

基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究

卢旭东¹, 何璇¹, 汤雨¹, 陈金保², 肖志怀²

(1. 国网四川省电力公司映秀湾水力发电总厂, 四川 成都 611830;

2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:随着以化石燃料为基础的传统能源技术, 逐渐被如风能、光伏发电、绿色氢电解和潮汐能等清洁能源技术所取代, 且电力系统互联规模不断增大, 调度运行方式与控制日趋复杂。在此背景下, 开展担任调峰调频任务的水电机组的试验研究对提高电力系统稳定性、抗扰动能力等具有重要意义; 然而, 由于成本和风险巨大, 试验类型受到极大限制。为此, 构建包括真实部件和虚拟部件的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台, 并通过自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷和故障模拟等试验验证了基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究的合理性。研究表明, 构建的虚实结合型仿真平台可有效模拟水电机组过渡过程, 以低成本、低风险实现了水电机组调节系统的常规试验与故障模拟试验。

关键词:电力系统; 水电机组; 虚实结合型仿真平台; 试验研究

中图分类号: TM 6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0098-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240515

Experimental Study on Hydropower Units Based on Virtual and Real Integrated Simulation Platform

LU Xudong¹, HE Xuan¹, TANG Yu¹, CHEN Jinbao², XIAO Zhihui²

(1. State Grid Yinxiuwan Hydroelectric Power Plant, Chengdu 611830, Sichuan, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: With traditional energy technologies based on fossil fuels gradually being replaced by clean energy technologies such as wind energy, photovoltaic power generation, green hydrogen electrolysis and tidal energy, and the scale of power system interconnection continues to increase, the scheduling and operation methods and controls are becoming increasingly complex. In this context, conducting the experimental research on hydropower units which undertake the peak shaving and frequency regulation tasks is of great significance for improving the stability and disturbance resistance of power system. However, due to the huge cost and risk, the types of experiments are greatly limited. To this end, a virtual and real integrated simulation platform for hydro-turbine regulation system is constructed, which includes both real and virtual components. The rationality of experimental research on hydro-turbine units based on the virtual and real integrated simulation platform is verified through experiments such as automatic start-up, no-load disturbance, continuous load increase, load rejection and fault simulation. The research results show that the constructed virtual and real integrated simulation platform can effectively simulate the transition process of hydropower units, and achieve routine testing and fault simulation testing of regulation system of hydropower units at low cost and risk.

Key words: power system; hydropower units; virtual and real integrated simulation platform; experimental study

0 引言

水电作为一种可再生、清洁的能源形式在电力

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521901230001)

系统中扮演着重要角色^[1-2]。然而, 随着电力系统规模的不断扩大和运行方式的日益复杂化, 对水电机组的稳定性和可靠性提出了更高的要求^[3-5]。构建水轮机调节系统仿真平台对研究和改进水电机组的调节系统显得尤为重要^[6-7]。

目前的水轮机调节系统试验研究包括虚实结合型、全实物型和全仿真型。1)在虚实结合型水轮机调节系统试验研究方面:文献[8]结合真实部件(调速器电气柜和液压执行机构)、物理模型(油压装置、模拟接力器)和数学模型(以传递系数表示的线性水轮机模型、一阶发电机模型、单机无穷大电力系统、孤立电网),开展了机组开机、空载扰动、一次调频、甩负荷、孤网调节等模拟试验,实现了对水轮机调速系统性能和功能的测试;文献[9]搭建半实物仿真平台,验证了水轮机调速器侧配置附加阻尼控制装置的实际控制效果,其中实物部分包括水轮机调速器电气柜、机械液压装置、油压装置和导叶接力器,虚拟部分包括水轮机及引水系统模型(理想水轮机与刚性水击联合模型)、发电机-电网-负荷模型(一阶模型);文献[10]搭建包含真实调速器、随动系统仿真仪和机组仿真仪的轴流式水轮机调节系统半实物仿真平台,并通过真机对比试验,验证了所搭建仿真平台的精准性和优越性。由于在无真实机组或不具备开机条件时可模拟机组动态特性,即可对水轮机调速器进行多种试验,甚至实现故障反演,该类型仿真平台具有较大的实际应用和推广价值。2)在全实物型水轮机调节系统试验研究方面:文献[11]开展了大藤峡水力发电厂 8 号机组调速器参数整定试验;文献[12]开展了华安水电厂 2 号机组调速器微机调节器参数整定试验;文献[13]开展了潘家口电厂 2 号机组静特性试验、空载试验和甩负荷试验。由于需考虑设备承受能力,该类型试验可开展的种类较少,且试验过程中参数设置较为保守。3)在全仿真型水轮机调节系统试验研究方面:

文献[14]开展了调节系统死区对一次调频动态性能的影响分析;文献[15]基于 Simulink 仿真提出了水轮机调节系统稳定性量化分析方法;文献[16]基于 Simulink 仿真提出了水轮机调节系统广义预测控制应用方法。由于试验成本较低,且可开展的试验类型较多,该类型试验受到广泛采用。总之,传统的全实物型试验研究面临成本高昂、风险大的挑战,限制了其广泛应用和深入研究^[17-19],而全仿真型试验对水电机组物理特性考虑不足。因此,基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究成为一种确保水电机组安全、高效运行的重要保障。

下面通过结合真实部件和虚拟部件,以低成本、低风险构建了包含真实调速器、虚拟随动系统、虚拟电网和虚拟水轮机等部件的虚实结合型水电机组仿真平台,并开展了自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷和故障模拟等水电机组调节系统的试验研究。

1 虚实结合型水轮机调节系统仿真平台

所构建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台包含真实控制器(调速器电气部分)、随动系统仿真仪和水轮发电机组仿真仪,如图 1 所示。其中:真实控制器来自中国西南部的 XLD 水电站右岸机组;水轮发电机组和随动系统仿真仪自主开发,仿真计算模型均采用非线性模型;水轮发电机组中水轮机模型基于 BP 神经网络^[11]构建。为便于开展仿真试验,电网频率由机组仿真仪给定。

1.1 控制器

XLD 水电站的调速器采用“基于可编程序控制

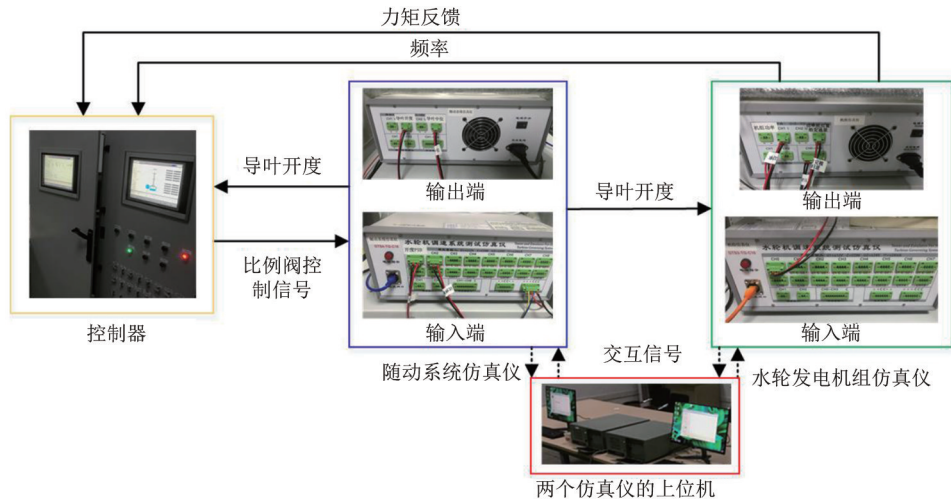


图 1 虚实结合的水轮机调节系统仿真平台

器软件实现的控制器+电液随动系统”的结构,即:由微机产生所需的控制规律,而液压放大部分自行闭环,形成一个相对独立的电液随动系统^[20]。控制器采用并联结构,可运行在转速、开度或功率模式。为避免发生超低频振荡,左岸机组一般采用开度控制模式。但考虑负荷外送通道网架结构,右岸机组一般采用转速控制模式(frequency control mode, FCM)或功率控制模式(power control mode, PCM),且每种模式下带负荷运行时均采用固定比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制方式(仅一组参数)。FCM 或 PCM 下 PID 控制器如图 2 所示,其线性部分传递函数如式(1)所示^[21],其中: y_c 、 y 分别为导叶开度变化量的参考值和导叶开度的偏差相对值; f_c 、 f 分别为频率变化量的参考值和频率的偏差相对值; p_c 、 p_t 分别为功率变化量的参考值和功率的偏差相对值; b_p 、 e_p 分别为永态转差系数和调差率; u 为控制器输出; e 为转速跟踪误差; K_p 、 K_I 和 K_D 分别为比例、积分和微分增益; T_{lv} 为微分环节时间常数。

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

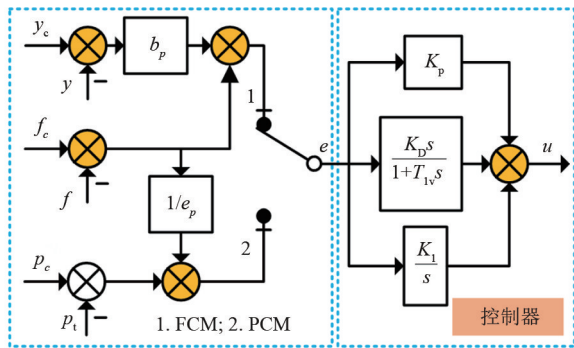


图 2 XLD 水电站 PID 控制器

1.2 随动系统仿真仪

电液随动系统包含延时、饱和、限速、死区等非线性环节,结构如图 3 所示;其线性部分传递函数如式(2)所示^[22-23],其中: K_y 为综合放大器系数; T_{y1} 和 T_y 分别为中间接力器和主接力器反应时间常数; t_0 为导叶全开时间; t_{c1} 、 t_{c2} 、 t_{c3} 为导叶三段关闭时间; Y_0 为初始导叶开度; Y_{c1} 和 Y_{c2} 为导叶开度分段关闭拐点。

$$G_s(s) = \frac{y}{u} = \frac{K_y}{T_{y1}T_y s^2 + T_y s + 1} \quad (2)$$

由于研究数据来自混流式水电站,因此这里不

考虑随动系统仿真仪的轮叶随动系统部分。

1.3 水轮发电机组仿真仪

在组成成分上,水轮发电机组仿真仪包含基于神经网络的非线性水轮机模型、引水系统模型和发电机模型^[16]。其中,非线性水轮机模型包含水轮机力矩特性神经网络(torque characteristic neural network, TCNN)和流量特性神经网络(discharge characteristic neural network, DCNN),如图 4 所示。在上位机仿真软件内,水轮机模型包含 TCNN 和 DCNN 的权值与阈值信息、工作水头、额定出力、机组惯性时间常数 T_a 、额定转速、发电机负载自调节系数 e_g 、额定流量、转轮直径、水流惯性时间常数 T_w 、最小导叶全程时间、引水管道长度、水击波速、采样频率等数据。为便于计算,引水系统和发电机采用刚性水击模型^[24]和经典的一阶模型^[15]描述,分别如式(3)和式(4)所示。

$$G_h(s) = -T_w s \quad (3)$$

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (4)$$

2 仿真试验验证

配置仿真仪上位机与下位机通信协议后,通过在仿真仪上位机软件界面实时修改机组各类参数,可在搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台上开展多种试验,甚至实现故障反演。在试验过程中,由调速器控制柜发出机组开机、停机以及负荷调整指令,并将相应控制信号传递至 PLC 模块。PLC 模块根据接收到的指令,产生对应的开关和比例阀控制信号,并输出至随动系统仿真仪。随动系统仿真仪计算各随动环节输出,包括比例阀和导叶开度,并将信号输出至调速器和水轮发电机组仿真仪。水轮发电机组仿真仪计算机组频率和功率,并将信号输出至调速器。

结合 XLD 电站实际运行数据,在 PCM 下验证仿真平台精度。以 TCNN 输出与运行数据对比为例,验证结果如图 5 所示,可以看出:TCNN 误差较小,能以较高精度在大波动或小波动过程中表示水轮机力矩特性,即所搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台可靠性较高。

为充分验证所搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台可靠性,开展自动开机、空载扰动、增负荷、甩负荷、故障反演等试验。

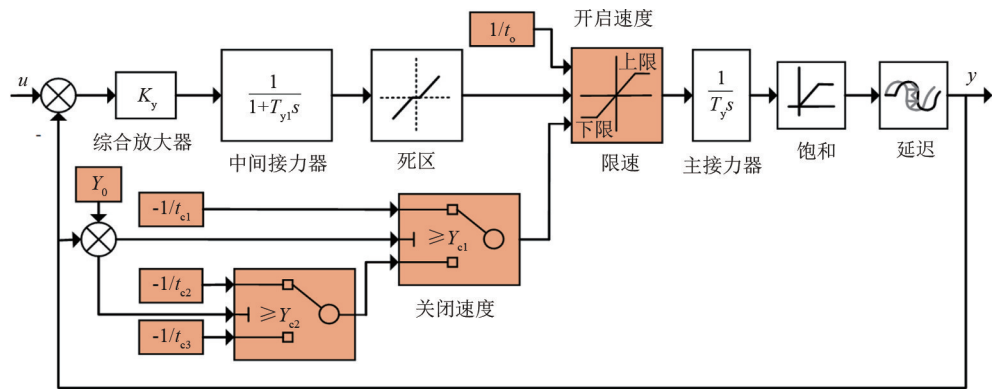


图 3 XLD 水电站随动系统

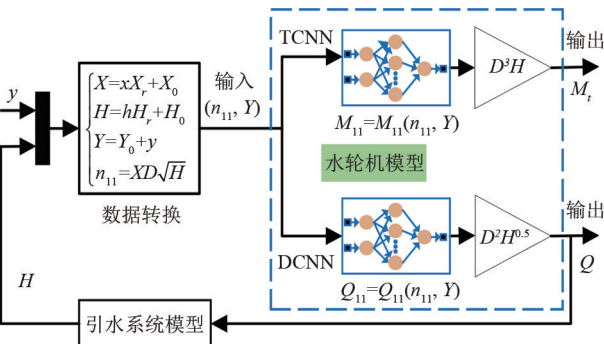


图 4 基于神经网络的非线性水轮机模型

示。需要注意:一旦按下“启动仿真”按钮,则调速系统处于闭环状态,这时可通过各波形的实测值数据框判断系统是否正常工作;出于仿真算法收敛性考虑,在所有情况下,仿真的机组频率输出下限为 2 Hz,因此在开机过程中的仿真频率仅包含 2 Hz 以上部分。

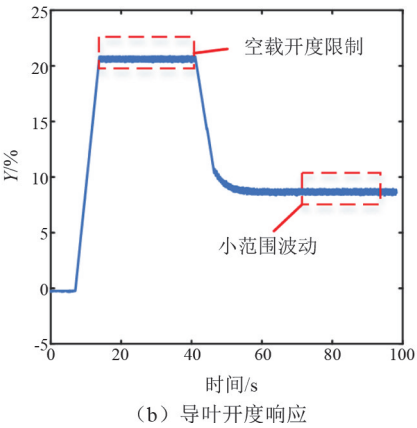
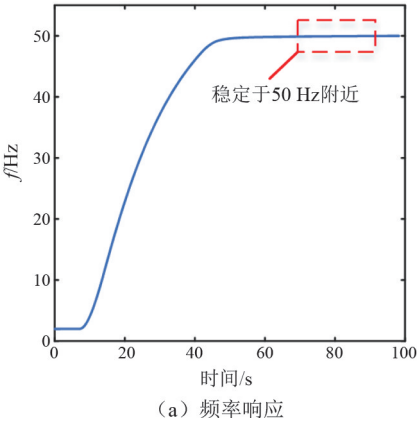


图 6 开机过程仿真结果

根据图 6 可以看出:开机指令发出后,调速系统仿真频率增加,最终稳定在 50 Hz 附近;仿真导叶开度 Y 先增加到空载开度限制值,然后降至空载开度;导叶开度在稳态时具有小幅度波动,这与随动系统参数选取有关。构建非线性水轮机调节系统模型

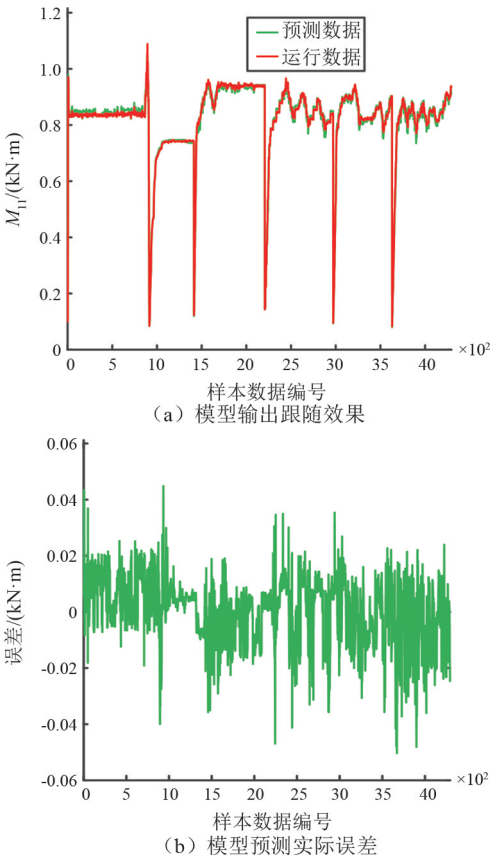


图 5 TCNN 建模效果

2.1 自动开机试验

自动开机试验的开机过程仿真波形如图 6 所

后,可采用智能优化算法辨识出更合适的随动系统结构参数。

2.2 空载扰动试验

实时仿真情况下的空载扰动波形如图 7 所示。根据图 7 可见在空载扰动过程中,频率和导叶开度变化符合机组运行规律。

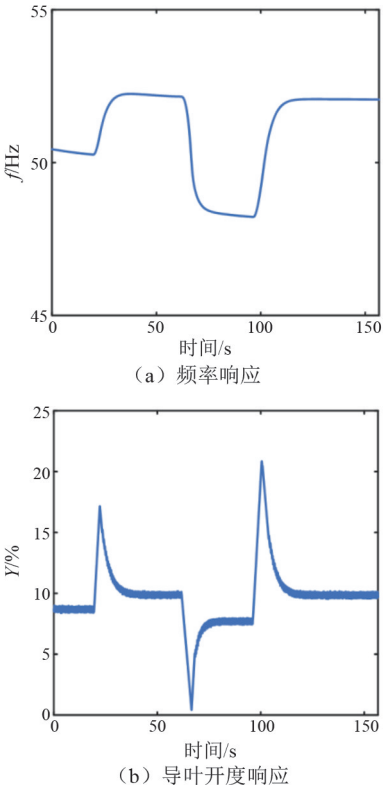


图 7 空载扰动过程仿真结果

2.3 机组连续增负荷试验

机组连续增负荷试验仿真波形如图 8 所示,可见在连续增负荷过程中,机组频率不变,机组功率随着导叶开度增大而增大,符合水轮机运行规律。

2.4 甩负荷试验

甩负荷波形如图 9 所示,可见在甩负荷时,仿真机组频率大幅度增加,然后趋向空载开度;仿真机组功率瞬间变为 0,这是由于并网断路器断开所致;导叶开度按分段关闭规律关闭,然后增加并稳定于空载开度。

2.5 故障反演试验

基于所建仿真平台,开展机组测频断线故障、主配跟随故障这两种典型故障模拟。

1) 机组测频断线故障

获取方式为:在调速系统正常带负荷运行情况下,人工拔除机组仿真仪频率输出端子。在发生故障时,调速器触摸屏界面会出现相应的报错信息:

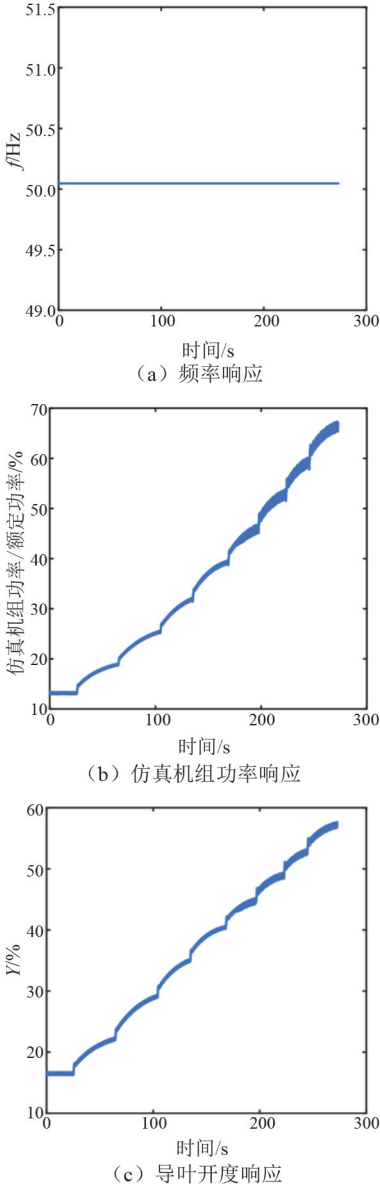


图 8 功率模式连续增负荷过程仿真结果

调速器事故、机组频率故障、残压机频断线、齿盘探头 1 断线、齿盘探头 2 断线、网频断线、残压机频跳变、水头信号断线。将测频断线故障模拟结果导入 Matlab 软件,生成仿真波形如图 10 所示。由图 10 可知:发生机组测频断线故障时,机组报错但不停机;频率不变,导叶开度和仿真机组功率维持小幅度波动状态,与实际运行情况相符。

2) 主配跟随故障

获取方式为:在调速系统正常运行情况下人工拔除随动系统仿真仪导叶中位反馈端子(随动系统至控制器的导叶开度信号)。在发生故障时,调速器触摸屏界面会出现相应的报错信息:调速器事故、主配传感器断线、网频断线、水头信号断线。发生主配跟随故障时,机组由功率模式切换至空载运行模

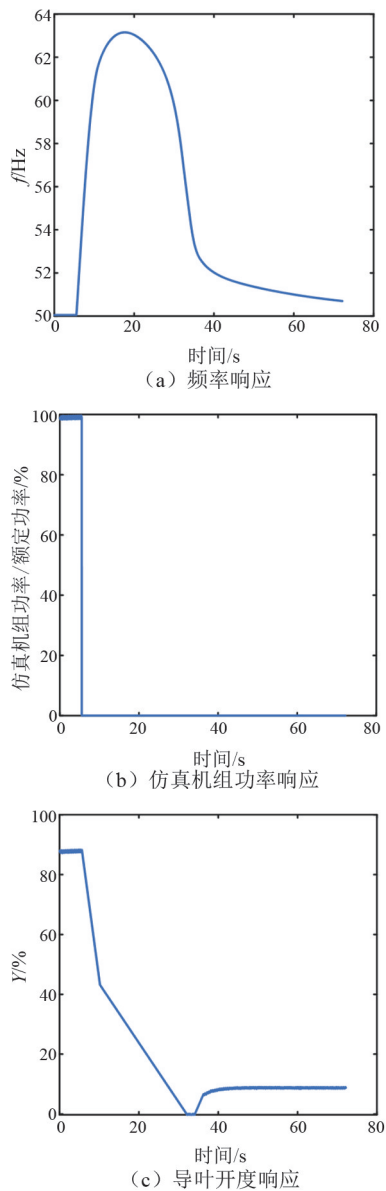


图 9 功率模式甩负荷过程仿真结果

式。将仿真结果导入 Matlab 软件,生成波形如图 11 所示。由图 11 可知:发生主配跟随故障时,调速系统缺失一个反馈,导叶开度迅速上升至限制值;机组转为空载运行状态,仿真机组功率变为 0,仿真机组频率迅速上升。

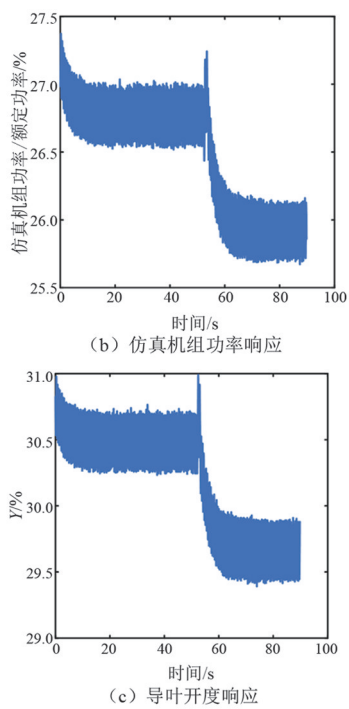
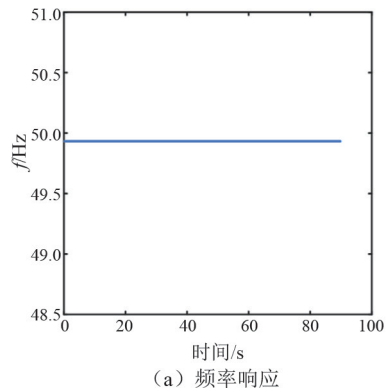


图 10 测频断线故障模拟结果

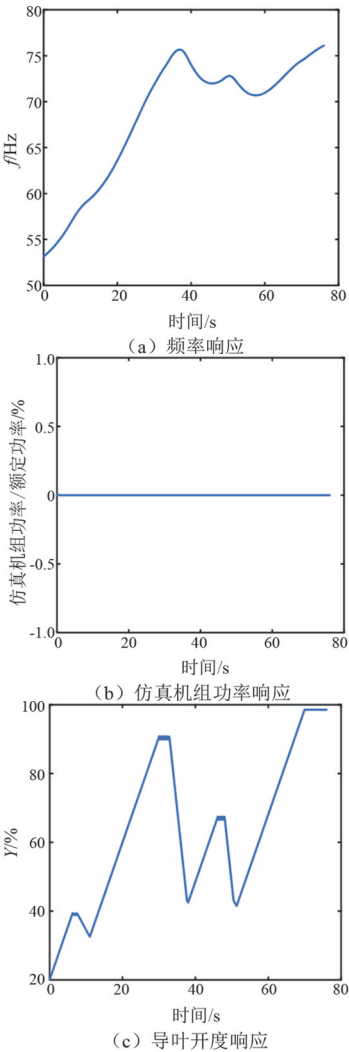


图 11 主配跟随故障模拟结果

3 结 论

基于所构建的包括真实调节器、虚拟水电机组和虚拟随动系统的水轮机调节系统仿真平台,开展了自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷、故障反演等试验,一方面验证了仿真平台的准确性和可靠性,为水电机组调节系统的运行和管理提供更可靠的支持;另一方面为水电站控制器参数调整、结构改良提供有力技术支持。由于所搭建的仿真平台采用一阶发电机模型,考虑高阶发电机特性的水轮机调节系统仿真平台有待进一步研究开发。

参考文献

- [1] 范成围. 水火机组调速器死区对超低频振荡的影响分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(4): 5-8.
- [2] JI G G, ZHANG L D, SHAN M Y, et al. Enhanced variable universe fuzzy PID control of the active suspension based on expansion factor parameters adaption and genetic algorithm[J]. Engineering Research Express, 2023, 5(3): 035007.
- [3] 凌楠, 曾昊, 格桑晋美, 等. 藏中联网后西藏电网安全稳定特性及控制策略分析[J]. 四川电力技术, 2021, 44(3): 23-28.
- [4] LI P F, LI Y. Research on the electro-hydraulic servo system of picking manipulator[J]. AIP Advances, 2023, 13: 015312.
- [5] LIU M J, CHENG L W, XU J Z, et al. An improved particle swarm fuzzy PID for adaptive control of temperature in CFRP induction heating[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2023, 238(4): 500-513.
- [6] AGHASEYEDABDOLLAH M, ABEDI M, POURGHOLI M. Supervisory adaptive fuzzy sliding mode control with optimal Jaya based fuzzy PID sliding surface for a planer cable robot[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2022, 26(17): 8441-8458.
- [7] ALI N, AYZAZ Y, IQBAL J. Collaborative position control of pantograph robot using particle swarm optimization[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2022, 20: 198-207.
- [8] 蔡卫江, 陈逸鸣, 初云鹏. 大型国外水电站水轮机调速器仿真试验研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(5): 51-56.
- [9] 张建新, 施鑫磊, 陈刚, 等. 水电机组调速器附加阻尼控制仿真试验[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 24-28.
- [10] 王安林, 丘涛基, 陈齐灯, 等. 基于虚实结合的水轮机调节系统仿真平台[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 198-202.
- [11] 程俊才, 朱涛, 郝慧贤, 等. 大藤峡水力发电厂 8 号机组调速器特性试验[J]. 水电站机电技术, 2021, 44(7): 9-11.
- [12] 陈继勇, 陈世群. 华安水电厂 2 号微机调速器安装与调整试验[J]. 福建水力发电, 2019(2): 39-42.
- [13] 马玉杰. 潘家口电厂 2 号机组调速器试验浅析[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(10): 6-9.
- [14] 魏加达, 赵训新, 莫凡, 等. 调节系统死区对一次调频动态性能的影响分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 190-194.
- [15] 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.
- [16] 陈金保, 刘少华, 陈上, 等. 孤网模式下水轮机调速系统广义预测控制应用方法[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 619-630.
- [17] MORTEZA G S, FATEMEH K, HASAN M. Lyapunov-based adaptive PID controller design for buck converter[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies, and Applications, 2023, 27(9): 5741-5750.
- [18] HUANG M Q, TIAN M, LIU Y, et al. Parameter optimization of PID controller for water and fertilizer control system based on partial attraction adaptive firefly algorithm[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 12182.
- [19] ITABORAHY FILHO M A, PUCHTA E, MARTINS M S R, et al. Bio-inspired optimization algorithms applied to the GAPID control of a buck converter[J]. Energies, 2022, 15(18): 6788.
- [20] 陈金保, 张智, 郑阳, 等. 孤网模式下水电机组智能鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 111-120.
- [21] CHEN J B, LIU S H, WANG Y H, et al. Generalized predictive control application scheme for nonlinear hydro-turbine regulation system: Based on a precise novel control structure[J]. Energy, 2024, 296: 130916.
- [22] LI H H, CHEN D Y, ZHANG H, et al. Nonlinear modeling and dynamic analysis of a hydro-turbine governing system in the process of sudden load increase transient[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80: 414-428.

[23] GUO W C, YANG J D, WANG M J, et al. Nonlinear modeling and stability analysis of hydro-turbine governing system with sloping ceiling tailrace tunnel under load disturbance [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106:127–138.

[24] CHEN J B, ZHENG Y, LIU D, et al. Quantitative stability analysis of complex nonlinear hydraulic turbine regulation system based on accurate calculation [J]. Applied Energy, 2023, 351:121853.

(上接第 85 页)

[3] 刘泽洪.±1100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7782–7792.

[4] 谷琛,李鹏,何慧雯,等.±1100 kV 以上电压等级直流输电技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6745–6754.

[5] 刘泽洪,郭贤珊,乐波,等.±1100 kV/12000 MW 特高压直流输电工程成套设计研究[J].电网技术,2018,42(4):1023–1031.

[6] YING X,ZHANG X P,YANG C H.Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(3):1448–1458.

[7] SHAO Y,TANG Y.Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J].IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(1):646–653.

[8] 黄梦华,傅闯,汪娟娟,等.单相接地时高压直流换相电压相位偏移量特性[J].电力系统自动化,2020,44(12):162–168.

[9] 阮思烨,徐凯,刘丹,等.直流输电系统换相失败统计分析分析及抵御措施建议[J].电力系统自动化,2019,43(18):13–17.

[10] 周博昊,李凤婷,尹纯亚,等.基于直流电流有限时域预测算法的换相失败预防策略[J].电力系统自动化,2020,44(6):178–185.

[11] 周博昊,李凤婷,宋新甫,等.基于直流电流变化量的换相失败预测判别与控制系统优化[J].电网技术,2019,43(10):3497–3504.

[12] 张彦涛,邱丽萍,施浩波,等.考虑不对称故障影响的多馈入直流系统换相失败快速判别方法[J].中国电机工程学报,2018,38(16):4759–4767.

[13] 王璐,李凤婷,尹纯亚,等.考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):17–23.

[14] 王峰,刘天琪,由新红,等.基于暂态直流电流预测的

作者简介:

卢旭东(1976),男,硕士,高级工程师,从事水电运检管理;

何璇(1992),女,工程师,从事计算机、网络安全、信息运维管理;

汤雨(1992),男,工程师,从事水电机组检修管理;

陈金保(1992),男,博士,从事水电机组优化控制方面研究;

肖志怀(1968),男,教授,博士生导师,从事水电机组优化控制方面研究。(收稿日期:2024-04-19)

换相失败临界电压瞬时值判据[J].高电压技术,2021,47(1):129–137.

[15] 马星,李凤婷,尹纯亚.整流侧换流母线电压恢复对逆变器换相的影响[J].电网技术,2020,44(8):2950–2960.

[16] 尹纯亚,李凤婷,宋新甫,等.多馈出直流系统换相失败快速判别方法[J].电网技术,2019,43(10):3459–3465.

[17] MIRSAEIDI S,DONG X Z,TZELEPIS D,et al.A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(1):160–172.

[18] XIAO H,LI Y H,LAN T K,et al.Sending end AC faults can cause commutation failure in LCC-HVDC inverters[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(5):2554–2557.

[19] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等.抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J].电网技术,2019,43(10):3514–3522.

[20] LIU L,LIN S,SUN P Y,et al.A calculation method of pseudo extinction angle for commutation failure mitigation in HVDC[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(2):777–779.

[21] 尹纯亚,李凤婷,陈伟伟,等.单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J].电力自动化设备,2019,39(11):114–119.

[22] 夏海涛,周小平,洪乐荣,等.一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(15):4345–4355.

[23] 马星,李凤婷,尹纯亚,等.整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败的机理分析[J].电力工程技术,2021,40(4):83–88.

作者简介:

马星(1996),男,硕士,工程师,从事电力系统规划、多能源系统、电力系统运行、电网安全分析等工作;

尹纯亚(1994),男,博士,副教授,研究方向为交直流系统稳定与控制。(收稿日期:2023-11-29)