

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.017

抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化

马晓伟¹, 魏平¹, 王吉利¹, 柯贤波¹, 任冲¹, 潘文霞², 朱珠²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为有效抑制高水电占比西北电网的超低频振荡, 针对缺乏同时研究调速系统和现场控制单元控制参数优化的现状, 提出了一种抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化方法。在建立系统多级频率控制模型的基础上, 理论分析了抑制超低频振荡的控制参数安全域, 在该安全域内以综合偏差绝对值与时间积分的乘积最小为目标, 借助 Matlab/Simulink 平台通过粒子群算法优化了多级控制参数。基于 PSCAD/EMTDC 平台的时域仿真验证了抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数理论分析和优化方法的有效性。

关键词: 水电机组; 多级频率控制; 超低频振荡; 现场控制单元; 参数优化

中图分类号: TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)05-0126-07

Optimization of multi-stage frequency control parameters of hydro power unit for ultra-low frequency oscillation suppression

MA Xiaowei¹, WEI Ping¹, WANG Jili¹, KE Xianbo¹, REN Chong¹, PAN Wenxia², ZHU Zhu²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the effective suppression of ultra-low frequency oscillation in Northwest power grid with a large proportion of hydro power in China, it is crucial to simultaneously optimize multi-stage frequency control parameters of speed governing system and local control unit. To address this problem, a parameter optimization method for the multi-stage frequency control of hydropower is proposed to suppress the ultra-low frequency oscillation in this study. Based on the multi-stage frequency control model, the security region of joint control parameters for suppressing ultra-low frequency oscillation is theoretically analyzed. Moreover, with the goal of minimizing the absolute value of comprehensive deviation multiplied by the time integral in the security region, the multi-stage control parameters are optimized through particle swarm optimization using the Matlab/Simulink platform. Finally, the time-domain simulation based on the PSCAD/EMTDC platform verifies the effectiveness of theoretical analysis and optimization method of multi-stage frequency control parameters for suppressing the ultra-low frequency oscillation of hydropower.

Key words: hydro power unit; multi-stage frequency control; ultra-low frequency oscillation; local control unit; parameters optimization

西北电网是我国新能源装机容量占比最大的区域网, 其频率稳定面临极大挑战。由于缺乏与新能源配套的常规火电, 其频率支撑能力较薄弱, 而西北电网辖区水能资源丰富, 水电装机占比高达 40%, 故深入挖掘水电机组调频性能是保证西北电网安全运行的关键^[1-2]。

目前, 水电高占比系统一次调频过程中小扰动不稳定引发的超低频振荡问题已初步显现^[3-4], 其在机理和表现上与传统发电机转子间相对摇摆的低频振荡存在显著差异^[5]。由于传统模型仅考虑调速系统 (speed governing system, GOV) 控制, 在 GOV 控制参数设置不合理和原动机水锤效应的共同作用下, 系统可能出现负阻尼 (即极点位于右半 s 平面), 从而引发超低频振荡^[6-8]。为抑制超低频振荡, 刘少博等^[9-11]对 GOV 控制参数进行了优化, 但水电机组的频率调节由 GOV 和现场控制单元 (local control unit, LCU) 共同完成, 仅考虑

基金项目: 国家电网有限公司西北分部科技项目 (SCTYHT/21-JS-223)

作者简介: 马晓伟 (1979—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电网调控运行工作。E-mail: maxw@nw.sgcc.com.cn

通信作者: 朱珠 (1987—), 女, 博士研究生, 主要从事可再生能源发电技术研究。E-mail: zhuzhu515@hhu.edu.cn

引用本文: 马晓伟, 魏平, 王吉利, 等. 抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 126-132.

MA Xiaowei, WEI Ping, WANG Jili, et al. Optimization of multi-stage frequency control parameters of hydro power unit for ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 126-132.

GOV 的调频模型无法描述 LCU 对调频的影响,这导致理论分析结果与实测频率响应存在明显差异^[12]。

近年来,LCU 对系统调频特性的影响逐渐得到关注。杨荣照等^[13]从理论上揭示了 LCU 在有功调节速率和稳定性方面的重要性;张少东等^[14]从理论上提出了提高机组有功调节稳定性的 LCU 控制参数优化方法,但没有考虑 GOV 和 LCU 对系统调频稳定性的作用;李继安等^[15]从实践角度出发,分析了锦屏一级水电站某机组并网试验发生有功波动的主要原因是 LCU 与 GOV 控制参数不协调,但是缺乏相关机理分析;李莹等^[12]分析了考虑 LCU 的多级控制对系统频率振荡阻尼的影响机理,但未提出相关抑制方法。

本文结合西北电网水电机组实测建模工作,建立了典型的含 GOV 和 LCU 水电机组系统多级频率控制模型,采用频域分析方法推导了多级控制参数安全域,并分析了考虑 LCU 与否对控制参数安全域的影响,同时采用粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法优化各控制参数,并借助 PSCAD/EMTDC 平台验证了该理论分析与优化方法的有效性。

1 多级频率控制模型

通常,水电机组的多级频率控制包括 LCU 与 GOV 两级。根据自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 指令及频率偏差,LCU 进行功率控制,功率控制的输出送给 GOV;GOV 则根据频率偏差控制导叶开度大小完成机组的有功调节。

水电机组的多级频率控制有功率模式 (LCU 向 GOV 传达功率信息) 和开度模式 (LCU 向 GOV 传达开度信息) 两种典型模式。考虑西北电网水电机组并网时通常工作于开度模式,本文研究开度模式下水电机组多级频率控制,其控制方框图如图 1 所示。该控制方框图一方面忽略了调节死区、测量延时、调节限幅的非线性环节,另一方面,当发电机组与互联系统的联系很强时高微分增益易导致过度的振荡和不稳定^[16],故此处 GOV 是实际中常采用的 PI 控制。

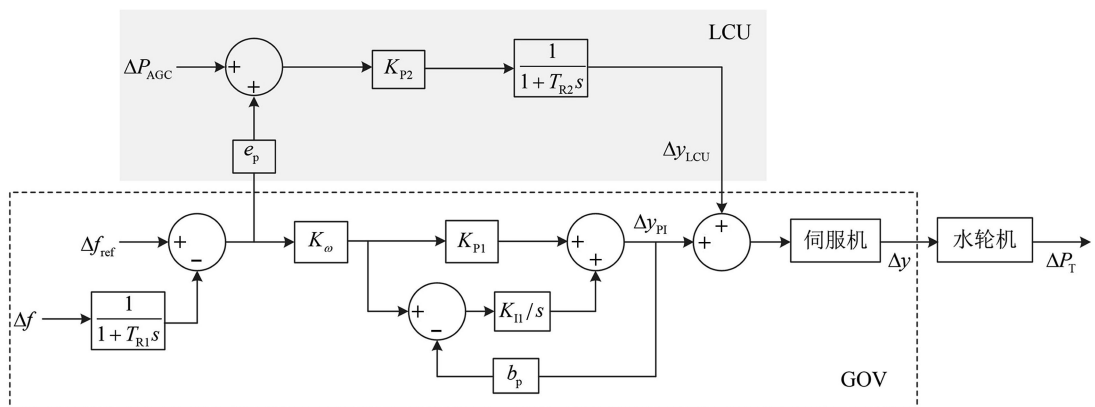


图 1 开度模式下水电机组多级频率控制方框图

Fig. 1 Block diagram of multi-stage frequency control of hydro power unit under opening mode

由图 1 可知,导叶开度变化 Δy 满足:

$$\begin{cases} \Delta y_{PI} = K_{\omega} (K_{II}/s + K_{PI}) [(\Delta f_{ref} - \Delta f)/(T_{R1}s + 1)] / (b_p K_{II}/s + 1) \\ \Delta y_{LCU} = [K_{P2}/(T_{R2}s + 1)] \{ \Delta P_{AGC} - e_p [\Delta f_{ref} - \Delta f/(T_{R1}s + 1)] \} \\ \Delta y = (\Delta y_{PI} + \Delta y_{LCU}) / (T_a s + 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δf_{ref} 为频率指令变化; Δf 为频率偏差; ΔP_{AGC} 为 AGC 指令变化; K_{ω} 、 e_p 、 b_p 为放大系数; K_{PI} 、 K_{II} 、 K_{P2} 为控制参数; T_{R1} 、 T_{R2} 为测量环节时间常数; T_a 为伺服机时间常数; Δy_{LCU} 、 Δy_{PI} 为 LCU 和 GOV 输出的导叶开度偏差。

小扰动下,描述水轮机动态特性的经典六参数模型满足^[17]:

$$\begin{cases} \Delta M_T = e_h \Delta h + e_{\omega} \Delta \omega + e_y \Delta y \\ \Delta q = e_{qh} \Delta h + e_{q\omega} \Delta \omega + e_{qy} \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中: ΔM_T 为转矩变化; Δq 为流量变化; Δh 为水头变化; $\Delta \omega$ 为转速变化; e_h 、 e_{ω} 、 e_y 分别为转矩对水头、转速和开度的传递系数; e_{qh} 、 $e_{q\omega}$ 、 e_{qy} 分别为流量对水头、转速和开度的传递系数。

标么制下,当各传递系数取典型值时,水轮机机械功率偏差 ΔP_T 与导叶开度变化 Δy 满足^[16]:

$$\Delta P_T = (1 - T_w s) \Delta y / (1 + 0.5 T_w s) \quad (3)$$

式中 T_w 为水流惯性时间常数。

系统等效频率响应可表示为^[16]

$$\Delta P_d = (T_{in} s + K_L) \Delta f \quad (4)$$

式中: ΔP_d 为有功小扰动; T_{in} 为惯性时间常数; K_L 为负荷调频系数。

当仅关注系统一次调频时, $\Delta P_{AGC} = 0$ 。整理式(1)(3)(4)得到小扰动下系统多级频率控制模型为

$$\Phi_{multi} = \Delta f / \Delta P_d = (T_{R1} s + 1)(s + b_p K_{I1})(T_a s + 1)(0.5 T_w s + 1)(T_{R2} s + 1) \cdot \\ [(T_{in} s + K_L)(T_{R1} s + 1)(s + b_p K_{I1})(T_a s + 1)(0.5 T_w s + 1)(T_{R2} s + 1) + \\ K_\omega (K_{P1} s + K_{I1})(-T_w s + 1)(T_{R2} s + 1) + K'_{P2}(-T_w s + 1)(T_{R1} s + 1)(s + b_p K_{I1})]^{-1} \quad (5)$$

其中

$$K'_{P2} = e_p K_{P2}$$

该模型表达了水电机组多级频率控制,忽略了调节死区、测量延时、调节限幅的非线性环节,描述了仅水电承担一次调频任务时,小扰动下系统一次调频响应过程。

2 抑制超低频振荡的控制参数安全域

2.1 多级控制参数安全域

基于前面构建的小扰动下系统多级频率控制模型,考虑相关参数范围($0.05 \text{ s} \leq T_a \leq 0.2 \text{ s}$, $0.5 \text{ s} \leq T_w \leq 4 \text{ s}$, $0.5 \leq K_{P1} \leq 20$, $0.05 \leq K_{I1} \leq 10$, $2\% \leq b_p \leq 4\%$, $8 \text{ s} \leq T_{in} \leq 12 \text{ s}$, $0 \text{ s} \leq T_{R1} \leq 0.1 \text{ s}$, $0 \text{ s} \leq T_{R2} \leq 0.1 \text{ s}$)^[18],该模型降阶为

$$\Phi'_{multi} = (s + K_{I1} b_p) / (A_1 s^2 + B_1 s + C_1) \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_1 = T_{in} - K_\omega K_{P1} T_w - K'_{P2} T_w \\ B_1 = K_\omega K_{P1} - K_\omega K_{I1} T_w + T_{in} K_{I1} b_p + K_L + K'_{P2} (1 - T_w b_p K_{I1}) \\ C_1 = K_L K_{I1} b_p + K_\omega K_{I1} + K'_{P2} b_p K_{I1} \end{cases}$$

其中

根据劳斯判据,为保证多级频率控制系统稳定,多级控制参数安全域需满足:

$$\begin{cases} T_{in} - K_\omega K_{P1} T_w - K'_{P2} T_w > 0 \\ K_\omega K_{P1} - K_\omega K_{I1} T_w + T_{in} K_{I1} b_p + K_L + K'_{P2} (1 - T_w b_p K_{I1}) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,LCU 控制参数 K_{P2} 与 GOV 控制参数 K_{P1} 、 K_{I1} 的安全域是耦合的。

2.2 LCU 对控制参数安全域的影响

进一步地,为直观地分析 LCU 对控制参数安全域的影响,比较考虑 LCU 与否情况下控制参数安全域的变化。

仅考虑水电机组 GOV 控制的系统频率控制模型为

$$\Phi'_{GOV} = (s + K_{I1} b_p) / (A_2 s^2 + B_2 s + C_2) \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_2 = A_1 + K'_{P2} T_w \\ B_2 = B_1 - K'_{P2} (1 - T_w b_p K_{I1}) \\ C_2 = C_1 - K'_{P2} b_p K_{I1} \end{cases}$$

其中

根据劳斯判据,为保证仅考虑 GOV 的频率控制系统稳定,GOV 控制参数安全域需满足:

$$\begin{cases} T_{in} - K_\omega K_{P1} T_w > 0 \\ K_\omega K_{P1} - K_\omega K_{I1} T_w + T_{in} K_{I1} b_p + K_L > 0 \end{cases} \quad (9)$$

比较式(7)和式(9)可知,当计及 LCU 对调频系统稳定性的影响时,原先单独考虑 GOV 控制所设计的参数需相应调整,否则极易引发振荡。

3 多级频率控制参数优化

基于西北电网某水电机组参数($K_\omega = 1.4$, $e_p = 1$, $b_p = 2.9\%$, $T_{R1} = T_{R2} = 0.1 \text{ s}$, $T_a = 0.2 \text{ s}$, $T_w = 1.6 \text{ s}$)和典型系统参数($T_{in} = 8 \text{ s}$, $K_L = 5\%$),采用 PSO 算法,以综合偏差绝对值与时间积分的乘积(integral of time-weighted-

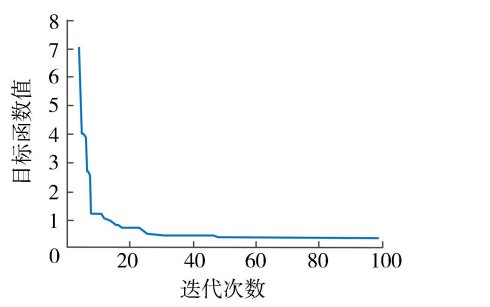


图 3 优化过程的收敛曲线

表 1 基于 PSO 算法的优化结果

Table 1 Optimization results by PSO algorithm

项目	K_{P1}	K_{I1}	K_{P2}
平均值	0.670	0.080	0.719
最优值	0.696	0.083	1.190

Fig. 3 Convergence curve of optimization process

4 仿真验证

为验证 LCU 对控制安全域影响理论分析的有效性,基于西北电网某水电机组运行中 GOV 控制参数 ($K_{P1}=2.5, K_{I1}=0.1$),改变 LCU 控制参数来满足多级控制参数安全域,在 PSCAD/EMTDC 平台上比较参数取值不同时的系统阶跃响应。选取安全域外参数 $K_{P2}=2.0$,当 $|\Delta P_d|=0.1$ p.u. 时,系统阶跃响应如图 4 所示。由图 4 可知:取安全域外控制参数时,系统频率偏差(图 4(a))和水轮机机械功率偏差(图 4(b))均出现振荡,振荡频率约为 0.11 Hz,考虑水电高占比系统超低频振荡范围为 0.04 ~ 2.50 Hz^[21],故此时系统发生了超低频振荡。选取安全域内参数 $K_{P2}=0.3$,系统阶跃响应如图 5 所示。由图 5 可知:取安全域内控制参数时,系统频率偏差(图 5(a))和水轮机机械功率偏差(图 5(b))都没有发生超低频振荡,但响应特性有待进一步提高。

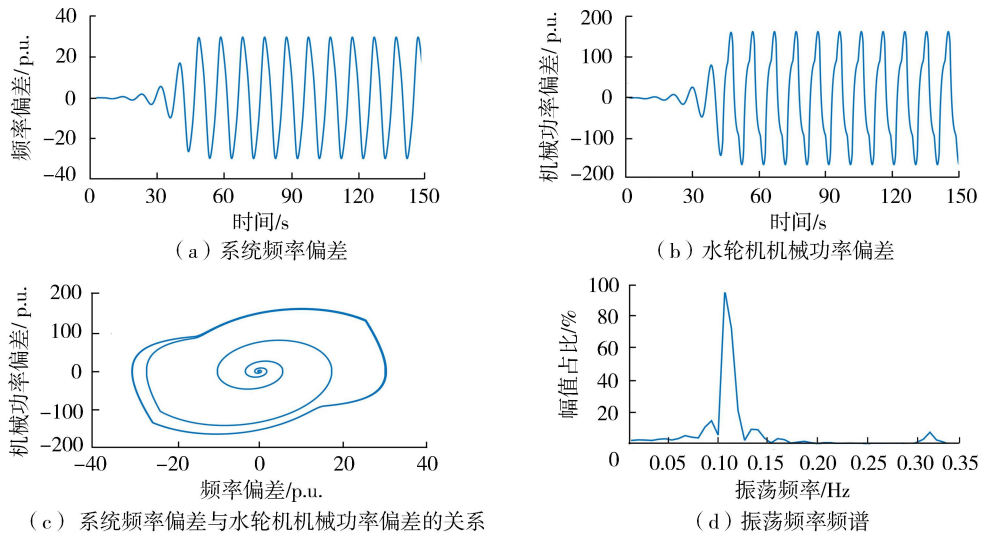


图 4 取安全域外控制参数时阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response results when taking parameters outside the security zone

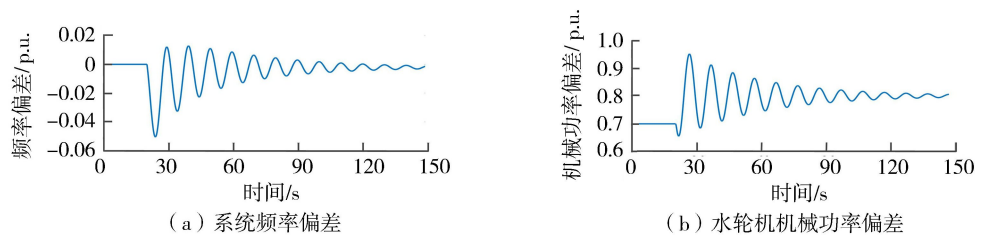


图 5 取安全域内控制参数时阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response results when taking parameters inside the security zone

为进一步提高系统响应特性,验证多级控制参数优化方法的有效性,以安全域内未经优化的控制参数 ($K_{P1}=2.5, K_{I1}=0.1, K_{P2}=0.3$)作为优化前取值,PSO 算法优化结果($K_{P1}=0.696, K_{I1}=0.083, K_{P2}=1.190$)

作为优化后取值,比较参数优化前后不同取值时系统阶跃响应,结果如图 6 所示。由图 6 可知:当采用优化后的多级控制参数取值时,系统阶跃响应的超调量、调节时间有明显提高。

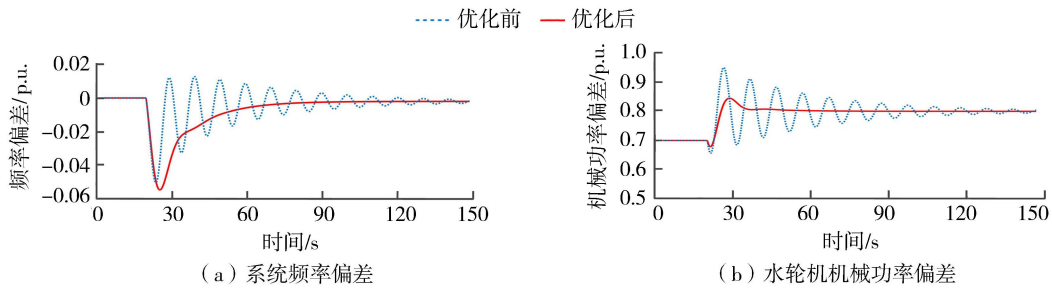


图 6 控制参数优化前后阶跃响应比较

Fig. 6 Comparison of step response results under pre-optimization and post-optimization parameters

5 结 论

- a. 在忽略调节死区、测量延时、调节限幅的非线性环节条件下,建立了一种小扰动下水电承担一次调频时系统多级频率控制模型。
- b. 通过推导控制参数安全域并分析 LCU 对稳定性的影响,从理论上说明了 GOV 和 LCU 控制参数安全域是耦合的,需协调 GOV 与 LCU 控制参数才能有效抑制超低频振荡。
- c. 提出的多级控制参数优化方法能有效改善系统阶跃响应特性(包括超调量和调节时间)。

参考文献:

[1] 王蕊,王丽萍,姜生斌,等. 西北电网水电参与市场化运营若干问题的研究[J]. 水力发电,2007,33(5):7-9. (WANG Rui, WANG Liping,JIANG Shengbin,et al. Study on some issues concerning involvement of hydroelectricity in electricity market in Northwest electric network[J]. Water Power,2007,33(5):7-9. (in Chinese))

[2] 孙骁强,程松,刘鑫,等. 西北送端大电网频率特性试验方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(2):148-153. (SUN Xiaoqiang, CHENG Song,LIU Xin,et al. Test method for frequency characteristics of Northwest sending-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(2):148-153. (in Chinese))

[3] RIMOROV D,KAMWA I,JOÓ S G. Quasi-steady-state approach for analysis of frequency oscillations and damping controller design[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(4):3212-3220.

[4] MO Weike, CHEN Yiping, CHEN Haoyong, et al. Analysis and measures of ultralow-frequency oscillations in a large-scale hydropower transmission system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2018,6(3):1077-1085.

[5] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):64-70. (LU Xiaomin, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(16):64-70. (in Chinese))

[6] YANG Weijia,NORRLUND P,BLADH J,et al. Hydraulic damping mechanism of low frequency oscillations in power systems: quantitative analysis using a nonlinear model of hydropower plants[J]. Applied Energy,2018,212:1138-1152.

[7] 郭相阳,徐政,董恒锋,等. 水电机组引起的超低频振荡机理分析[J]. 广东电力,2018,31(4):21-26. (GUO Xiangyang,XU Zheng,DONG Huanfeng, et al. Analysis on ultra-low frequency oscillation mechanism caused by hydroelectric units[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(4):21-26. (in Chinese))

[8] CHEN Lei,LU Xiaomin,MIN Yong, et al. Optimization of governor parameters to prevent frequency oscillations in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(4):4466-4474.

[9] 刘少博,王德林,马宁宁,等. 水电机组引起的超低频振荡特性及抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5354-5362. (LIU Shaobo,WANG Delin,MA Ningning,et al. Study on characteristics and suppressing countermeasures of ultra-low frequency oscillation caused by hydropower units[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(18):5354-5362. (in Chinese))

[10] 肖灿,王德林,李振鹏,等. 抑制电力系统超低频振荡的水轮机调速器参数优化控制研究[J]. 电网技术,2020,44(6):2135-2142. (XIAO Can,WANG Delin,LI Zhenpeng,et al. Research on parameter optimization control of turbine governor for suppressing ultra-low frequency oscillation in power systems[J]. Power System Technology,2020,44(6):2135-2142. (in Chinese))

Chinese))

- [11] CHEN Gang, TANG Fan, SHI Huabo, et al. Optimization strategy of hydrogovernors for eliminating ultralow-frequency oscillations in hydrodominant power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1086-1094.
- [12] 李莹, 王官宏, 艾东平, 等. 考虑 LCU 的水电机组有功联合控制对频率稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 167-177. (LI Ying, WANG Guanhong, AI Dongping, et al. Influence of combined active power control of hydro turbine on frequency stability consider the effect of LCU[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(Sup1): 167-177. (in Chinese))
- [13] 杨荣照, 陈亦平, 夏成军, 等. 高比例水电系统 AGC 稳定性分析及控制策略优化[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 880-886. (YANG Rongzhao, CHEN Yiping, XIA Chengjun, et al. Stability analysis and control strategy optimization of AGC with high-proportion hydropower system[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 880-886. (in Chinese))
- [14] 张少东, 谢爽, 张莹. 基于模糊自适应 PID 的水电站 LCU 功率调节研究[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(1): 38-42. (ZHANG Shaodong, XIE Shuang, ZHANG Ying. Power adjustment of LCU for hydropower station based on the fuzzy adaptive PID[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(1): 38-42. (in Chinese))
- [15] 李继安, 席光庆, 李阳阳, 等. 锦屏一级水电站机组并网实验过程中有功波动分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 46-54. (LI Ji'an, XI Guangqing, LI Yangyang, et al. Active power fluctuations of generating units in grid connection experiment at Jinping-I Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 46-54. (in Chinese))
- [16] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [17] PAN Wenxia, ZHU Zhu, LIU Tongchui, et al. Optimal control for speed governing system of on-grid adjustable-speed pumped storage unit aimed at transient performance improvement[J]. IEEE Access, 2021, 9: 40445-40457.
- [18] 魏守平, 伍永刚, 林静怀. 水轮机调速器与电网负荷频率控制(一): 水轮机控制系统的建模及仿真[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(6): 18-22. (WEI Shouping, WU Yonggang, LIN Jinghuai. Hydro-turbine governor and grid load frequency control part one modeling and simulation of hydro-turbine governor control system[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(6): 18-22. (in Chinese))
- [19] 孔爱良, 梁硕, 李春来, 等. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 550-555. (KONG Ailiang, LIANG Shuo, LI Chunlai, et al. Optimizing micro-grid operation based on improved PSO[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 550-555. (in Chinese))
- [20] SHI Yibo. Optimization of PID parameters of hydroelectric generator based on adaptive inertia weight PSO[C]//Proceedings of the IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. New York: IEEE, 2019.
- [21] 史华勃, 陈刚, 丁理杰, 等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器 PID 参数优化[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 221-226. (SHI Huabo, CHEN Gang, DING Lijie, et al. PID parameter optimization of hydro turbine governor considering the primary frequency regulation performance and ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 221-226. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-07-08 编辑: 熊水斌)