

文章编号:1007-2284(2021)05-0214-05

“以阀代井”水电站调速系统参数整定分析

欧前^{1,2},余波^{1,2},苏婷^{1,2},赵俊杰^{1,2}

(1. 西华大学流体机械及工程四川省重点实验室,成都 610039; 2. 西华大学能源与动力工程学院,成都 610039)

摘要:对于采用“以阀代井”的水电站,其小波动过渡过程动态特性是影响水电机组安全稳定运行的关键问题之一。针对国外某工程实际,利用matlab/simulink建立了水轮机调节系统数学模型。针对部分典型工况,分别以加速度时间常数 T_n 、缓冲时间常数 T_d 和暂态转差系数 b_t 作为参变量,用根轨迹分析方法研究其动态特性,得到调速系统较优参数整定值,达到了改善小波动过渡过程动态品质的目的。

关键词:水轮机调节系统;调压阀;水力过渡过程;根轨迹法

中图分类号:TV734 **文献标识码:**A

欧前,余波,苏婷,等.“以阀代井”水电站调速系统参数整定分析[J].中国农村水利水电,2021(5):214-218.

OU Q, YU B, SU T, et al. An analysis of parameter tuning of speed control system of hydropower station with “valves replacing wells”[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5):214-218.

An Analysis of Parameter Tuning of Speed Control System of Hydropower Station with “Valves Replacing Wells”

OU Qian^{1,2}, YU Bo^{1,2}, SU Ting^{1,2}, ZHAO Jun-jie^{1,2}

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Fluid Machinery and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan Province, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan Province, China)

Abstract: For hydropower stations that use “valves replacing wells”, the dynamic characteristics of the small fluctuations transition process are one of the key issues affecting the safe and stable operation of hydropower units. According to the actual situation of a foreign project, the author uses matlab/simulink to establish a mathematical model of the hydraulic turbine regulating system. For some typical working conditions, the acceleration time constant T_n , the buffer time constant T_d and the transient slip coefficient b_t are respectively used as parameter variables, and the root locus analysis method is used to study its dynamic characteristics, the optimal parameter setting values of the speed control system are obtained. The dynamic quality of small fluctuations has been improved.

Key words: turbine regulating system; pressure regulating valve; hydraulic transition; root locus method

0 引言

对于引水系统较长的水电站,由于水流惯性时间常数较大,机组在大波动水力过渡过程中,转速最大上升值不超标的情况下,压力管道内往往会产生较高的压力上升,从而危及电

站运行安全。针对这一问题,工程上常用的措施为设置调压井,而一些中小型电站在满足安全运行的条件下也选择安装调压阀,即用调压阀代替调压井,简称“以阀代井”。安装调压阀对生态环境影响较小,且所用投资是设置调压井投资的1/10~1/20,但它不能有效减小水流惯性时间常数,因此存在小波动过渡过程动态品质差的问题^[1-3]。由此寻找到适应安装调压阀电站的调速器参数,对节省电站基建投资、保证水轮机调节系统的稳定运行及调节品质具有重要意义。

关于水轮机调速器系统的参数优化整定的研究国内外有许多,通常用的方法为:遗传算法寻优、粒子群算法寻优、及它们的改进算法寻优^[4-8]等。遗传算法和粒子群算法及它们的改

收稿日期:2020-08-10

作者简介:欧前(1993-),男,硕士研究生,研究水轮机小波动过渡过程方向。E-mail:809122214@qq.com。

通讯作者:余波(1965-),男,教授,硕士生导师,主要从事水利水电工程及自动化、计算机监控和仿真系统等领域的教学、研究工作。E-mail:cgyubo@163.com。

进型的寻优方式类似,都是保留较好参数,在此基础上再不断迭代以寻求最优参数。为达到寻优的目的,它们需要构建较为复杂的目标函数,过程相对复杂。

作者采用根轨迹法对水轮机调速系统参数进行寻优,既避免了构建复杂的目标函数,也可以较为清晰地呈现出系统的稳定性随参数的变化情况,并找到适合的参数,是一种较为便捷

的水轮机调速系统参数的寻优方法。

1 水轮机调节系统数学模型

水轮机调节系统主要由调速器和调节对象组成,根据文献[9],混流式机组在小波动情况下的水轮机调节系统的数学模型如图1所示。

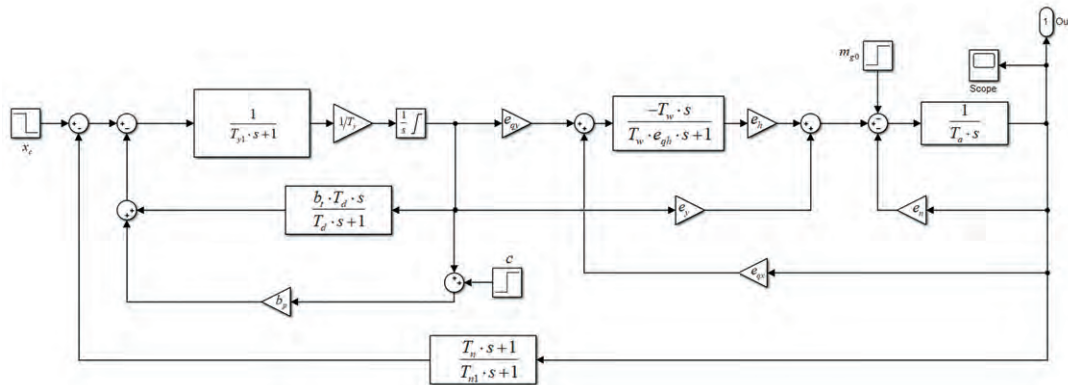


图1 水轮机调节系统数学模型

Fig.1 Mathematical model of hydraulic turbine governing system

图1中, T_n 、 T_d 和 b_t 分别代表加速度时间常数、缓冲时间常数和暂态转差系数; T_y 、 T_{y1} 分别为接力器时间常数、辅助接力器时间常数; T_{n1} 为时间常数; T_w 、 T_d 分别为引水系统水流惯性时间常数、机组惯性时间常数; b_p 为永态转差系数; e_n 为机组自整系数; e_y 、 e_x 、 e_h 、 e_{qy} 、 e_{qx} 和 e_{qh} 为水轮机传递系数。

为了应用根轨迹法分析系统动态特性,根据图1所示数学模型,经简化求得其特征方程,见式(1)。

$$(T_n s + 1)(T_d s + 1) \left[(e_{qh} e_y - e_{qy} e_h) T_w s + e_y \right] + (T_{n1} s + 1) \left[T_{y1} T_d T_y s^3 + (T_{y1} T_y + T_y T_d) s^2 + (T_y + b_t T_d + b_p T_d) s + b_p \right] \left[T_w e_{qh} T_a s^2 + (T_w e_{qh} e_n + T_w e_{qx} e_h + T_a) s + e_n \right] = 0 \quad (1)$$

对式(1)标准化得式(2):

$$A_1 s^6 + A_2 s^5 + A_3 s^4 + A_4 s^3 + A_5 s^2 + A_6 s + A_7 = 0 \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_1 &= T_a T_d T_{n1} T_w T_y T_{y1} e_{qh} \\ A_2 &= T_d T_y T_{y1} [T_{n1} (T_a + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + T_a T_w e_{qh}] + T_a T_{n1} T_w e_{qh} (T_d T_y + T_y T_{y1}) \\ A_3 &= [T_{n1} (T_a + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + T_a T_w e_{qh}] (T_d T_y + T_y T_{y1}) + T_d T_y T_{y1} (T_a + T_{n1} e_n + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + T_a T_{n1} T_w e_{qh} (T_y + T_d b_p + T_d b_t) \\ A_4 &= (T_{n1} (T_a + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + T_a T_w e_{qh}) (T_y + T_d b_p + T_d b_t) + (T_d T_y + T_y T_{y1}) (T_a + T_{n1} e_n + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) - T_d T_n (T_w e_h e_{qy} - T_w e_{qh} e_y) + T_d T_y T_{y1} e_n + T_a T_{n1} T_w b_p e_{qh} \\ A_5 &= (T_y + T_d b_p + T_d b_t) (T_a + T_{n1} e_n + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + e_n (T_d T_y + T_y T_{y1}) - (T_d + T_n) (T_w e_h e_{qy} - T_w e_{qh} e_y) + b_p [T_{n1} (T_a + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + T_a T_w e_{qh}] + T_d T_n e_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_6 &= b_p (T_a + T_{n1} e_n + T_w e_h e_{qx} + T_w e_{qh} e_n) + e_n (T_y + T_d b_p + T_d b_t) + e_y (T_d + T_n) - T_w e_h e_{qy} + T_w e_{qh} e_y \\ A_7 &= e_y + b_p e_n \end{aligned}$$

2 根轨迹分析法

根轨迹是指系统某一参数(常称为根轨迹增益)从零变化到无穷时,其闭环极点在s平面上的变化轨迹。根轨迹图不仅可以直接给出闭环系统时间响应的全部信息,而且可以指明开环零、极点应该怎样变化才能满足给定的闭环系统的性能指标要求。对于高阶系统,在工程上通常用主导极点的概念对高阶系统进行近似分析^[10,11]。

针对式(2)这样的特征式,其可调参数为 T_n 、 T_d 和 b_t ,它们均难以被分离变换为根轨迹增益的形式。因此,常规根轨迹绘制法则对其并不适用。因此,在matlab软件中,运用root函数命令求取特征根^[12]。

3 根轨迹分析及仿真验证

基于上述根轨迹理论,对水轮机调速系统的 T_n 、 T_d 和 b_t 进行整定,并通过Simulink仿真手段予以验证,使系统的动态性能满足要求,保证电站安全生产运行。

3.1 工程概况

电站机组额定水头32m,额定转速333.3r/min,额定流量14.43m³/s,水轮机额定出力4.217MW,模型机额定效率93.2%,转轮公称直径1.44m,机组惯性时间常数为5.0539s,接力器时间常数0.2s,水流惯性时间常数20.46s。

为分析水轮机调节系统动态特性,确定选取小负荷和大负荷两个典型工况,相关参数见表1。首先使用斯坦因和克里夫琴柯推荐公式导出推荐值,作为 T_n 、 T_d 和 b_t 的初值,再采用根轨迹法逐一优化。

表1 典型工况及水轮机传递系数

Tab.1 Typical working conditions and transmission coefficient of water turbine

工况	单位转速 n_{11}	单位流量 Q_{11}	e_y	e_{qy}	e_x	e_{qx}	e_h	e_{qh}
小负荷	84.84	0.647	1.555 3	1.119 2	0.088 4	-0.172 4	0.385 7	0.350 1
大负荷	84.84	1.189	0.766 7	0.774 1	-0.899 1	0.103 5	1.415 0	0.431 1

3.2 小负荷工况根轨迹分析及验证

在 MATLAB/Simulink 环境下,建立图1所示仿真模型,设定系统频率给定信号 x_c 为 0.1, 负载扰动 m_{g0} 和开度给定 c 都为 0, 水轮发电机组综合自调节系数 e_n 取 0, 分别按斯坦因和克里夫琴柯推荐值(即 $T_n = 10.23\text{ s}$ 、 $T_d = 61.38\text{ s}$ 、 $b_t = 6.07$ 和 $T_n = 20.46\text{ s}$ 、 $T_d = 30.69\text{ s}$ 、 $b_t = 8.1$), 进行仿真计算, 结果如图2所示。在两者超调量相差不大的情况下, 斯坦因推荐值上升时间和调节时间更短, 系统的动态响应更优, 因此初值确定为: $T_n = 10.23\text{ s}$ 、 $T_d = 61.38\text{ s}$ 、 $b_t = 6.07$ 。

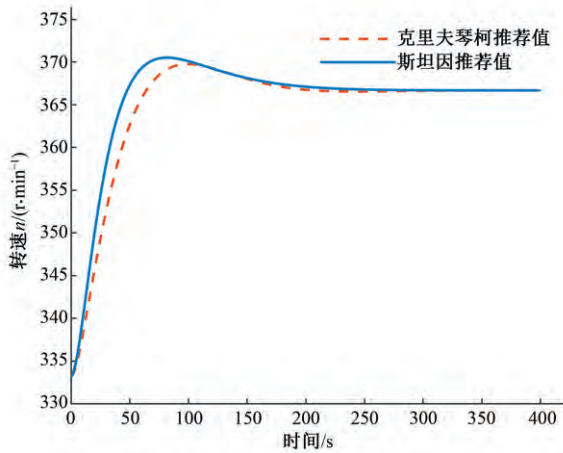


图2 估算初值仿真响应曲线(小负荷)

Fig.2 Estimated initial value simulation response curve (Light load)

利用前述基于 matlab 求取特征根方法, 分别分析 T_n 、 T_d 和 b_t 变化时的根轨迹, 其结果如图 3~5 所示。图 3 为 $T_d = 61.38\text{ s}$ 、 $b_t = 6.07$ 时, 系统随 T_n 变化的根轨迹图; 当 T_n 为 7.67 s 时, 其闭环主导极点为一对共轭复数极点, 其幅角为 $\pm 30^\circ$, 另有一对靠近原点的偶极子。图 4 为 $T_n = 7.67\text{ s}$ 、 $b_t = 6.07$ 时, 随 T_d 变化的

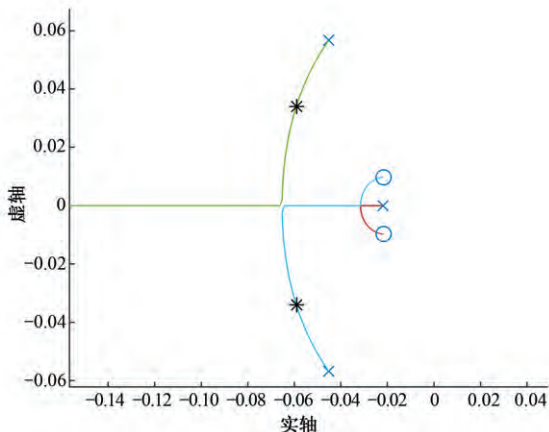


图3 随 T_n 变化根轨迹图(小负荷)

Fig.3 The root locus graph varies with T_n (Light load)

根轨迹图; 当 T_d 为 16.3 s 时, 其闭环主导极点为一对共轭复数极点, 其幅角为 $\pm 60^\circ$ 。图 5 为 $T_n = 7.67\text{ s}$ 、 $T_d = 16.3\text{ s}$ 时, 随 b_t 变化的根轨迹图; 当 b_t 为 0.8 时, 其闭环主导极点为一对共轭复数极点, 其幅角为 $\pm 20^\circ$, 同时, 在原点附近存在一对偶极子。通过在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间寻求参数, 得出 $T_n = 7.67\text{ s}$ 、 $T_d = 16.3\text{ s}$ 和 $b_t = 0.8$ 。

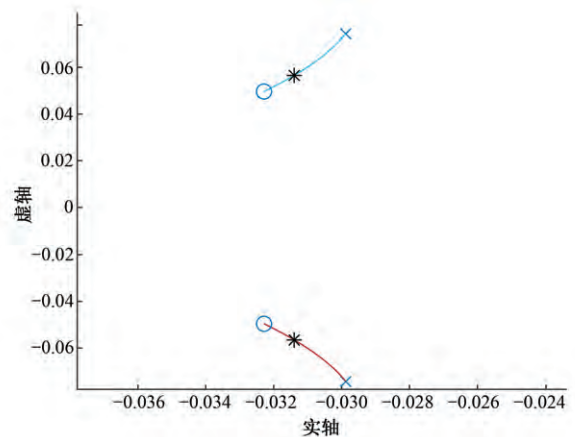


图4 随 T_d 变化根轨迹图(小负荷)

Fig.4 The root locus graph varies with T_d (Light load)

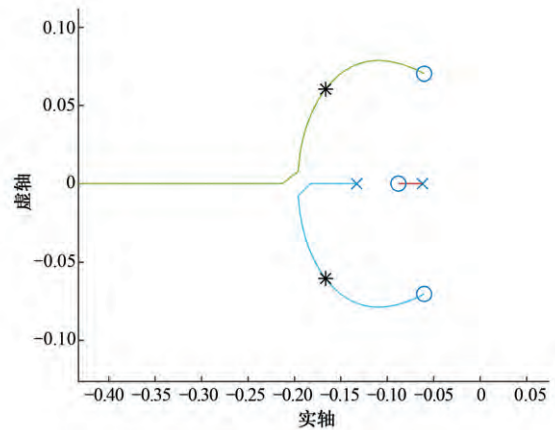


图5 随 b_t 变化根轨迹(小负荷)

Fig.5 The root locus graph varies with b_t (Light load)

根据上述所得参数整定值重新进行仿真计算与原仿真结果比较, 结果如图 6 所示。由图 6 可见, 系统的超调量为 0.17%, 调节时间为 13.29 s。比较整定前系统的响应性能, 超调量减少 82%, 调节时间减少 57%, 该系统动态性能得到明显改善。

3.3 大负荷工况根轨迹分析及验证

对于大负荷工况, 由表 1 可知, 传递系数 e_x 接近于 -1, 同时根据文献[9], 发电机负载自调节系数 e_g 一般为 1, 综合考虑以上因素确定水轮发电机组综合自调节系数 e_n 取为 2。在 Simulink 环境下, 运用图 1 所示仿真模型, 设定系统频率给定信号 x_c 为 -0.1, 负载扰动 m_{g0} 和开度给定 c 都为 0, 分别按斯坦因和

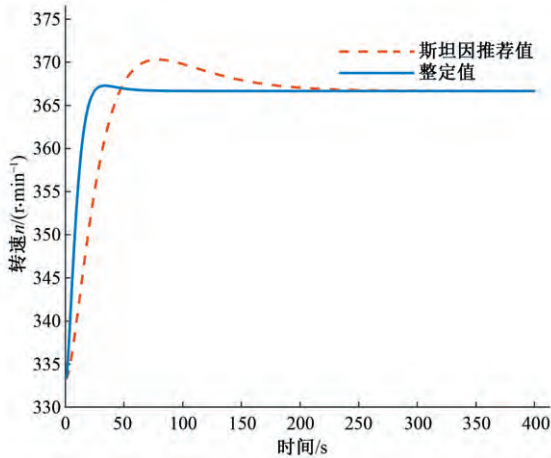


图6 优化前后系统仿真响应曲线(小负荷)
Fig.6 System simulation response curve before and after optimization (Light load)

克里夫琴柯推荐值,进行仿真计算,仿真响应结果如图7所示。由图7可知,其动态过程为非周期衰减过程,其调节时间非常大,因此两组推荐值不作为整定初值,而按文献[13]的建议值作为整定初值,即 $T_d = 30$ s和 $b_l = 3$ 。

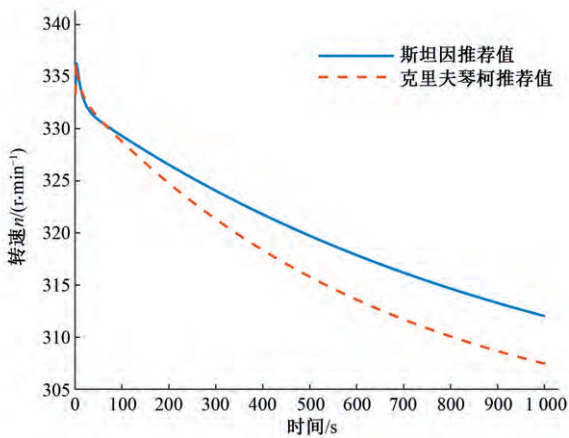


图7 估算初值仿真响应曲线(大负荷)
Fig.7 Estimated initial value simulation response curve (Heavy load)

同理利用matlab求取特征根方法,分别分析 T_n 、 T_d 和 b_l 变化时的根轨迹,其结果如图8~10所示。图8为 $T_d = 30$ s、 $b_l = 3$

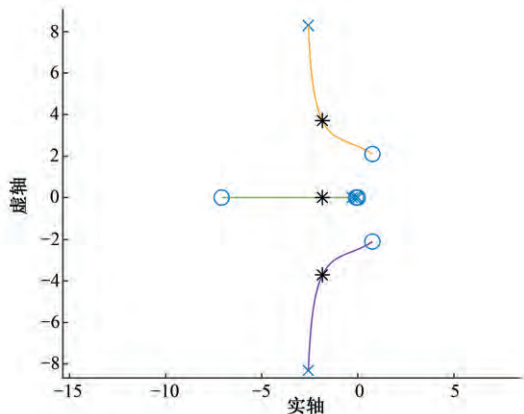


图8 随 T_n 变化根轨迹图(大负荷)
Fig.8 The root locus graph varies with T_n (Heavy load)

时,系统随 T_n 变化的根轨迹图;当 $T_n = 6.43$ s时,其闭环主导极点为一个实数极点和一对共轭复数极点,其幅角为 $\pm 60^\circ$ 。图9为 $T_n = 6.43$ s、 $b_l = 3$ 时,随 T_d 变化的根轨迹图;由图可知此时系统处于条件稳定,当 $T_d = 5.6$ s时,其闭环主导极点一对共轭复数极点,其幅角为 $\pm 20^\circ$ 。图10为 $T_n = 6.43$ s、 $T_d = 5.6$ s时,随 b_l 变化的根轨迹图,图10(a)为全局图,图10(b)为图10(a)中虚线框内局部放大图;同样可看出此时系统处于条件稳定,当 $b_l = 2.76$ 时,其闭环主导极点为一对共轭复数极点,其幅角为 $\pm 20^\circ$ 。通过在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间寻求参数,得出 $T_n = 6.43$ s、 $T_d = 5.6$ s和

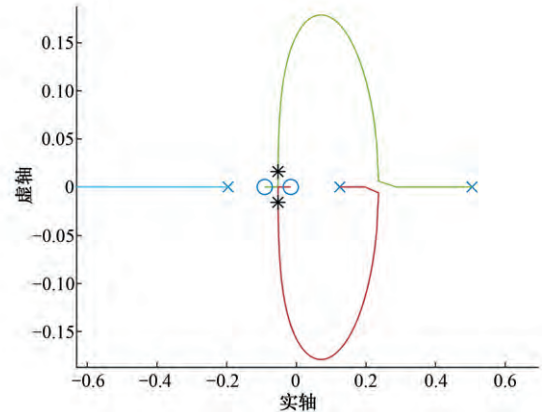


图9 随 T_d 变化根轨迹图(大负荷)
Fig.9 The root locus graph varies with T_d (Heavy load)

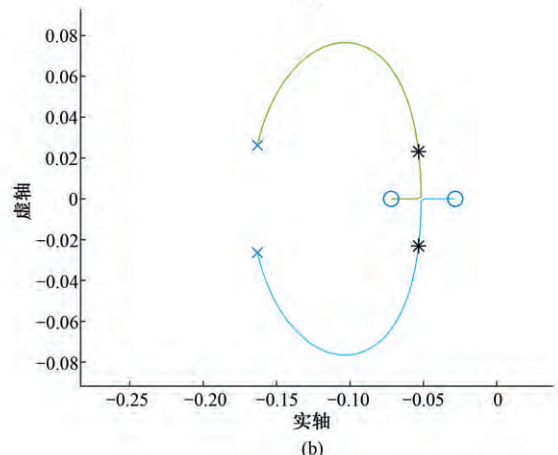
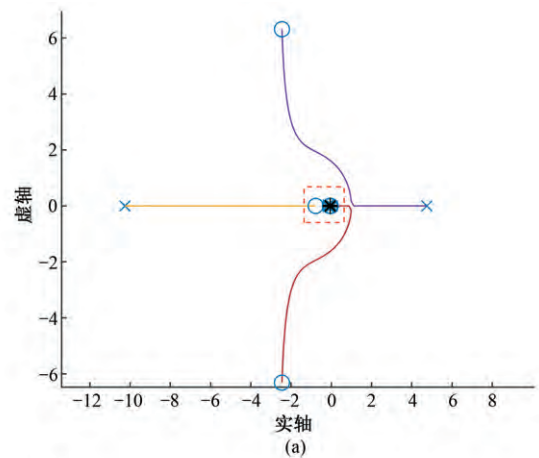


图10 随 b_l 变化根轨迹(大负荷)
Fig.10 The root locus graph varies with b_l (Heavy load)

$b_i = 2.76$ 。

在 MATLAB/Simulink 环境下, 将整定值进行仿真计算, 得到以下结果, 如图 11 所示。在该整定参数下, 水轮机调节系统响应的超调量为 0%, 调节时间为 59.3 s, 该系统的响应性能具有较好的动态特性。

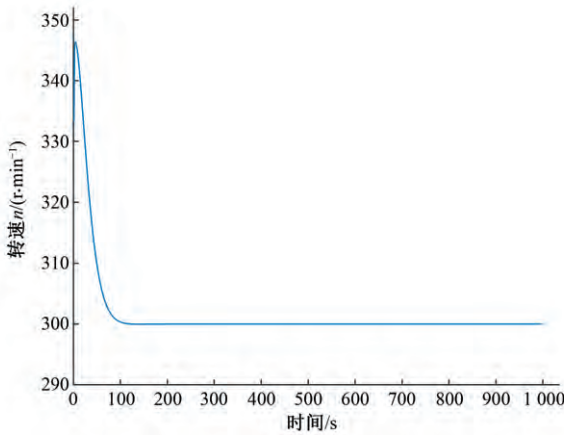


图 11 优化后系统仿真响应曲线(大负荷)

Fig.11 System simulation response curve after optimization (Heavy load)

4 结论

安装调压阀的电站, 水轮机组在小波动过渡过程中, 调压阀关闭, 未能起到调压作用, 其调节系统动态品质无法保证。基于整定适当参数的思想, 使机组在小波动过渡过程中保持良好的稳定性, 通过根轨迹法对水轮机调速系统进行参数整定得到以下结论。

(1) 根轨迹图能够表示出系统的稳定性随参数的变化情况, 根据主导极点原则在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间能够找到使系统具有较好动态特性的参数;

(2) 根轨迹法也可对多参数组合寻优, 为获得更精确的参数组合需反复迭代几次;

(3) 对“以闸代井”的水轮机调速系统参数整定提供参考。

□

参考文献:

- [1] 蔡永芳. 调压阀在长距离引水发电系统中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(10): 165-167, 174.
- [2] 李江, 崔炜, 孔昭年, 等. KYET 水电站调压方式设计优化及关键技术[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 110-113, 117.
- [3] 肖微, 杨鹏隆. 水轮机调压阀在中小型水电站的应用[J]. 北京农业, 2014(33): 233-234.
- [4] 张海丽, 张宏立. 基于量子遗传算法的水轮机调速器 PID 参数优化[J]. 人民长江, 2013, 44(19): 44-46, 68.
- [5] 杜阳维. 基于改进粒子群算法的水轮机调速器参数整定[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2016.
- [6] 汪醒鹏, 范哲. 基于改进 PSO 算法的水轮机 PID 调速器的参数设计[J]. 湖南水利水电, 2015(2): 78-81, 91.
- [7] FANG H Q, CHEN L, SHEN Z Y. Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor[J]. Energy Conversion and Management, 2011(4): 1 763-1 770.
- [8] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Frequency stabilization of renewable power systems based on MPC with application to the egyptian grid[J]. IFAC Papers On Line, 2018(28): 280-285.
- [9] 程远楚. 水轮机自动调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] 刘欣, 聂岭, 杨素君. 基于根轨迹的混合励磁超环面电机控制器设计[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(4): 72-75.
- [11] 闫箫同, 杨晓梅, 雒瑞森, 等. 根轨迹族的绘制方法以及应用[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(6): 59-63, 91.
- [12] 刘东生, 余波, 崔军玲, 等. 一种水轮机调节系统根轨迹绘制方法研究[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 72-75.
- [13] 孔昭年, 田忠禄, 王思文, 等. 阿勒泰水电站“以闸代井”研究[J]. 水电站机电技术, 2016, 39(1): 1-4, 74, 79.

(上接第 213 页)

参考文献:

- [1] 苏寅生. 南方电网近年来的功率振荡事件分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 54-57.
- [2] 邓伟, 王德林, 魏蒙希, 等. 水轮机调速器参数对电力系统超低频振荡的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1 371-1 377.
- [3] 唐戢群, 刘昌玉, 何雪松, 等. 水电机组孤网运行频率振荡及其抑制研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 131-134.
- [4] DANDENO P L, KUNDUR P, BAYNE J P. Hydraulic unit dynamic

performance under normal and islanding conditions analysis and validation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(6): 2 134-2 143.

- [5] 岳雷, 薛安成, 李志强, 等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 227-23, 337.
- [6] 郭欣然, 程远楚, 王颢, 等. P 水电站一管三机机组功率波动的分析与消除[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 152-154.
- [7] 温爱存, 金建华. 水力学[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2016: 185-192.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告