

# 提高黑启动小系统频率稳定性的水电机组 调速器参数优化

吴琛<sup>1</sup>, 黄伟<sup>1</sup>, 张丹<sup>1</sup>, 刘旭斐<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:**黑启动初期小系统频率能否保持稳定是判断黑启动方案可行性的主要标准之一。当黑启动电源为水电机组时,“水锤效应”的反调作用会给频率稳定带来较大的不利影响。优化调速器参数是一种减小该影响的有效方法。基于水电机组及其调速器的特性,筛选出主要影响系统频率稳定性的调速器参数。构建了黑启动方案的多场景分析模型,以提高优化后调速器参数的适用性;引入多目标多元宇宙优化算法对调速器参数进行全局优化,得到 Pareto 最优解集;采用模糊熵权法和基于灰关联模型的多属性决策获得最满意的调速器优化参数。以中国西南某省级电网为例,验证所提方法的有效性和适用性。

**关键词:**黑启动;频率稳定性;水锤效应;水电机组调速器参数;多目标优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.015 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2021)01-0137-08

## Parameter optimization of hydropower governors for improving frequency stability of black start power systems

WU Chen<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, LIU Xufei<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Frequency stability is a main criteria for determining the feasibility of a black start scheme. If the black-start source is a hydropower unit, its water hammer effect will have a significantly negative impact on the frequency stability. It has been proved that the governor parameter optimization is an effective way to reduce the impact. Therefore, based on the characteristics of hydropower units and their governors, this paper selects out the main governor parameters that affect the frequency stability firstly. A multi-scenario model of black-start schemes is built to improve the suitability of optimized parameters. Then, a multi-objective multi-verse optimization algorithm is employed to optimize the parameters globally and produces the Pareto optimal set. By adopting the fuzzy entropy method and multi-attribute decision making based on gray relational model, the most satisfactory parameter combination is then chosen from the Pareto optimal set. Finally, a provincial power grid in southwest China is taken as an example, the validity and applicability of the method proposed in this paper are verified.

**Key words:** black start; frequency stability; water hammer effect; hydropower governor parameter; multi-objective optimization

收稿日期:2018-03-19;修回日期:2018-05-18

基金项目:国家自然科学基金(51277076)

通信作者:杨超(1993-),男,博士研究生,主要从事电力系统安全防御和恢复控制研究;E-mail:shutong05@126.com

黑启动是大停电后电力系统恢复的基础环节,其成功与否决定着整个恢复过程的成败,因此在制定黑启动方案时必须保证其合理可行。黑启动初期小系统的频率稳定性是考量黑启动方案可行性的主要问题之一,其甄别方式主要包括以下 2 种:基于系统频率响应特性原理的约束判据<sup>[1-3]</sup>;通过仿真软件进行模拟,利用频率的仿真结果进行判断<sup>[4-6]</sup>。目前关于黑启动初期小系统的频率稳定性的研究多着眼于辅机和负荷恢复优化<sup>[7-9]</sup>,较少有从黑启动机组本身的频率响应特性出发分析负荷恢复对频率稳定性影响的研究。

当水电机组作为黑启动电源时,恢复初期小系统的频率稳定问题尤为突出。首先,因为此时的系统主要依靠水电机组进行调频,通过机组的机械惯性和自调节系统保证频率稳定。较大的负荷扰动可能会引起系统频率越限,保护装置动作后机组退出运行,导致黑启动失败。其次,由于水轮机“水锤效应”的存在,响应初期将出现反调现象<sup>[10]</sup>,这也增加了小系统的频率越限甚至失稳的可能性。因此,有必要从频率响应特性入手,深入研究适用于黑启动的水电机组调频策略,以提高水电机组作为黑启动电源时的可靠性。

在黑启动过程中,一般选取调频能力较好的频率调节模式作为水电机组的一次调频模式。该模式下,调速器参数与小系统的频率稳定性密切相关。当前,已普遍应用的微机调速器主要通过比例—积分—微分(proportional integral derivative, PID)调节器来实现水电机组调节系统自身的频率/功率静态特性,进而满足电网的控制要求<sup>[11]</sup>。若调速器的参数设置不合理将会造成系统频率振荡甚至失稳,因此需要对调速器参数与黑启动初期小系统频率稳定性之间的关系做深入研究。

对于确定的黑启动电源而言,由于机组的负载率、恢复目标、恢复路径和投入负荷的条件不同,会存在多种恢复场景,进而衍生出多个黑启动方案。因此,水电机组及其调速器的调频能力需对多种黑启动方案具有适用性,即在每种黑启动方案下,发生不同的投负荷扰动时,水电机组及其调速器能尽量保证系统频率稳定。

基于上述问题,该文综合考虑水电机组及其调

频特性、黑启动方案等对频率稳定性产生影响的因素,对水电机组调速器参数的优化进行深入研究。首先,基于水电机组的频率响应特性,通过仿真对比筛选出 4 个起主导作用的调速器参数,并将其作为待优化变量。接着,通过改变黑启动方案的生成条件构建多场景模型,以提高调速器参数的适用性。然后,以多场景下的平均频率偏差积分和最小、平均频率偏差最大值最小及扰动后平均频率稳态值偏差值最小为优化目标,考虑黑启动过程中的约束条件,采用多目标多元宇宙优化算法<sup>[12]</sup>(multi-objective multi-verse optimization algorithm, MOMVO)并调用电力系统仿真软件(PSD-BPA)对优化模型进行求解,得到调速器参数组合的 Pareto 最优解集。采用灰关联模型进行多属性决策,选出最满意的调速器参数组合方案。最后,该文以中国西南某省级电网的主力黑启动水电机组为例,通过 PSD-BPA 对调速器参数优化前后的小系统频率稳定性进行了仿真对比。结果表明,该文所提方法能有效改善黑启动初期小系统频率的稳定性,且对多种水电机组的黑启动场景具有适用性。

## 1 水电机组频率响应特性及调速器主要影响参数分析

黑启动初期系统的扰动主要由投负荷引起。此时,相较于机组的调频能力,负荷特性对调频的作用十分有限,且二次调频设备还未投入<sup>[13]</sup>,所以系统的频率响应特性主要由发电机、水轮机和调速器系统 3 部分决定。传递函数方程<sup>[14]</sup>为

$$\begin{aligned}
 G(s) &= G_g(s)G_t(s)G_r(s)G_a(s) \\
 G_g(s) &= \frac{1}{(T_a + T_b)s + e_n} \\
 G_t(s) &= \frac{1 - sT_w}{1 + 0.5sT_w} \\
 G_r(s) &= \frac{K_w}{sT_r + 1} \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{sK_d}{sT_d + 1} \right) \\
 G_a(s) &= \frac{1}{sT_y + 1}
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $G_g(s)$  为发电机传递函数;  $T_a$  为机组的惯性时间常数;  $T_b$  为负载惯性时间常数;  $e_n$  为负荷的调节系数,黑启动时可忽略负荷特性的影响;  $G_t(s)$  为

水轮机传递函数;  $T_w$  为水流惯性时间常数;  $G_r(s)$  为调速系统传递函数(该文采用增量型 PID 微机调速器);  $K_w$  为频率偏差系数;  $T_r$  为频率测量环节时间常数;  $K_p$  为比例增益;  $K_i$  为微分增益;  $K_d$  为积分增益;  $T_d$  为微分环节时间常数;  $G_a(s)$  为电液伺服系统传递函数;  $T_y$  为伺服电动机时间常数。

从传递函数看,水轮机功率调节属于迟滞环节,系统整体为非最小相位系统,输出量比输入量存在较大的相位滞后,不利于整个调速系统的稳定。在实际系统中,大型水电机组的水锤时间常数一般较大,由于水锤效应导致的功率反调现象显著,可能导致黑启动小系统的频率振荡甚至发散失稳。已有研究表明,调速器的参数对水电机组孤网运行的频率响应特性起主要作用<sup>[15-16]</sup>。因此,在确定的黑启动方案下,由于  $T_a$ 、 $T_b$ 、 $T_w$ 、 $e_n$  等固有物理参数不变,水电机组的频率响应特性主要取决于调速器的参数设置。

该文采用 PSD-BPA 软件对主要影响调速器响应特性的 6 个参数  $K_w$ 、 $T_r$ 、 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  和  $T_d$  进行了仿真对比。分析可知:黑启动初期小系统的频率稳定性主要受  $K_w$ 、 $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  4 个参数的影响。在其他条件不变的情况下,系统频率对  $K_i$  值的变化最敏感,  $K_i$  的可调节范围最小,过小或过大的取值可能使受扰后的系统频率出现振荡或变化过大而失稳的现象。  $K_w$  和  $K_p$  也对频率具有较大的影响,但其调节范围较  $K_i$  稍大。相对而言,  $K_d$  的变化对频率影响最小,其值具有较大的调节范围。参数之间具有很强的耦合关系,仅依靠单个参数的调节往往很难使受扰后的系统频率保持稳定,因此将其一同作为优化变量。

目前通过人工调节 PID 控制器参数多具有盲目性,且只能得到可行解。为了克服以上缺点,增加调节参数的准确性和适用性,该文提出了一种基于黑启动多恢复场景的调速器参数多目标优化方法。

## 2 黑启动水电机组的调速器参数优化模型

由于某一确定的水电机组可能存在多个黑启动方案,调速器具有多个待优化参数,且可依据不同角

度的指标来判断频率的稳定性,因此,调速器参数的优化可以归结为多场景多目标的优化问题。

### 2.1 黑启动方案的多场景模型

不计网络参数变化的影响时<sup>[17]</sup>,影响黑启动小系统频率响应特性的因素包括:机组及其控制器参数,已恢复网络拓扑及其参数,待恢复负荷的类型、位置和大小等。根据以上因素,该文生成多场景模型方法。

选取黑启动电源为待研究的水电机组,设机组负载率集合为  $R$ 。采用 Dijkstra 法搜索待恢复目标集  $G$  中单个目标的可行恢复路径,生成黑启动电源的恢复路径集  $\Gamma$ ;通过改变同一恢复路径下的待恢复负荷,最终生成多个恢复场景集  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ ,  $n$  为黑启动方案总个数。其中,待恢复负荷集  $L$  由投入地点集  $D$ 、容量集  $Q$  和类型集  $C$  组成。地点集  $D$  需分别根据每条路径的可恢复负荷厂站确定,容量集  $Q$  的生成根据投负荷容量的允许范围确定<sup>[18]</sup>,类型集  $C$  需根据具体恢复的负荷类型确定。

进一步的,该文对待恢复负荷集  $L$  进行了合理简化。黑启动时一般优先恢复被启动电厂的辅机设备,因此投负荷地点选为恢复路径末端被启动电厂的低压母线,待恢复负荷类型主要为大型异步电机。由于水电厂用电较小,为机组容量的 0.1%~1%,因此可用一组限定最大值的等差数列作为典型值表示负荷容量集  $Q$ 。

当恢复路径不变时,集合  $D$  和  $C$  均不变,因此可用负荷容量集  $C$  表示待恢复负荷集  $L$ 。集合  $W$  可用集合  $R$ 、 $\Gamma$  和  $L$  的笛卡尔积<sup>[19]</sup>表示

$$W = \{\omega_s = R_s \times \Gamma_s \times L_s \mid s = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

式中  $\omega_s$  为第  $s$  个黑启动方案。

### 2.2 多目标优化模型

#### 2.2.1 目标函数

该文对负荷扰动后系统的频率响应特性进行研究,综合考虑频率的最大超调量、峰值时间、收敛性、收敛速度和稳态偏差等因素,确定出 3 个目标函数。通过调用 PSD-BPA 潮流和暂态稳定模块进行计算,读取结果文件以获取目标函数及其他相关数据,离散化处理后的目标函数如下:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^L \Delta f_{s,l} \cdot \Delta t \\ \min\{F_2 = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \max\{\Delta f_{s,l}, l=1,2,\dots,L\}\} \\ F_3 = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \Delta f_{s,L} \Big|_{L=T/\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $F_1$  为频率偏差对时间积分和的平均值,该值从频率的收敛性和偏差大小 2 个方面反映了受扰后系统的调频能力; $T$  为黑启动方案的总仿真时间; $\Delta t$  为仿真步长; $L$  为总仿真时步,  $L = T/\Delta t$ ; $F_2$  为时间  $T$  内频率偏差最大值之和的平均数,该值从频率的最大超调量角度表征了受扰后系统的调频能力; $\Delta f_{s,l}$  为第  $s$  个黑启动方案的第  $l$  时步的频率偏差值; $F_3$  为小系统稳定后的频率稳态偏差值之和的平均数,该值从稳态频率偏差角度反映了系统的调频能力。综上所述,3 个目标函数可共同反映出系统的综合调频能力,其值越小说明该组调速器参数越有利于系统频率的快速稳定。

### 2.2.2 约束条件

1) 频率约束。系统中由单个负荷恢复引起的频率变化值不能超过频率的最大限值,否则将可能引起机组保护动作甚至导致黑启动失败,即

$$f_{\min} < f < f_{\max} \quad (4)$$

式中  $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为系统频率变化的上下限。黑启动过程中,一般分别取 49.5、50.5 Hz。

2) 暂态电压约束。电厂的大型辅机启动会吸收大量的无功功率,引起相连母线处产生较大的电压跌落,因此,需要监测被启动电厂母线的暂态电压,即

$$V_{\min} < V < V_{\max} \quad (5)$$

式中  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为节点电压变化的上下限,一般为 0.8、1.2 p. u.。

3) 潮流约束。黑启动的小系统稳态运行时也同样需要满足系统的潮流约束,即

$$\begin{cases} P_{g,\min} \leq P_g \leq P_{g,\max} & g = 1, 2, \dots, n_g \\ Q_{g,\min} \leq Q_g \leq Q_{g,\max} & g = 1, 2, \dots, n_g \\ P_i < P_{i,\max} & i = 1, 2, \dots, n_l \\ V_{v,\min} < V_v < V_{v,\max} & v = 1, 2, \dots, n_r \end{cases} \quad (6)$$

式中  $P_{g,\min}$  和  $P_{g,\max}$  分别为机组  $g$  有功出力  $P_g$  的上下限; $Q_{g,\min}$  和  $Q_{g,\max}$  分别为机组  $g$  无功输出

$Q_g$  的上下限; $P_i$  为线路  $i$  上流过的有功功率, $P_{i,\max}$  为线路  $i$  在正常情况下允许输送的最大功率; $V_{v,\max}$ 、 $V_{v,\min}$  分别为节点  $v$  稳态电压  $V_v$  的上下限。

4) 系统频率稳定约束。黑启动初期系统的扰动主要来自于投负荷操作。当扰动产生后,需要保证系统频率最终趋于稳定,即不出现明显的低频振荡现象,也不出现发散的情况。当系统调频能力足够强时,系统频率会很快趋于稳定;若频率发散或者出现振荡,则在一段时间内的频率值将出现较大变化。基于此,该文读取仿真最后一段时间(如  $[T-30, T]$ )内的频率最大值  $f_{\max}$  和最小值  $f_{\min}$ ,通过其差值  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  与一个很小的  $K$  值(该文取为 0.02 Hz)对比来近似估计频率是否稳定。若  $\Delta f$  大于  $K$  则认为该系统受扰后不能使频率快速趋于稳定,不能满足该约束要求。

## 3 调速器参数的优化求解

### 3.1 多目标多元宇宙优化算法

该文引入一种新型的群智能全局优化算法,多目标多元宇宙优化算法<sup>[13]</sup>对优化模型进行求解。MOMVO 算法是对多元宇宙优化算法(MVO)算法<sup>[20]</sup>的发展,其主要改进为加入了领袖选择机制(leader selection mechanism, LSM)对 Pareto 最优解集进行筛选,以减少相似解并提高非支配解的覆盖范围。该方法具有寻优能力强、参数调节少、收敛精度高及性能稳定且较易实现等优点。

MOMVO 算法受多重宇宙理论中白洞、黑洞和虫洞概念的启发建立数学模型并模拟优化过程中的探索行为。其中,每个宇宙代表一个候选解,宇宙中的物质代表待优化变量。所有宇宙中随机产生白洞和黑洞以实现不同宇宙间的物质交换,随机产生虫洞实现宇宙内的物质转移。MOMVO 算法以宇宙膨胀率代表目标函数值,优化过程中遵循的规则包括:①在膨胀率高的宇宙中存在白洞的概率高,黑洞的概率低;②物体由白洞向黑洞传递;③全部宇宙内的物体均可通过虫洞向最好宇宙随机移动。该算法的数学模型为

$$U = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^m \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $U$  为随机生成的候选宇宙集;  $x$  为宇宙的物质参数;  $m$  为参数个数;  $n$  为宇宙数量。

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < NI(U_i) \\ x_i^j & r_1 \geq NI(U_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $x_i^j$  为宇宙  $i$  的第  $j$  个参数;  $U_i$  为宇宙  $i$  的参数集;  $NI$  为宇宙  $i$  的膨胀率;  $r_1$  为  $[0, 1]$  上的随机数;  $x_k^j$  为基于轮盘赌机制选择的宇宙  $k$  的第  $j$  个参数。

描述虫洞在宇宙中随机转移物质的数学模型如下:

$$x_j^i = \begin{cases} [X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 < 0.5, & r_2 < WEP \\ X_j - TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 \geq 0.5, & r_2 < WEP \\ x_j^i, & r_2 \geq WEP \end{cases} \quad (9)$$

式中  $X_j$  为当前最好宇宙的第  $j$  个参数;  $WEP$ 、 $TDR$  分别为虫洞存在概率和旅行距离率;  $ub_j$  和  $lb_j$  为第  $j$  个变量的上下限;  $r_2$ 、 $r_3$  和  $r_4$  为  $[0, 1]$  上的随机数。  $WEP$  和  $TDR$  的计算公式:

$$\begin{cases} WEP = \min + h \times \left( \frac{\max - \min}{H} \right) \\ TDR = 1 - \frac{h^{1/p}}{H^{1/p}} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\min$ 、 $\max$  分别为  $WEP$  的最小值和最大值;  $h$  为当前迭代次数;  $H$  为最大迭代次数;  $p$  为迭代精度。

领袖选择机制的非支配解间的拥挤距离  $d_i$  及拥挤度  $d'_i$  的计算公式:

$$\begin{cases} d_i = c/N_i \\ d'_i = N_i/c \end{cases} \quad (11)$$

式中  $c$  为大于 1 的常数;  $N_i$  为宇宙  $i$  的相邻宇宙数。

### 3.2 基于灰色关联模型的多属性决策

采用多场景分析方法和 MOMVO 算法获得调速器参数组合的 Pareto 最优解集后,还需要根据决策者的偏好与客观情况对其进行综合评价来获得最满意解。该文采用文献[21]提出的模糊熵权法确定目标函数的权重,并采用灰色关联法[22]进行多属性决策。最后,以优属度作为评价不同参数解优劣的综合指标值。该文所提水电机组黑启动时调速器参数优化的流程如图 1 所示。

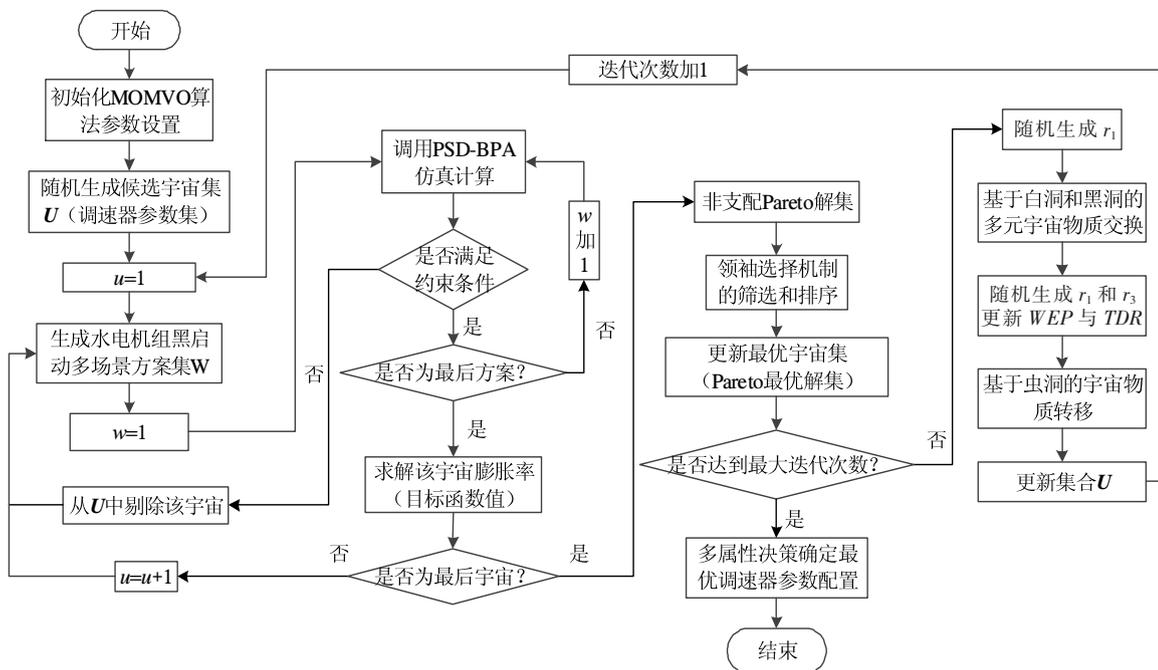


图 1 水电黑启动机组调速器参数的优化流程图

Figure 1 Governor parameters optimization flow chart of hydropower black start unit

## 4 算例分析

该文以中国西南某省级电网为例进行研究。该

省级电网的一个显著特点是存在大量的水电机组,且大部分具有黑启动能力,具有很好的黑启动条件。但大容量水电机组的调速器参数一般根据电网正常运行状态设定,很可能不适用于黑启动的情况,这使

电网停电后的恢复受到了一定限制,因此该文选取该电网的大容量黑启动水电机组的调速器参数进行优化。对 WM 水电厂的 1 号黑启动机组展开研究,其额定容量  $S_n = 333.3 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,设机组负载率集  $R = \{0\%, 40\%, 80\%\}$ 。采用文献[23]的被启动机组优选方法确定出 DCS 和 XEH 2 个可行的目标电厂,采用文献[24]的恢复路径优选方法获得二者的最优黑启动路径,如表 1 所示。待恢复负荷集  $L$  中的负荷类型为异步电机负荷,投负荷地点为待恢复电厂的低压母线,负荷容量集  $Q = \{2.0 \text{ MW}, 4.0 \text{ MW}\}$ 。由此可得,WM 电厂的黑启动方案集共包含 12 个方案。

表 1 WM 电厂黑启动路径集

Table 1 Black start path set of WM power plant

黑启动电源	恢复路径	被启动电源
WM#1 号机	WM-YX-CL-SCD	SCD 电厂
WM#1 号机	WM-GX-HEX	HEX 电厂

采用 MOMVO 算法对优化模型求解,参数配置如下:宇宙规模  $n = 50$ ,最大迭代次数  $T_{\max} = 30$ ,虫洞存在概率  $WEP$  的最大值、最小值分别为 1 和 0.2,旅行距离率的迭代精度  $p = 6$ ,待优化参数的搜索空间为  $[0, 10]$ 。调用 PSD-BPA 程序进行仿真计算,根据多次仿真经验,仿真时间设为 200 s。最终求得 Pareto 解集共包含 50 个非支配解,Pareto 最优解的分布情况如图 2 所示。由附表 1 可知,在 Pareto 解集中, $K_w$ 、 $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的最大、最小值的差值分别约为 0.18、0.35、0.29 和 2.2,这说明  $K_w$ 、 $K_p$ 、 $K_i$  对最终方案的影响程度几乎相当,且可变范围远小于  $K_d$ ,因此三者的影响程度更大。

采用灰色关联模型的多属性决策对 Pareto 最优解集进行综合评价,其中最优的前 5 个调速器参

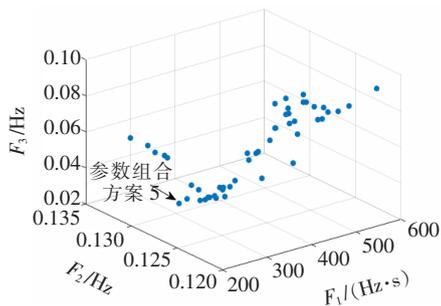


图 2 Pareto 最优解分布

Figure 2 Pareto optimal solutions scatter diagram

数组组合及其综合评价指标如表 2 所示。其中,调速器参数的最优组合方案为  $[K_w \ K_p \ K_i \ K_d] = [0.770 \ 8 \ 2.506 \ 2 \ 0.573 \ 2 \ 6.336 \ 9]$ 。由此可知,只有当水电机组调速器参数取值合理且适当时,黑启动小系统才具有较好的频率稳定性。

选取 WM 电厂启动 SCD 电厂为基础黑启动方案,机组负载率为 10%,在 SCD 电厂的厂用母线侧投入 2 MW 负荷。采用 PSD-BPA 进行仿真,对比原始参数和前 3 组最优参数 4 种不同的方案,其频率波形如图 3 所示。其中,原始参数为:  $[K_w \ K_p \ K_i \ K_d] = [1.6 \ 2.0 \ 0.63 \ 1.0]$ 。

对比图 3(a)的频率波形图可知,调速器在大电网运行的原始参数下,投入较小容量的负荷即会引起黑启动小系统频率振荡失稳;而参数优化后的调速器,能使频率快速收敛,且频率动态和稳态偏差均较小,具备了良好的频率调节能力,更有利于水电机组黑启动时小系统的频率稳定性。对比图 3(b)的频率响应曲线可知,系统在前 3 组最优调速器参数组合下均具有较好的频率响应特性;虽然参数组合 5 方案下的频率收敛速度低于其他参数组合,但其具有更小的超调量、更快的响应速度,因而认为其具有更好的调频性能。

表 2 Pareto 最优解集及其评价价值

Table 2 Pareto optimal solution sets and their evaluation values

编号	调速器参数				目标函数值			综合评价价值
	$K_w$	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	
5	0.770 8	2.506 2	0.573 2	6.336 9	237.953 2	0.126 6	0.038 1	0.851 2
33	0.734 8	2.630 7	0.629 0	6.376 4	267.991 8	0.127 2	0.037 0	0.843 7
35	0.748 4	2.584 4	0.637 4	6.459 8	282.985 8	0.126 5	0.037 1	0.841 8
17	0.764 1	2.515 3	0.627 1	6.392 1	292.233 4	0.126 4	0.036 9	0.841 2
41	0.768 4	2.577 5	0.636 7	6.294 1	306.079 3	0.125 9	0.037 8	0.830 5

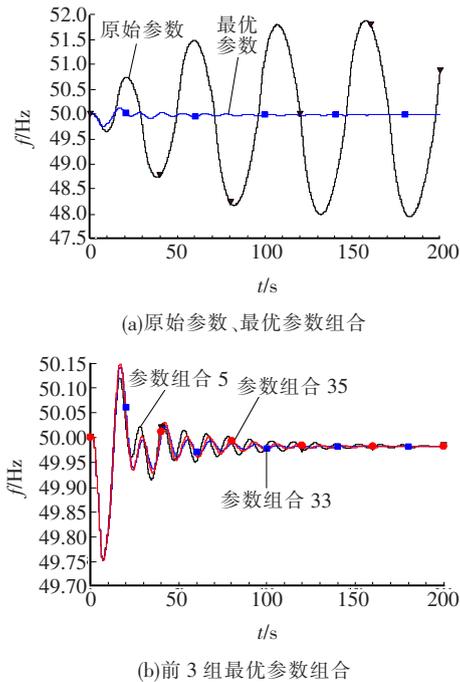


图3 不同调速器参数的频率响应曲线  
Figure 3 Frequency response curves under different governor parameters

## 5 结语

1) 水电机组黑启动时,“水锤效应”的反调作用会对初期小系统的频率稳定产生较大的不利影响。通过合理优化调速器参数可以提高系统的频率稳定性。

2) 主要影响黑启动初期小系统频率稳定性的调速器参数包括:频率放大倍数  $K_w$  和比例增益  $K_p$ 、微分增益  $K_i$ 、积分增益  $K_d$  4 个参数。

3) 所提黑启动方案的多场景分析方法,可以提高调速器优化参数的适用性。引入的多目标多元宇宙优化算法可以实现调速器参数的全局寻优,采用最优参数配置的调速器具有较好的频率响应性能,更有利于黑启动初期小系统的频率稳定性。

## 参考文献:

[1] Adibi M M, Borkoski J N, Kafka R J, et al. Frequency response of prime movers during restoration[J]. IEEE Transactions on Power systems, 1999, 14(2): 751-756.  
[2] 赵晋泉, 张强, 方嵩, 等. 最小化用户停电损失的主动配电网黑启动分区优化策略[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 114-121.  
ZHAO Jinquan, ZHANG Qiang, FANG Song, et al. Optimization strategy for black-start partitioning of active

distribution network to minimize customer outage cost [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 114-121.

- [3] 丁健, 马春雷, 陈宣林, 等. 计及“源—网—荷”影响的主动配电网可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 18-26.  
DING Jian, MA Chunlei, CHEN Xuanlin, et al. Reliability evaluation of active distribution network considering "supply-grid-load"[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 18-26.  
[4] 顾雪平, 刘文轩, 王佳裕, 等. 考虑水电蓄水量的黑启动电源替代方案优化[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 170-180.  
GU Xueping, LIU Wenxuan, WANG Jiayu, et al. Optimization for alternative schemes of black start power sources considering water reserve of hydropower station [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 170-180.  
[5] 齐军, 孙绥, 李佳朋, 等. 风储交流微电网自动功率平衡控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 9-14.  
QI Jun, SUN Sui, LI Jiapeng, et al. Autonomous active power balance control strategy for islanded ac microgrids with wind generation and energy storage system [J]. Smart Power, 2020, 48(1): 9-14.  
[6] 程艳, 张健, 管萸, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 241-245.  
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.  
[7] 瞿寒冰. 大停电后的负荷恢复研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
[8] 廖诗武, 姚伟, 文劲宇, 等. 电力系统恢复后期网架重构和负荷恢复的两阶段优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4873-4882.  
LIAO Shiwu, YAO Wei, WEN Jingyu, et al. Two-stage optimization method for network reconfiguration and load recovery during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4873-4882.  
[9] 付华, 刘公权, 齐晨飞, 等. 计及微电网黑启动的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 59-68.  
FU Hua, LIU Gongquan, QI Chenfei, et al. Frequency regulation strategy of a virtual synchronous generator-based microgrid considering the black start process[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 59-68.  
[10] 卢勇, 贺祥飞, 刘友宽, 等. 云南电网水电机组参与一次调

- 频改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 86-89.
- LU Yong, HE Xiangfei, LIU Youkuan, et al. Primary frequency control strategy of hydro power unit for Yunnan power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 86-89.
- [11] 何常胜, 董鸿魁, 翟鹏, 等. 水电机组一次调频与 AGC 典型控制策略的工程分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 146-151.
- HE Changsheng, DONG Hongkui, ZHAI Peng, et al. Engineering analysis and optimization on typical control strategy of primary frequency modulation and automatic generation control of hydropower units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 146-151.
- [12] Mirjalili S, Jangir P, Mirjalili S Z, et al. Optimization of problems with multiple objectives using the multi-verse optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 134: 50-71.
- [13] 刘映尚, 吴文传, 冯永青, 等. 黑启动过程中的负荷恢复[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 17-22.
- LIU Yingshang, WU Wenchuan, FENG Yongqing, et al. Load recovery during power system blackstart [J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 17-22.
- [14] He X, Liu C, Dong H, et al. Application of an improved augmentedlagrangian algorithm to the tuning of robust PID controller for hydraulic turbine governing system [J]. International Journal of Modelling Identification & Control, 2015, 23(2): 181.
- [15] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [16] 曾红, 刘天琪, 何川, 等. 含电转气设备的气电互联综合能源系统多目标优化[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 99-107.
- ZENG Hong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi-objective optimization for integrated natural-gas and electricity energy system considering power-to-gas [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 99-107.
- [17] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
- ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [18] 刘文轩, 顾雪平, 王佳裕, 等. 考虑系统安全因素的负荷恢复方案优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 87-93.
- LIU Wenxuan, GU Xueping, WANG Jiayu, et al. Optimization of load recovery scheme considering system security factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 87-93.
- [19] 黄宏图, 毕笃彦, 查宇飞, 等. 基于笛卡尔乘积字典的稀疏编码跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 516-521.
- HUANG Hongtu, BI Duyan, ZHA Yufei, et al. Sparse coding visual tracking based on the cartesian product of codebook [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3): 516-521.
- [20] Martí V, Robledo L M. Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization [J]. Neural Computing & Applications, 2016, 27(2): 495-513.
- [21] 陈亮, 顾雪平, 贾京华. 考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案多目标优化与决策[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 137-143.
- CHEN Liang, GU Xueping, JIA Jinghua. Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 137-143.
- [22] 琚垚, 祁林, 刘帅. 基于改进乌鸦算法和 ESN 神经网络的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 58-64.
- JU Yao, QI Lin, LIU Shuai. Short-term wind power forecasting based on improved crow search algorithm and ESN neural network [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 58-64.
- [23] 朱海南, 刘玉田, 邱夕兆. 考虑机组恢复成功率的黑启动阶段待恢复机组优选[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 28-34.
- ZHU Hainan, LIU Yutian, QIU Xizhao. Optimal restoration unit selection considering success rate during black start stage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 28-34.
- [24] 李少岩, 顾雪平, 梁海平. 给定恢复目标的扩展黑启动方案路径优选[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 59-64.
- LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping. Energizing path optimization for extended black-start schemes with given recovery targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 59-64.