

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220590

基于多目标粒子群算法的水电机组 一次调频性能分析及参数优化

颜宁俊

(大唐水电科学技术研究院, 广西 南宁 530000)

摘要: 针对目前南方电网区域内存在水电机组在某些工况下出现一次调频实际负荷调整量达不到理论值而造成一次调频被考核的情形, 先对某机组原始运行数据进行处理, 通过计算一次调频实际负荷调整量和实际调差率, 观察其是否达到理论值, 进而找出一一次调频过程合格的工况区域, 在一次调频过程合格的工况区域内选取特征工况点, 并采用基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法寻找最优的 PID 参数。仿真结果表明, 优化后的 PID 参数相较于调速器实设参数可使得机组具有更为优良的一次调频性能指标。

关键词: 水电机组; 一次调频; 性能分析; 参数优化; 多目标粒子群算法

中图分类号: TV734.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0201-04

1 引言

南方电网对水电机组一次调频进行考核时, 首先考察一次调频实际负荷调整量是否达到理论值, 若达到则为一次调频过程合格, 在此基础上还需考察一次调频响应过程的上升时间和调节时间是否不大于限定值。为通过调整调速器的一次调频 PID 控制参数达到优化上升时间和调节时间的目的, 本文先对南方电网区域内某机组原始运行数据进行处理, 筛选出并网以后的所有稳态工况点, 并依据一次调频实际负荷调整量是否达到理论值找出一一次调频过程合格的工况区域; 在此区域内, 以 PID 参数向量到性能指标向量的映射关系作为目标函数, 建立一次调频计算模型并选取一次调频初始工况点, 最后采用基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法寻找最优的 PID 参数。

2 原始运行数据处理

目前在南方电网区域内的水电机组大多在并网后采用调速器的开度模式调节, 即当有功给定值和反馈值出现偏差时, 监控系统下达负荷脉冲指令给调速器调节导叶开度, 而在监控系统中实现功率闭环。在开度模式条件下, 机组一次调频

动作时, 调速器根据频差大小计算导叶开度所需变化量, 并将导叶开度调节到给定值; 但在此过程中, 有可能出现负荷调整量不足以达到理论值的情况, 这在目前的南方电网考核机制中被判定为一次调频过程不合格。造成一次调频过程不合格的原因主要分两种: ①机组一次调频的开度变化量能达到理论值, 但由于机组出力的非线性特性, 负荷调整量不足以达到理论值; ②当机组处于接近于空载或满负荷的工况时, 为不出现逆功率或过负荷, 导叶开度不能低于空载开度或高于满负荷开度, 一次调频的开度变化量达不到理论值。因此, 为对某台机组的一次调频性能指标进行优化, 首先要找到该台机组一次调频过程合格的工况区域, 即对某台机组原始运行数据进行处理, 通过将全工况区域网格化, 对比各工况点下一次调频负荷调整量的实际值和理论值, 找出能使该机组一次调频过程合格的工况区域。

为描述机组并入无穷大电网后的出力特性, 选取某机组在 2020 年 11 月 1 日~2021 年 10 月 31 日的的机组频率 F 、导叶开度 Y 、工作水头 H 、机组功率 P 的运行曲线作为原始数据, 以 1 min 为时间间隔在运行曲线上取点, 并按以下条件进行筛选: ①机组频率处于 (50 ± 0.3) Hz 范围内; ②机组功率大于 10 MW; ③与前后两点的开度偏差绝对值均不超过 1%。筛选后获得工况点集合

收稿日期: 2022-03-27, 修回日期: 2022-09-14

作者简介: 颜宁俊 (1992-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水电机组原动机及其调节系统参数与建模, E-mail: 1204915515@qq.com

α ,即机组并入无穷大电网后的稳定运行工况点集合。由于集合 α 中的工况点所覆盖的工作水头范围为58.5~66.5 m。为计算不同水头下机组的实际调差率,现以1 m水头间隔对工作水头范围划分区间,每个水头区间的中点即为基准水头,在每个区间内部忽略水头变化对机组功率的影响。

对63 m基准水头下,其中所有工况点的导叶开度、机组功率分别可构成向量 \mathbf{Y} 、 \mathbf{P} ,将 \mathbf{Y} 、 \mathbf{P} 作为原始数据点,采用三次多项式函数进行插值拟合,得到拟合函数:

$$\mathbf{P} = \Psi(\mathbf{Y}) \quad (1)$$

式中, $\Psi(\cdot)$ 为三次多项式拟合函数。

设一次调频过程的初始工况点机组频率、导叶开度和机组功率分别为 F_0 、 Y_0 、 P_0 ,一次调频过程的稳态工况点机组频率、导叶开度和机组功率分别为 F_1 、 Y_1 、 P_1 ,一次调频的频率偏差 ΔF ,导叶开度动作量 ΔY 和一次调频实际负荷调整量 ΔP 计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta F = F_1 - F_0 = \pm 0.1, \pm 0.15, \pm 0.2 \text{ Hz}, F_0 = 50 \text{ Hz} \\ Y_0 = 20\%, 22.5\%, \dots, 87.5\%, 90\% \\ \Delta Y = Y_1 - Y_0 = -[(\Delta F - E_f)/(F_r B_p)] \times 100\% \\ \Delta P = P_1 - P_0 = \Psi(Y_1) - \Psi(Y_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_f 为人工频率死区; $E_f = \pm 0.05 \text{ Hz}$; F_r 为额定频率, $F_r = 50 \text{ Hz}$; B_p 为永态转差系数, $B_p = 4\%$; Y_0 为初始开度; ΔF 为频率偏差。

一次调频实际调差率 E_p 计算公式为:

$$E_p = -[(\Delta F - E_f)P_r / (\Delta P F_r)] \times 100\% \quad (3)$$

式中, P_r 为额定有功, $P_r = 302.5 \text{ MW}$ 。

根据南方电网的考核标准,理论调差率 $\widetilde{E}_p = 4\%$,对应的一次调频理论负荷调整量为 $\Delta \widetilde{P} = -|(\Delta F - E_f)P_r| / (\widetilde{E}_p F_r)$ 。在工况条件 Y_0 、 ΔF 相同的情况下,为使 $\Delta P \geq \Delta \widetilde{P}$,则必须满足 $E_p \leq \widetilde{E}_p$ 。计算各 Y_0 、 ΔF 组合下的 E_p ,其中部分工况条件的 E_p 见图1。

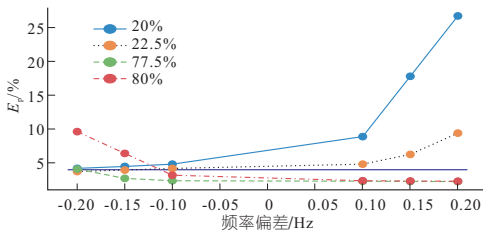


图1 63 m基准水头部分工况条件的 E_p

Fig. 1 E_p under partial working conditions at 63 m reference head

由图1可知,在63 m基准水头下, $Y_0 = 20\%$ 、 22.5% 、 77.5% 、 80% 时,均会出现 $E_p > \widetilde{E}_p$,即一次调频负荷调整量实际值达不到理论值的情况,而此时的空载开度 $Y_{ol} = 19.07\%$,满负荷开度 $Y_{ml} = 82.00\%$,可见该台机组一次调频过程不合格的原因主要是机组的初始工况接近于空载或满负荷,受到空载开度限制或满负荷开度限制的影响,一次调频的开度变化量达不到理论值。经计算,当 Y_0 处于 $30\% \sim 75\%$ 范围内时,一次调频开度变化量能够达到理论值,于是63 m基准水头下一次调频过程合格的工况区域开度下限 $Y_{low} = 30\%$,开度上限 $Y_{high} = 75\%$ 。用同样的方法计算其他基准水头下的 Y_{low} 、 Y_{high} ,汇总见表1。

表1 各基准水头下的 Y_{ol} 、 Y_{ml} 、 Y_{low} 、 Y_{high}

Tab. 1 Y_{ol} 、 Y_{ml} 、 Y_{low} and Y_{high} at each reference head

| | | | | | % | | | | |
|--------|----------|-----------|------------|----------|--------|----------|-----------|------------|----------|
| 基准水头/m | Y_{ol} | Y_{low} | Y_{high} | Y_{ml} | 基准水头/m | Y_{ol} | Y_{low} | Y_{high} | Y_{ml} |
| 59 | 21.10 | 40.0 | 82.5 | 92 | 63 | 19.07 | 30.0 | 75.0 | 82 |
| 60 | 20.59 | 35.0 | 80.0 | 90 | 64 | 18.56 | 27.5 | 75.0 | 81 |
| 61 | 20.08 | 32.5 | 80.0 | 87 | 65 | 18.05 | 27.5 | 72.5 | 79 |
| 62 | 19.58 | 32.5 | 77.5 | 84 | 66 | 17.54 | 27.5 | 72.5 | 78 |

当水头处于相邻的基准水头之间时,采用线性插值方式计算 Y_{ol} 、 Y_{ml} 、 Y_{low} 、 Y_{high} ,于是可绘制出全水头范围的空载开度线和满负荷开度线及一次调频过程合格的工况区域(用阴影表示),见图2。

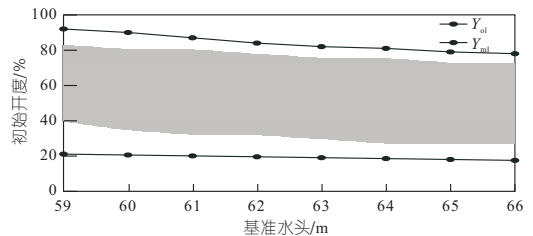


图2 空载开度线、满负荷开度线和一次调频过程合格的工况区域

Fig. 2 No load opening line, full load opening line and qualified working condition area during primary frequency modulation

3 一次调频参数优化

一次调频响应过程的上升时间是指机组一次调频开始到实际出力达理论负荷调整量90%的时间,而调节时间是指机组一次调频开始到实际出力达到稳定值的时间。根据定义,并结合实际工程经验,可知对同一个一次调频响应过程,由于受到工况条件和PID控制参数取值的影响,上升时间和调节时间之间的对应关系并未呈现出明显的规律性和普遍的适用性,在某些情况下甚至会

出现矛盾性,即一个性能指标的优化会引起另一个性能指标的劣化。针对多目标优化问题,采用多目标粒子群算法作为基本解决方案^[1,2]。由于优化目标之间并无偏重,采用基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法尝试对调速器实设参数进行优化。

3.1 目标函数选取

设上升时间为 $t_{0.9}$, 调节时间为 t_s , 见图 3^[3]。选定一次调频 PID 参数向量 $\mathbf{K} = [k_p, k_i, k_d]$ 作为决策变量,在适当的约束条件下进行仿真,得到机组功率仿真波形,再经过性能指标计算得到向量 $\mathbf{T} = [t_{0.9}, t_s]$, 选取向量 \mathbf{K} 到向量 \mathbf{T} 的映射关系 $\mathbf{T} = \Phi(\mathbf{K})$ 作为目标函数。

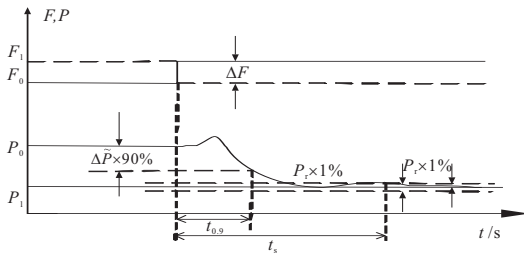


图 3 性能指标计算

Fig. 3 Performance index calculation

3.2 约束条件设置

通过建立一次调频计算模型和选取合适的一次调频初始工况点,可构成一次调频参数优化的约束条件。采用图 4 所示的一次调频计算模型,电子调节器部分采用并联 PID 结构^[4],调速器执行机构部分为一阶惯性模型,为模拟功率的动态过程,原动机部分包含三次多项式拟合模型及一阶模型。图 4 中各参数的取值或取值范围见表 2。

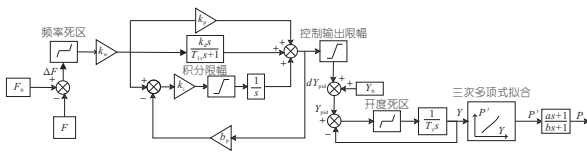


图 4 一次调频计算模型框图

Fig. 4 Block diagram of primary frequency modulation calculation model

表 2 一次调频计算模型参数表

Tab. 2 Parameter table of primary frequency modulation calculation model

| 参数 | 数值/ 取值范围 | 参数 | 数值/ 取值范围 |
|----------------------|-------------|----------------|-------------|
| 频率偏差放大倍数 k_w | 1 | 一阶模型系数 b | 1 |
| 永态转差系数 b_p | 0.04 | 比例环节放大倍数 k_p | [0, 10] |
| 微分环节时间常数 T_{1v}/s | 0 | 积分环节放大系数 k_i | [0, 10] |
| 接力器反应时间常数 T_{Yv}/s | 0.2 | 微分环节放大系数 k_d | [0, 5] |
| 一阶模型系数 a | 5 | | |

统计一次调频过程合格的工况区域的工况

点,可得机组频率、导叶开度和水头分布见图 5。

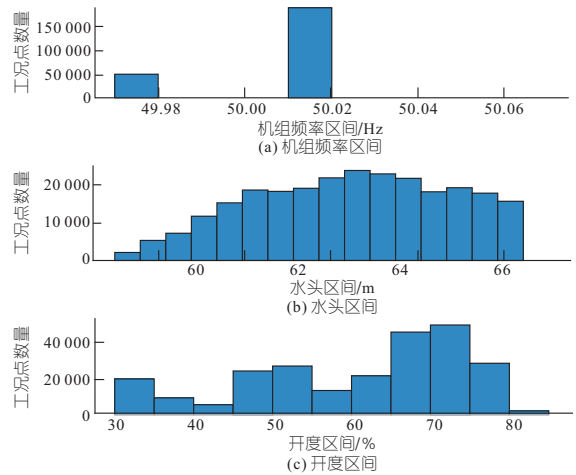


图 5 机组频率、导叶开度和水头分布

Fig. 5 Unit frequency, guide vane opening and head distribution

由图 5 可知,该机组一次调频过程合格的工况区域的工况点水头较为集中分布在 61~65 m 范围内,导叶开度较为集中分布在 60%~80% 范围内;从机组频率的区间分布可看出,机组频率超出 ±0.05 Hz 的频率死区的情况较少出现,频率偏差最大为 0.68 Hz。为了模拟实际一次调频过程中有代表性的情况,将 ($H = 63$ m、 $Y_0 = 70\%$ 、 $\Delta F = 0.1$ Hz) 作为一次调频初始工况点。

3.3 基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法

以目标函数和约束条件为基础,经计算可知调速器实设参数 $\mathbf{K}_0 = [8.00, 8.00, 0]$, 对应的性能指标为 $\mathbf{T}_0 = [4.91, 9.44]$ 。

图 6 为基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法的基本流程^[5]。

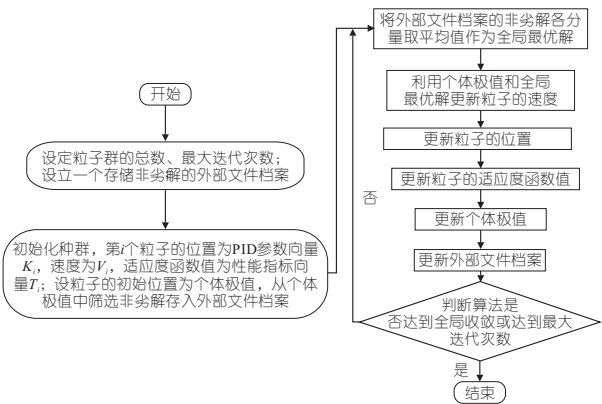


图 6 算法流程图

Fig. 6 Algorithm flow chart

从个体极值中筛选非劣解并存入外部文件档案的方法采用了 Pareto 支配的概念^[6]: 称向量 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ 支配向量 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_k)$, 记为 $\mathbf{u} \leq \mathbf{v}$, 当且仅当对于所有 $i \in \{1, 2, \dots, k\}$, $u_i \leq v_i$, 且存在 $j \in \{1, 2, \dots, k\}$, 使得 $u_j < v_j$ 。

外部文件档案中已有非劣解个数为 N_a , 待

判断是否存入外部文件档案的个体极值为 K_i , $T_i = \Phi(K_i)$, 更新外部文件档案规则为:

$$\begin{cases} \varphi \rightarrow \{K_i\} & N_a = 0 \\ \{K_n | n = 1, 2, \dots, N_a\} \rightarrow \{K_n, K_i\} & N_a < 5; T_i \leq T_n \\ \{K_n | n = 1, 2, \dots, N_a\} \rightarrow \{K_4, K_5, K_i\} & N_a = 5; T_i \leq T_n \end{cases}$$

设粒子群总数为 64, 最大迭代次数为 14, 则根据图 6 多目标粒子群算法得到的 PID 参数优化过程和对应的性能指标见图 7、8。

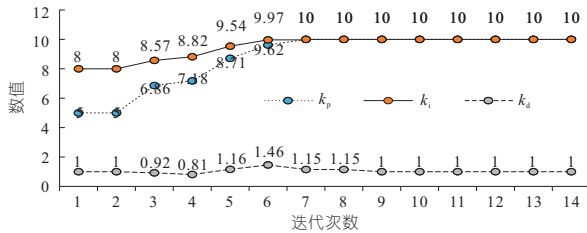


图 7 PID 参数优化过程

Fig. 7 PID parameter optimization process

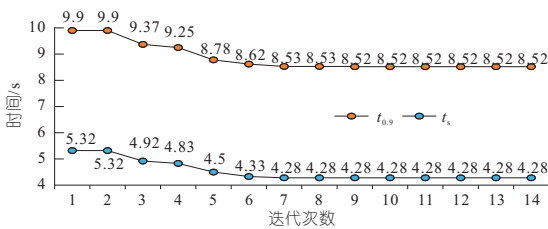


图 8 性能指标优化过程

Fig. 8 Performance index optimization process

由图 7、8 可知, 当寻优过程达到收敛后, PID 参数向量 $\mathbf{K}^* = [k_p, k_i, k_d] = [10.00, 10.00, 1.00]$, 其对应的性能指标为 $t_{0.9} = 4.28, t_s = 8.52$, 该性能指标优于调速器实设参数对应性能指标。

4 结论

a. 由于机组本身出力的非线性特性, 或是导叶受到空载开度限制或满负荷开度限制的影响, 机组在某些工况下会出现一次调频实际负荷调整

量达不到理论值的情况, 造成一次调频过程不合格。以南方电网区域内某机组的大量实际运行数据为基础, 通过将全工况区域网格化, 并计算各工况下一次调频实际负荷调整量和实际调差率, 观察其是否达到理论值, 进而找出能使一次调频过程合格的工况区域。当机组不处于一次调频过程合格的工况区域时, 可从理论上说明此种情形不适用于一次调频考核。

b. 当机组处于一次调频过程合格的工况区域时, 以 PID 参数向量到性能指标向量的映射关系作为目标函数, 建立一次调频计算模型并选取有代表性的工况点作为一次调频初始工况点, 并采用基于 Pareto 优化准则的多目标粒子群算法进行一次调频参数寻优。结果表明, 该算法对性能指标的优化过程相对均衡且具有较快的收敛速度, 但优化后的 PID 参数仅适用于一次调频的调节过程, 未对开度模式或功率模式下的负荷调整过程进行仿真验证其适用性, 因此需在现场进行试验验证后方可采用该组优化后的 PID 参数。

参考文献:

- [1] 张丽平. 粒子群优化算法的理论及实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [2] 王峰, 张衡, 韩孟臣, 等. 基于协同进化的混合变量多目标粒子群优化算法求解无人机协同多任务分配问题[J]. 计算机学报, 2021, 44(10): 1968-1983.
- [3] 国家能源局. 水轮机液调节系统及装置调整试验导则: DLT496-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4] 王春. 水电机组一次调频理论积分电量计算方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 186-189.
- [5] 王宇嘉. 多目标粒子群优化算法的全局搜索策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [6] DAS I. A Preference ordering among various pareto optimal alternatives [J]. Structural optimization, 1999, 18(1): 30-35.

Performance Analysis and Parameter Optimization of Primary Frequency Regulation of Hydropower Units Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm

YAN Ning-jun

(Datang Hydropower Science & Technology Research Institute, Nanning 530000, China)

Abstract: At present, in the region of China Southern Power Grid, there is a case that the actual load adjustment amount of primary frequency control of some hydropower units cannot reach the theoretical value under certain working conditions, resulting in the assessment of primary frequency regulation. This paper processed the original operation data of a unit, and calculated the actual load adjustment amount and actual adjustment rate of primary frequency regulation. Compared with the theoretical value, the qualified working condition area of the primary frequency regulation process was found out. The characteristic operating points were selected in the qualified working condition area, and the multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto optimization criterion was used to find the optimal PID parameters. The simulation results show that the optimized PID parameters can make the unit have better primary frequency regulation performance index than the actual parameters of the governor.

Key words: hydropower units; primary frequency regulation; performance analysis; parameter optimization; multi-objective particle swarm optimization algorithm