩罚函数。

当 $f_{\text{开机}}$ 值为最小,得到最优结果。

(2)约束条件。根据式(2)可知,仿真模型原始系统的目标函数值为 2,根据原始系统超调量 σ 确定超调量的惩罚函数 $\delta(\sigma)$ 为:

$$\delta(\sigma) = \begin{cases} 2 & \sigma > \sigma_0 \\ 0 & \sigma \leq \sigma_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_0 为原超调量,当仿真时 σ 大于 σ_0 ,则给予惩罚。

根据国家电力系统的额定频率为 50 Hz,系统容量在 3 000 MW 及以上的电网正常频率偏差允许值为 ± 0.2 Hz。将频率允许偏差范围外的结果给予惩罚,建立 $\epsilon(f)$ 为系统空载频率稳态误差惩罚函数为:

$$\epsilon(f) = \begin{cases} 3 & f > 50.2 \\ 0 & 49.8 \leq f \leq 50.2 \\ 3 & f < 49.8 \end{cases} \quad (4)$$

(3)改进灰狼搜索耦合杜鹃算法。改进灰狼搜索耦合杜鹃算法(IGWSCSA)受灰狼优化算法(GWO)启发,改进其种群初始化、搜索机制和种群位置更新跳出局部最优能力,最终建立改良算法。利用佳点集理论^[4-5]初始化种群可保证个体

在搜索空间中均匀分布。将佳点集初始化种群映射到群智能算法搜索空间,可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_I]^T \\ \mathbf{X}_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D] \\ x_i^d = (u^d - l^d) \{r_i^d k\} + l^d \end{array} \right\} \quad \left(\begin{array}{l} 0 < i < I \\ 0 < d < D \end{array} \right) \quad (5)$$

式中, \mathbf{X} 为种群初始化位置; \mathbf{X}_i 为种群第 i 个个体的位置; I 为种群总个体数; D 为参数维度; x_i^d 为第 d 维第 i 个点; u^d, l^d 分别为第 d 维上、下界; r_i^d 为 d 维第 i 个佳点; $\{r_i^d k\}$ 为取小数部分。

GWO 算法在捕猎过程中行为单一,捕食即寻优方式只有跟随 α, β, δ 头狼附近包围猎物这一种方式,搜索结果受头狼影响较大,在全局搜索能力上有所欠缺。本文引入鲸群算法^[6]改良搜索机制,得到位置更新公式为:

$$\mathbf{X}_{n, \text{wolf}}(t+1) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_{\text{rand, wolf}}(t) - A_n | C_n \mathbf{X}_{\text{rand, wolf}}(t) - \mathbf{X}(t) | \\ |A| > 1, p' \in [0, 0.5], n=1, 2, 3 \\ \mathbf{X}_{p, \text{wolf}}(t) - A_n | C_n \mathbf{X}_{p, \text{wolf}}(t) - \mathbf{X}(t) | \\ |A| < 1, p' \in [0, 0.5], n=1, 2, 3, p = \alpha, \beta, \delta \\ | \mathbf{X}_{p, \text{wolf}}(t) - \mathbf{X}(t) | e^{bl} \cos(2\pi l) + \mathbf{X}_{p, \text{wolf}}(t) \\ p' \in [0.5, 1], p = \alpha, \beta, \delta \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, $\mathbf{X}_{n, \text{wolf}}(t+1)$ 为狼个体搜索后生成的三个狼群; A_n 为取值 $[-a, a]$ 的均匀随机数, a 初始值为 2, 并随着算法迭代由 2 递减至 0; C_n 为 $[0, 2]$ 的随机数; $\mathbf{X}_{\text{rand, wolf}}(t)$ 为 ω 狼群中随机挑选的某个狼位置; $\mathbf{X}(t)$ 为算法在第 t 次迭代时的种群位置; $\mathbf{X}_{p, \text{wolf}}(t)$ 为 α, β, δ 狼的位置; b 为常数, 取 1; l 为 $[-1, 1]$ 的随机数。

为使种群更新时有较强跳出局部最优的能力, 引入杜鹃搜索算法(CS)^[7]中的 Levy 飞行, 改进后的种群位置更新为:

$$\mathbf{X}_{n, \text{Levy}}(t+1) = \mathbf{X}_{n, \text{wolf}}(t) + \gamma s [\mathbf{X}_{\text{best, wolf}}(t) - \mathbf{X}_{n, \text{wolf}}(t)] L(\lambda) \quad (7)$$

$$\mathbf{X}_{n, \text{cs}}(t+1) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_{n, \text{Levy}}(t+1) + \gamma [\mathbf{X}_{j, \text{Levy}}(t+1) - \mathbf{X}_{k, \text{Levy}}(t+1)] \quad p < p_a, n=1, 2, 3 \\ \mathbf{X}_{n, \text{Levy}}(t+1) \quad p > p_a, n=1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, $\mathbf{X}_{n, \text{Levy}}(t+1)$ 为三个狼群经过 Levy 飞行后新生成三个种群的位置; γ 为 $[0, 1]$ 区间随机值; s 为 Levy 飞行的步长设置为 0.1; $\mathbf{X}_{\text{best, wolf}}$ 为狼群中最优位置; $L(\lambda)$ 为服从当前迭代次数 t 的随机分布; $\mathbf{X}_{n, \text{cs}}(t+1)$ 为新生成的三个种群经过杜鹃搜索算法更新的位置; $\mathbf{X}_{j, \text{Levy}}(t+1), \mathbf{X}_{k, \text{Levy}}(t+1)$

1) 均为种群随机生成的位置; p 为 $[0, 1]$ 的随机数; p_a 为常数取 0.25。

将杜鹃搜索算法更新的位置合并, 最终得到迭代的主种群位置为:

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 \mathbf{X}_{n, \text{cs}}(t+1) \quad (9)$$

综上, IGWSCSA 算法流程如下。

步骤 1 通过佳点集理论初始化种群, 得到初始种群位置 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_I]^T$, 矩阵中待寻优的参数向量被设置为 $\mathbf{X}_i = [X_i^1, X_i^2, X_i^3, X_i^4, X_i^5]$, 对应水力发电机开机待优化向量 $\mathbf{X}_i = [K_p, K_i, K_d, X_s, Y_s]$ 。

步骤 2 设置最大迭代次数 $T_{\text{Max_iter}}$ 。

步骤 3 通过搭建的调速系统精细化仿真模型计算出种群中各个体 $\mathbf{X}_i = [X_i^1, X_i^2, X_i^3, X_i^4, X_i^5]$ 对应的适应度函数 $f_{\text{开机}}$ 。

步骤 4 比较适应度数值, 选出 α, β, δ 狼的位置。

步骤 5 用 IGWSCSA 算法迭代种群位置。

步骤 6 重复以上步骤, 直到最大迭代数。

步骤 7 输出 α 个体位置。

3 仿真设计与结果分析

以某大型水电站水力发电机组为例, 基于 Simulink 搭建精细化调速系统模型, 仿真时常设置为 150 s, 采样频率为 1 000 Hz。

水力发电机模型中微机调速器原始参数为 $K_p = 3, K_i = 3, K_d = 4, T_{1v} = 0.01, b_p = 0.04$, 控制转换器参数 $X_s = 0.96$, 水力发电机组开机时接法器开度 $Y_s = 0.3$; 电液随动系统参数中 $A = 3$, 接法器响应时间常数 $T_y = 0.1$, 主配压阀上下限设置为 $[0.0065, -0.0200]$, 主接法器饱和上下限设置为 $[0, 1]$; 引水系统参数中 $T_r = 0.8, h_w = 1.58$; 六系数水轮机参数中 $e_x = -0.21, e_y = 1, e_h = 0.7, e_{qr} = 0, e_{qy} = 1, e_{qh} = 0.4$; 发电机负载模型中 $T_a = 8, e_n = 0$ 。IGWSCSA 算法中, 最大迭代次数 $T_{\text{Max_iter}} = 50$, 种群个体数 $I = 30$, 待优化参数 X_i 的寻优上、下限分别为 $u_b = [15, 10, 10, 1, 1], l_b = [0, 0, 0, 0.8, 0.3]$, 待寻优参数的参数维度 $D = 5$; 水力发电机组原始性能指标中 $J_{\text{ITAE0}} = 6.5, t_{s0} = 50.33 \text{ s}, \sigma_0 = 0.0235 \text{ s}$ 。

设计两个对比试验, 分别验证所提目标函数和算法的性能。

(1) 试验 1。为验证开机适应度函数 $f_{\text{开机}}$ 的性能, 建立未标么化性能指标的目标函数作为对

照组适应度函数 $f_{\text{对照组}}$, 两组目标函数同时采用 IGWSCSA 算法寻优参数, 独立运行 30 次, 其中对照组适应度函数为:

$$f_{\text{对照组}} = J_{\text{ITAE}} + t_s + \delta(\sigma) \quad (10)$$

采用两组测试结果的 σ 和 t_s 的最大值、最小值、平均值和标准差值进行分析, 同时对两组测试结果进行单样本 t 检验。对比采用不同目标函数优化参数的仿真结果见表 1。

表 1 目标函数性能对比表

Tab. 1 Performance comparison of objective functions

目标函数	性能指标	最大	最小	平均	标准差
$f_{\text{开机}}$	σ	0.019 8	0.004 0	0.014 7	0.006 9
	t_s/s	28.732 0	20.141 0	25.856 0	2.595 7
$f_{\text{对照组}}$	σ	0.039 9	0.038 9	0.039 3	0.000 5
	t_s/s	24.306 0	23.936 0	24.158 0	0.181 3

将 $f_{\text{开机}}$ 与 $f_{\text{对照组}}$ 的性能指标 σ 与 t_s 分别进行单样本 t 检验, 见表 2。

表 2 对比目标函数的单样本 t 检验

Tab. 2 Single-sample t-test of the compared objective functions

指标	检验值	目标函数	显著性(双尾)	t 值
σ	0.023 5	$f_{\text{开机}}$	<0.001	-9.409
		$f_{\text{对照组}}$	<0.001	173.536
t_s	50.330 0 s	$f_{\text{开机}}$	<0.001	-60.350
		$f_{\text{对照组}}$	<0.001	-777.550

由 t 检验结果可知, 采用 $f_{\text{开机}}$ 优化参数后仿真超调量 σ 和调节时间 t_s 比原系统显著降低; 而采用 $f_{\text{对照组}}$ 在优化参数后对比原系统, 虽然开机时间显著减小, 但其超调量并未显著降低, 而是显著增大。

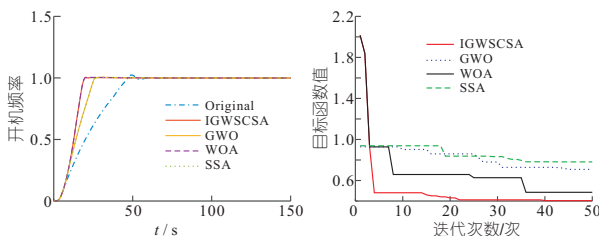
(2) 试验 2。为验证 IGWSCSA 算法的性能, 采用 GWO、WOA、SSA^[8] 3 个优化算法作为对照组算法, 同时采用 $f_{\text{开机}}$ 作为目标函数, 各算法独立运行 30 次, GWO 算法参数 a 设置为 2 线性递减至 0, C 为 [0, 2] 的随机数; WOA 算法参数 a 设置为 2 线性递减为 0, C 为 [0, 2] 的随机数, 参数 $b=1$, 参数 l 为 [-1, 1] 内的随机数; SSA 算法参数 C_1 为 $[2/e^4, 2]$ 的随机数, C_2 为 [0, 1] 的随机数。对比各算法寻优 σ 、 t_s 、 $f_{\text{开机}}$ 的最大、最小、平均值和标准差, 同时将 IGWSCSA 算法的结果分别对比 GWO、WOA、SSA 进行独立样本 t 检验, 见表 3。由表 3 可知, 基于 IGWSCSA 算法优化的最优参数仿真得到的水电机组开机调节时间由原始 50.33 s 缩短到 20.21 s, 超调量由 0.235 降低至 0.004。通过 IGWSCSA 算法得到的 $f_{\text{开机}}$ 明显优于其他算法。

图 4 仿真波形显示, 优化后的仿真开机频率稳定性和开机时间明显优于原始系统; IGWSCSA 算法对比其他算法, 在寻求全局最优解性能更强, 且局部寻优时收敛更快。

表 3 算法性能对比分析表

Tab. 3 Comparative analysis of algorithm performance

项目	指标	IGWSCSA	GWO	WOA	SSA
最小	σ	0.004 0	0.004 6	0.004 1	0.004 1
	t_s/s	20.210 0	28.003 0	20.210 0	28.003 0
	$f_{\text{开机}}$	0.403 7	0.708 2	0.485 1	0.722 5
最大	σ	0.019 8	0.023 1	0.023 1	0.022 3
	t_s/s	29.188 0	32.018 0	45.769 0	47.334 0
	$f_{\text{开机}}$	0.709 4	0.940 5	1.000 2	0.980 6
均值	σ	0.010 7	0.016 3	0.016 8	0.016 1
	t_s/s	27.316 0	30.037 0	32.851 0	33.789 0
	$f_{\text{开机}}$	0.651 2	0.778 9	0.841 2	0.823 7
标准差	σ	0.007 3	0.006 6	0.006 0	0.006 4
	t_s/s	2.053 6	1.148 8	4.853 5	4.547 9
	$f_{\text{开机}}$	0.059 2	0.053 8	0.089 1	0.053 7



(a) 算法优化参数后开机频率波形图 (b) 算法迭代目标函数值对比图

图 4 仿真波形图

Fig. 4 Simulation waveform diagram

对比算法目标函数值的独立样本 t 检验结果见表 4。由表 4 可知, 在独立样本 t 检验的莱文方差等同性检验中 IGWSCSA 算法对比其他算法显著性均大于 0.05, 即对比算法目标函数值的方差齐性; 在平均值等同性 t 检验中显著性(双尾)均小于 0.01, 可认为差异有统计学意义, 且 IGWSCSA 算法对比 GWO、WOA、SSA 算法的 t 值分别为 -8.599、-9.564、-11.631, 因此 IGWSCSA 算法优化参数的性能高于对比算法。

表 4 对比算法目标函数值的独立样本 t 检验

Tab. 4 Independent-sample t-test of compared algorithm objective function values

算法	显著性	显著性(双尾)	t 检验
IGWSCSA vs. GWO	0.360	<0.01	-8.599
IGWSCSA vs. WOA	0.157	<0.01	-9.564
IGWSCSA vs. SSA	0.833	<0.01	-11.631

4 结论

a. 选择待优化参数时, X_i 对比仅采用 PID 控制器参数能更好优化水电机组开机。

b. 目标函数 $f_{\text{开机}}$ 能更好地评价水力发电机组开机性能。

c. IGWSCSA 算法具有更好的初始化种群、搜索机制和跳出局部最优能力优化参数。

参考文献:

[1] ZHOU Y, MA J, CAO D, et al. Startup process

optimization of hydropower unit based on stress measurement of Francis Turbine runner[J]. Frontiers in energy research, 2022,10. Doi:https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.885634.

[2] 寇攀高. 水轮发电机及其调速系统的参数辨识方法与控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[3] 周攀, 周建中, 赖昕杰, 等. 基于精细化模型的抽水蓄能机组低水头开机多目标优化[J]. 水电能源科学, 2019,37(9):128-132.

[4] 张玲, 张钺. 佳点集遗传算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(9):917-922.

[5] 孙文涛, 蔡晖, 张文嘉, 等. 基于 IOLBBO 算法的水轮机非线性模型参数辨识[J]. 水电能源科学,

2018,36(1):152-155.

[6] 杨堃, 杨侃, 华萍, 等. 基于改进鲸鱼算法的三峡水电站经济运行模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2020,38(6):46-49.

[7] BAN JIANMIN, PAN XINYU, GU MINMING. Electrical characteristics estimation of photovoltaic modules via cuckoo search-relevant vector machine probabilistic model [J]. Frontiers in energy research, 2021, 9. Doi: https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.610405.

[8] 段绍米, 罗会龙, 刘海鹏. 人群搜索和樽海鞘群的混合算法优化 PID 参数[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(6):1230-1246.

Startup Optimization of Hydroelectric Generating Set Based on Improved Grey Wolf Search Coupled Cuckoo Algorithm

LI Bai-lin, GONG Zi-rui, YANG Lin-ming, YANG Jian, HE Qiang

(College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: In order to shorten the start-up time of the hydroelectric generating set and improve the stability of the generating set's start-up process and non-loading, a start-up optimization strategy of hydropower unit based on improved grey wolf search coupling cuckoo algorithm was proposed. This fitness function weighs the two index values of the unit's start-up frequency ITAE index and the unit's start-up time and standardizes them. Two penalty functions of unit frequency overshoot and unit frequency steady-state error are introduced to effectively improve the start-up performance evaluation index of the hydroelectric generating set. An improved grey wolf search coupled cuckoo algorithm (IGWSCSA) based on good point set theory to improve the initial population is proposed to optimize the start-up parameters of the generating set. Based on the simulation experiment of the refined model of the speed control system, the optimal parameters are obtained to shorten the start-up adjustment time of the generating set, and the overshoot is reduced from 0.235 to 0.004, which greatly optimizes the start-up speed and frequency fluctuation of the hydroelectric generating set.

Key words: hydroelectric generating set; startup optimization; per-unit value; good point set; swarm intelligence algorithm; parameter optimization

(上接第 188 页)

参考文献:

[1] 谭文胜, 万元, 夏代雄, 等. 大型水轮机顶盖动态特性数值模拟与试验研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9):175-178.

[2] 练继建, 王婷杰, 王海军, 等. 基于原型振动测试的水轮机顶盖螺栓疲劳分析[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3):248-253.

[3] 周劲松. 耦合故障下水轮机振动特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(10):194-196, 201.

[4] 俞阿龙, 黄惟一. 振动速度传感器幅频特性改进方法的研究[J]. 自动化仪表, 2004(5):4-7.

[5] 江学文. 水轮发电机组振动保护工程应用研究[J].

中国农村水利水电, 2012(6):128-131.

[6] 王海, 郑莉媛, 冯正祥, 等. 水轮发电机组低频振动异常信号分析研究[J]. 水力发电, 2003(3):31-34, 46.

[7] 彭兵, 李友平, 曹长冲, 等. 大型水轮机顶盖振动传感器安装位置对比分析[J]. 大电机技术, 2016(2):33-36, 56.

[8] J. S 米切尔. 机械故障的分析与监测[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.

[9] 袁东东. 混流式水轮机顶盖径向刚度分析和优化[J]. 电机技术, 2016(6):33-35.

[10] 贾伟, 李建伟, 刘晶石, 等. 某轴流式水轮机顶盖有限元分析及结构优化设计[J]. 电力学报, 2014, 29(4):349-352.

Research on Test of Hydraulic Turbine Top Cover Running State Based on Dynamic Strain

CHEN Yong-xu, HAO Ya-peng

(Guodian Dadu River Houziyan Hydropower Construction Co., Ltd., Ganzhi 626000, China)

Abstract: When the magnetolectric velocity sensor is used to test the vibration of the top cover, distortion is easy to occur due to the inherent characteristics of the sensor and the test conditions, and the data can not truly and effectively reflect the operation state of the water turbine top cover. The correlation among excitation force, vibration and strain was clarified through vibration theoretical analysis and stress calculation of top cover structure. Using finite element structural analysis to determine the weak position of the rigidity and strength of the top cover, the dynamic strain value based on this position was proposed as an indicator parameter for evaluating the operation status of the hydraulic turbine top cover. Based on the vibration value and dynamic strain value in the stable operation area, a mapping relationship between strain and vibration was established to solve the problem of inaccurate vibration measurement of the top cover. Taking a power plant unit as an example, the feasibility of the proposed method was verified.

Key words: distortion; vibration theory; force calculation; finite element method; dynamic strain; mapping; feasibility