

# 兼顾超低频振荡阻尼特性的水电机组一次调频 多目标优化策略

付亮<sup>1</sup>, 赵志高<sup>2</sup>, 杨建东<sup>2</sup>, 杨威嘉<sup>2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对水电高占比电网超低频振荡抑制需求及现有水电机组调速系统控制参数整定方法难以有效协调系统阻尼特性与一次调频动态性能之间矛盾关系的问题,提出一种兼顾阻尼特性的水电机组一次调频多目标优化策略。首先建立适用于小波动工况的水电机组调速系统模型,推导调速系统阻尼特性与振荡频率之间的关系表达式,引入用于协调水电机组阻尼特性和一次调频动态性能的多目标函数;然后采用预先处理和后处理相结合的约束处理策略对相应约束条件进行处理;最后采用多目标引力搜索算法对目标函数进行求解,并对非支配解集进行优选,得出水电机组在一次调频工况下的最优运行参数。仿真结果表明,采用所提策略得到的最佳兼容解能在避免一次调频被考核的同时,较好地提升调速系统在超低频段的阻尼水平,有利于抑制超低频振荡的发生。

**关键词:**超低频振荡;一次调频;水电机组;阻尼特性;多目标优化

**中图分类号:**TM 712

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202006010

## 0 引言

“十三五”规划指出,要积极有序推进大型水电基地建设,合理布局能源富集地区外送。在此背景下,大容量特高压直流输电系统与配套大型水电系统构成的直流送端孤岛的运行稳定性成为研究的热点。近年来,在水电机组占比较高的电网和直流孤岛送出系统中陆续出现超低频振荡现象<sup>[1]</sup>。例如:在云南电网与南方电网主网的异步联网调试期间,出现了振荡频率约为0.05 Hz的超低频振荡现象,在相继退出各主力水电站一次调频功能后,振荡得以平息;在锦苏直流孤岛试验中,曾发生频率的异常波动,通过优化调速系统控制参数,使得振荡消除<sup>[2]</sup>;此外,藏中电网、哥伦比亚电网、金中直流孤岛系统也曾出现过超低频振荡现象。因此,超低频振荡研究对于促进国内外电力系统安全稳定运行有重要意义,该问题也引起了有关部门和学者的高度关注。

文献[2]分析水电机组比例-积分-微分PID (Proportional-Integral-Derivative)功率调节对异步送端电网频率稳定性的影响,揭示了调节系统受初始干扰激发后产生超调振荡的成因、周期,缓解了水电

异步送端电网超低频振荡问题。文献[3]基于稳定余量概念,分析在调节系统不同控制参数下水电机组超低频振荡的衰减特性。文献[4]基于值集法提出用于超低频振荡稳定分析的多参数图形化分析工具,并将其应用于水轮机调速器参数整定中,取得了较好效果,但未权衡水电机组负荷跟踪性能和稳定性间的矛盾。文献[5]定性分析汽轮机调速系统参数和电力系统阻尼比的关系,得出分界频率是判断阻尼特性的重要依据。文献[6]提出通过提升调速系统阻尼抑制超低频振荡的参数优化方法,但未考虑调速器对一次调频性能的影响。文献[7]同时考虑水轮机转速偏差和调速系统的阻尼转矩,采用粒子群优化算法对调速器PID参数进行优化,达到了抑制超低频振荡的目的,但未考虑控制参数对频率响应速动性的影响。文献[8]提出通过退出部分机组一次调频功能或协调机组一次调频与直流频率限制控制器动作死区设置,有效抑制了孤岛系统超低频振荡,但该方法在一定程度上牺牲了系统负荷跟踪能力。文献[9]提出兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器PID参数单目标优化方法,为抑制超低频振荡提供了技术手段,但未协调冲突目标间的矛盾关系。

现有研究表明,异步联网后水电机组调速系统控制参数和流道系统水锤效应共同作用下的负阻尼特性是导致超低频振荡的主要原因<sup>[10]</sup>。而在当前系统中,部分电厂为避免一次调频被考核,将调速系统响应调整得极为灵敏,这使得电网扰动后更易诱发超低频振荡现象<sup>[9]</sup>。超低频振荡是调速系统引起的机械振荡模式,对调速系统参数优化可从根本上解

收稿日期:2019-12-28;修回日期:2020-04-09

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51809197);国家自然科学基金面上项目(51879200);国家自然科学基金重点项目(51839008)

Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(51809197), the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51879200) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51839008)

决振荡问题,但同时也降低了机组的一次调频能力<sup>[1]</sup>。现有研究在侧重提高水电机组调速系统阻尼特性以抑制超低频振荡的同时,往往忽视了机组的一次调频能力,或者在兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的调速系统控制参数优化时,将具有博弈关系的一次调频动态性能指标及低频段阻尼水平指标通过权重叠加,而未协调各指标间的矛盾。

针对上述不足,本文提出一种兼顾阻尼特性的水电机组一次调频多目标控制优化策略,协调水电机组调速系统超低频振荡阻尼性能指标与一次调频响应性能指标间的矛盾关系,为通过调速系统一次调频控制参数优化抑制超低频振荡提供新的技术手段。

## 1 水电机组调速系统数学模型

图1为水电机组调速系统示意图,该系统是一个将水力、机械、电气过程综合于一体的非线性、非最小相位系统<sup>[11-12]</sup>。调速器控制框图见文献[13],其具有频率、开度、功率3种调节模式。在实际一次调频运行中,调速器处于开度或功率调节模式,采用比例积分(PI)控制,当频率偏差超过人工频率死区后,机组功率会自动增减完成一次调频任务,传递函数为:

$$G_g(s) = \Delta y / \Delta x = \frac{K_p s + K_i}{(b_p T_y K_p + T_y)s^2 + (b_p K_p + b_p T_y K_i + 1)s + b_p K_i} \quad (1)$$

其中, $\Delta y$ 为导叶开度偏差相对值; $\Delta x$ 为转速偏差相对值; $K_p$ 为比例环节参数; $K_i$ 为积分环节参数; $b_p$ 为永态转差系数; $T_y$ 为液压执行机构惯性时间常数; $s$ 为拉普拉斯算子。

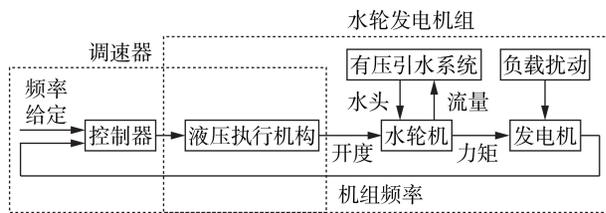


图1 水电机组调速系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of governing system of hydropower unit

当在电力系统中考虑水电机组一次调频动态响应影响时,通常采用理想水轮机模型<sup>[7]</sup>。该模型虽然简化了阻尼特性的求解过程,但是也降低了数值仿真精度。在研究一次调频等小波动工况时,水轮机可采用内特性模型,表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta m_t = \frac{\partial m_t}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial m_t}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial m_t}{\partial h} \Delta h \\ \Delta q_t = \frac{\partial q_t}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial q_t}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial q_t}{\partial h} \Delta h \end{cases} \quad (2)$$

其中, $m_t$ 为水轮机力矩相对值, $q_t$ 为机组流量相对值, $y$ 为导叶开度相对值, $x$ 为机组转速相对值, $h$ 为工作

水头相对值, $\Delta$ 表示对应的偏差相对值。6个传递系数表达式分别为 $e_y = \partial m_t / \partial y$ 、 $e_x = \partial m_t / \partial x$ 、 $e_h = \partial m_t / \partial h$ 、 $e_{qy} = \partial q_t / \partial y$ 、 $e_{qx} = \partial q_t / \partial x$ 、 $e_{qh} = \partial q_t / \partial h$ ,由水轮机综合特性曲线上并网工况点线性化求得,能反映不同类别机组在一次调频等小波动工况下的动态特性。进一步推导得到水轮机及有压引水系统的传递函数如式(3)所示,对应的传递函数结构框图如图2所示。

$$G_t(s) = \frac{\Delta m_t}{\Delta y} = \frac{e_y - (e_{qy} e_h - e_{qh} e_y) T_w s}{1 + e_{qh} T_w s} \quad (3)$$

其中, $T_w$ 为引水系统惯性时间常数。本文仿真对比负载扰动工况下内特性模型与理想水轮机模型的机组转速动态过程,如图3所示。与实测数据相比,理想水轮机模型和水轮机内特性模型的最大超调量误差分别为0.43%和0.08%。与理想水轮机模型相比,采用水轮机内特性模型具有更高的仿真精度。

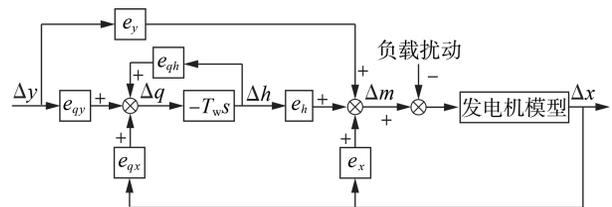


图2 小波动工况下水电机组结构框图

Fig.2 Block diagram of hydropower unit structure under small fluctuation condition

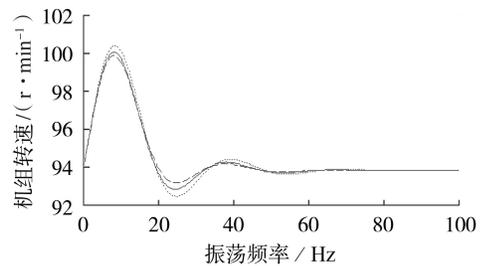


图3 内特性模型与理想水轮机模型仿真对比图

Fig.3 Simulation comparison between internal characteristic model and ideal turbine model

## 2 水电机组调速系统阻尼特性分析

### 2.1 阻尼系数理论推导

水电机组超低频段负阻尼特性主要受流道系统水锤效应及调速器控制参数影响<sup>[9]</sup>。在一次调频工况下,考虑输入为转速偏差相对值 $\Delta x$ ,输出为机械转矩偏差相对值 $\Delta m_t$ ,则系统的开环传递函数为:

$$G_{gov}(s) = -\Delta m_t / \Delta x = -G_g(s) G_t(s) \quad (4)$$

如图2所示,当分析机械转矩对电力系统动态稳定影响时,其二阶发电机模型<sup>[14]</sup>表达式如下:

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta x}{dt} = \Delta m_t - \Delta m_e - D\Delta x \\ \Delta x = \frac{1}{w_0} \frac{d\Delta \delta}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $J$  为转动惯量;  $\Delta m_e$  为电磁转矩变化量;  $D$  为阻尼常数,  $D\Delta x$  为阻尼项;  $\Delta\delta$  为电气弧度表示的转子角变化量;  $w_0$  为基准转子电气速度。

将  $s = jw_d$  ( $w_d$  为旋转角速度) 代入式(5)的第二个公式中, 得:

$$\Delta x = jw_d \Delta\delta / w_0 \quad (6)$$

建立  $\Delta\delta$ - $\Delta x$  坐标系, 式(4)在该坐标系下分解为:

$$\Delta m_1 = D_C \Delta x + K_C \Delta\delta \quad (7)$$

其中,  $D_C$  为阻尼转矩分量中的阻尼系数;  $K_C$  为同步转矩分量系数。联立式(4)、(7)得到  $D_C$  表达式为:

$$D_C = \frac{B_1 w_d^4 + B_2 w_d^2 + B_3}{[-(A_0 + A_1 A_3) w_d^2 + A_2]^2 + [(-A_0 A_3) w_d^2 + (A_1 + A_2 A_3)]^2 w_d^2} \quad (8)$$

其中,  $A_0 = b_p T_y K_p + T_y$ ;  $A_1 = b_p K_p + b_p T_y K_i + 1$ ;  $A_2 = b_p K_i$ ;  $A_3 = e_{qh} T_w$ ;  $B_1 = -(A_0 + A_1 A_3) K_p B_0 - A_0 A_3 K_p e_y + A_0 A_3 K_i B_0$ ;  $B_2 = K_p B_0 A_2 - K_i e_y (A_0 + A_1 A_3) + (A_1 + A_2 A_3) K_p e_y - (A_1 + A_2 A_3) K_i B_0$ ;  $B_3 = K_i e_y A_2$ ;  $B_0 = (e_{qh} e_h - e_{qh} e_y) T_w$ 。

$D_C$  的物理意义是单位转速变化导致的水电机组调速系统提供的、反对转速变化的附加阻尼力矩, 对扰动后系统稳定具有积极意义。在  $\Delta\delta$ - $\Delta x$  坐标系中, 当  $D_C > 0$  时, 阻尼转矩分量  $D_C \Delta x$  位于  $\Delta x$  正半轴, 此时调速系统提供正阻尼, 系统振荡逐渐衰减; 反之, 系统在受到扰动后振荡发散<sup>[1]</sup>。

## 2.2 阻尼特性分析

原动机调节系统对电力系统动态稳定的作用与调节系统本身参数直接相关<sup>[2]</sup>。现有文献通常采用简化的水电机组调速系统数学模型, 未能全面考察调速系统各参数对阻尼特性的影响。文献[2, 5]从时域角度考察调速系统参数设置对机组功率的影响, 但未从机理上探讨系统参数与阻尼特性之间的关系。本文基于水电机组调速系统数学模型, 分析不同参数设置对系统阻尼特性的影响。

设置调速系统参数  $K_p = 8$ 、 $K_i = 2$ 、 $T_y = 2$  s、 $b_p = 0.05$ , 通过改变  $T_w$  值大小分析水锤效应对调速系统阻尼系数(标么值)的影响, 如图4(a)所示。 $T_w$  的增大会导致负阻尼幅值增大, 且最小阻尼点对应的振荡频率向左迁移, 从而导致超低频振荡的发生。这表明水锤效应在超低频段(0.05~0.2 Hz)会恶化调速系统的阻尼特性, 不利于系统动态稳定和响应性能。导致系统产生负阻尼现象的原因在于, 在一次调频过程中, 调速器基于电网频率与机组频率的偏差, 通过开启或关闭导叶开度来增加或减少水轮机力矩, 以弥补频率偏差, 而由于引水系统的水锤效应, 在导叶动作初期水轮机力矩出现逆向调节, 加剧了频率偏差。

设置参数  $T_w = 2$  s, 通过改变  $T_y$  值大小分析接力器时间常数对调速系统阻尼系数的影响, 如图4(b)所示。随着  $T_y$  增大, 调速系统最低阻尼点左移, 但最低阻尼的绝对值减小。在超低频段, 较小的接力器

时间常数有利于提高系统的阻尼特性。需要指出的是, 不同的调速器控制参数组合会影响最低阻尼点在超低频段的迁移, 且由此产生的超低频振荡模式属于典型的机械振荡模式<sup>[1]</sup>。因此, 采用合适的优化算法和必要的约束条件整定调速系统控制参数是解决该问题的有效手段。

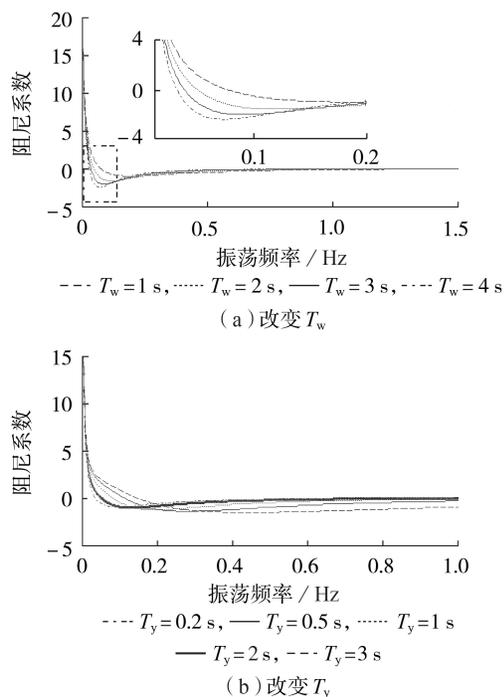


图4 调速系统参数对阻尼特性的影响

Fig.4 Influence of governing system parameters on damping characteristics

## 3 水电机组一次调频性能要求

一次调频的实质是, 根据电网频率偏离 50 Hz 的方向和数值, 通过调节导叶开度调整机组出力, 以适应负荷侧用电功率变化, 达到供需平衡<sup>[15]</sup>。尤其在直流送端孤岛系统中, 因缺少负荷频率调节效应, 其频率波动性远大于联网系统, 故孤岛系统中机组一次调频是孤岛方式下参与频率调整的主要手段。

根据国家标准<sup>[16]</sup>规定, 所有的并网发电机组均应参与一次调频。对水电机组一次调频基本性能指标要求如下: ①水电机组死区控制在  $\pm 0.05$  Hz 以内; ②当电网频率变化超过机组一次调频死区时, 机组应在 15 s 内根据机组响应目标完全响应; ③在电网频率超过机组一次调频死区的 45 s 内时, 机组实际功率与机组响应目标功率偏差的平均值应在机组额定功率的  $\pm 3\%$  以内。

在上述标准的指导下, 部分水电厂为避免被考核, 将调速系统响应调整得极为灵敏, 过于追求一次调频响应的速动性, 而忽视了调速系统的阻尼特性。一次调频响应性能(速动性)与调速系统阻尼特性(稳定性)相矛盾, 并且上述一次调频性能要求仅适

用于无超低频振荡的电网。针对电网超低频振荡模式,需要兼顾机组的一次调频快速调节与超低频振荡阻尼提升需求。为满足异步联网后系统超低频振荡抑制需求,一次调频性能要求应适当降低<sup>[8]</sup>。

#### 4 基于引力搜索算法的多目标优化策略

本文基于多目标引力搜索算法 MOGSA (Multi-Objective Gravitational Search Algorithm)<sup>[17]</sup>,以机组功率响应的上升时间、稳定时间及最大反调功率为一次调频性能指标,以水电机组调速系统在超低频段的阻尼水平为阻尼特性指标,设置适当的约束条件,通过多目标优化策略协调一次调频响应性能与调速系统阻尼特性之间的矛盾关系。

##### 4.1 目标函数

调速系统在不同的控制参数下会表现出不同的阻尼特性,以  $w_d = 2\pi f$  ( $f$  为振荡频率) 设定超低频段的频率变化范围。如图4所示,定义阻尼系数曲线与横轴的首个交点对应的频率  $f_0$  为分界频率,即  $D_G(f_0) = 0$ 。在研究水电机组超低频振荡的阻尼特性时,关注的频带上限  $f_{\max}$  可取为 0.1 Hz<sup>[10]</sup>。因此,水电机组调速系统在超低频振荡的关注频带内阻尼系数代数和  $D(f)$  为:

$$D(f) = \sum_{i=1}^n D_G(f_i) \quad (9)$$

其中,  $n = (f_{\max} - f_0) / \Delta f$  为关注频带内的频率采样点数;  $\Delta f = 0.001$  Hz 为频率点采样步长,对第  $i$  个频率点有  $f_i = f_0 + (i - 1)\Delta f$ 。

当调速系统在超低频段提供正阻尼时,阻尼系数越大越有利于系统稳定;当系统提供负阻尼时,阻尼系数绝对值越小,则发生超低频振荡的概率越小。由此可得调速系统在超低频段的阻尼特性目标函数为<sup>[9]</sup>:

$$\min O_{bj1}(K_p, K_i) = \begin{cases} |D(f)| & D(f) \leq 0 \\ 1 & D(f) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

以机组有功功率动态曲线为考察对象,反映一次调频响应性能的指标有上升时间  $T_r$ 、稳定时间  $T_s$  及反调功率  $P_m$ 。建立一次调频性能综合目标函数<sup>[9]</sup>:

$$\min O_{bj2}(K_p, K_i) = k_1 T_r' + k_2 T_s' + k_3 P_m' \quad (11)$$

其中,  $k_1, k_2, k_3$  为对应的权重系数,通过设置其大小可以灵活调整各指标对一次调频性能综合指标的贡献率,当电网要求速动性指标重要性大于反调功率及稳定时间指标时,可分别将  $k_1, k_2, k_3$  设置为 2、1、1;  $T_r', T_s', P_m'$  分别为无量纲的上升时间、稳定时间和最大反调功率指标。式(11)中各指标均为越小越优,可按式(12)处理式(11)中各指标,以  $T_s$  为例可得:

$$T_s' = \begin{cases} 0 & T_s < T_{s_{\min}} \\ \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} & T_{s_{\min}} \leq T_s \leq T_{s_{\max}} \\ 1 & T_s > T_{s_{\max}} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $T_s$  为稳定时间实际值;  $T_{s_{\min}}$  和  $T_{s_{\max}}$  分别为稳定时间归一化的最小值和最大值。考虑到控制参数优化范围位于大网参数和孤网参数之间<sup>[9]</sup>,将优化范围边界值组成 4 种不同控制参数组合,将其代入数学模型中,分别试算各指标的最大、最小值作为 3 种性能指标的归一化上、下限。值得指出的是,由于一次调频性能综合目标函数中各指标的量纲及量级不同,为保证指标之间的公平性,必须进行无量纲转化。因此,相较于传统方法<sup>[7,9]</sup>,本文所构造的一次调频性能综合目标函数更合理。

##### 4.2 约束条件

通过设置适当的约束条件,能为算法提供合理的搜索廊道,加快优化算法收敛速度,提高搜索效率。

(1) 上升时间及稳定时间约束。

在无量纲转化之前,水电机组一次调频的功率响应特性需要满足国家标准规定,其表达式如下:

$$\begin{cases} T_r \leq T_{r_{GB}} \\ T_s \leq T_{s_{GB}} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $T_{r_{GB}}, T_{s_{GB}}$  为国家标准要求的机组功率响应上升时间、稳定时间极限值。为满足异步联网后系统超低频振荡抑制需求,上述指标需适当放宽,本文分别设置  $T_{r_{GB}} = 30$  s、 $T_{s_{GB}} = 60$  s。

(2) 最大调整功率限幅约束。

$$P_s \leq 6\% P_r \quad (14)$$

其中,  $P_s$  为一次调频的有功功率变化量;  $P_r$  为机组额定出力。按照国家标准规定,水电机组参与一次调频时,其最大调整功率限幅在额定功率的 6% 以内。

(3) 最劣阻尼特性约束。

当水电机组在超低频段提供的最小阻尼系数小于最劣阻尼系数时,对系统的稳定性极为不利,会恶化系统的超低频振荡现象。对应约束表达式为:

$$\min(D_G(f_0), \dots, D_G(f_i), \dots, D_G(f_n)) \geq D_{amp_{\min}} \quad (15)$$

其中,  $D_{amp_{\min}}$  为水电机组最劣阻尼系数。

(4) 决策变量的优化量级约束。

在电站实际运行中,调速器控制参数的设置精度一般为小数点后 2 位有效数字。因此,在优化算法决策变量初始化及更新中,其数值精度应该与实际运行保持一致。过高的数值精度不仅导致优化结果无法应用于工程实际,且会降低算法的优化效率,严重时还可能会陷入局部最优。量级约束条件为:

$$\begin{cases} M[K_p] = 0.01 \\ M[K_i] = 0.01 \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $M[\cdot]$  为决策变量的量级,采用 MATLAB 平台的 roundn 函数实现。

本文采用预先处理和后处理相结合的约束处理策略。式(16)采用预先处理策略,在决策变量更新后,即执行量级约束。式(13)~(15)采用基于约束违反度的可行解增强后处理策略<sup>[18]</sup>。针对最小化目

标函数求解,其核心思想是在原始的适应度函数的基础上考虑总体的约束违反度,以增加不可行解的适应度值,从而恶化违反约束的个体,增强可行解的支配性。后处理策略如式(17)所示。

$$f_m(\mathbf{X}_i(t)) = \begin{cases} f_m(\mathbf{X}_i(t)) & \mathbf{X}_i(t) \text{ 是可行解} \\ f_{\text{worst}}^m + v(\mathbf{X}(t)) & \mathbf{X}_i(t) \text{ 违反约束式(1)—(3)} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{X}_i(t)$  为第  $i$  个个体在第  $t$  次迭代的位置向量;  $f_m(\mathbf{X}_i(t))$  为第  $m$  个目标的第  $i$  个个体的适应度函数值;  $f_{\text{worst}}^m$  为第  $m$  个目标的最差适应度函数值;  $v(\mathbf{X}(t))$  为总体的约束违反度,由式(18)给出。如果当前种群中没有可行解,则  $f_{\text{worst}}^m = 0$ 。

$$\begin{cases} v(\mathbf{X}(t)) = \sum_{j=1}^C v_{j,\text{normalized}}(\mathbf{X}(t)) \\ v_{j,\text{normalized}}(\mathbf{X}(t)) = v_j(\mathbf{X}(t))/v_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $C$  为目标总数;  $v_{j,\text{normalized}}(\mathbf{X}(t))$  为第  $j$  个目标的标准化约束违反度;  $v_j(\mathbf{X}(t))$  为  $\mathbf{X}(t)$  的所有个体在第  $j$  个目标的总体约束违反度,即越限指标与对应约束值的差值;  $v_{\max}$  为  $\mathbf{X}(t)$  的所有个体在第  $j$  个目标的违反度最大值。

### 4.3 优化流程

本文采用 MOGSA,在兼顾阻尼特性的条件下,对水电机组一次调频动态性能进行优化,以抑制超低频振荡现象。算法优化流程如下。

(1)算法初始化。设置算法参数,包括种群大小  $N$ 、迭代总次数  $T$ 、精英档案集规模  $N_{\text{rep}}$ 、万有引力常数  $G_0$ 、引力衰减系数  $\alpha$ 、决策向量维数  $D$ 、邻域搜索步长  $L_0$  和步长自适应系数  $\delta$ ;设置水电机组调速系统模型参数,包括引水系统水击惯性时间常数  $T_w$ 、接力器惯性时间常数  $T_y$ 、水轮机六参数、永态转差系数  $b_p$ 、人工频率死区  $E_f$ 、电气开限限速环节等;设置电网频率扰动偏差为  $\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$ ;设置决策变量的优化上、下限范围分别为  $[K_{p,\max}, K_{i,\max}]$ 、 $[K_{p,\min}, K_{i,\min}]$ ;设置当前迭代次数  $t = 1$ 。

(2)随机初始化个体位置,对其进行约束预处理。

(3)从个体位置  $\mathbf{X}_i(t)$  中取出参数  $K_p$ 、 $K_i$ ,代入式(8)中求得阻尼系数随振荡频率的变化曲线,按式(9)、(10)求得超低频带的阻尼特性目标函数  $O_{\text{bj1}}$ 。

(4)将控制参数输入水电机组调速系统模型中,得到一次调频工况下机组功率动态响应时域变化曲线,获取  $T_r$ 、 $T_s$ 、 $P_m$  等性能指标,根据式(11)、(12)求解一次调频性能综合目标函数  $O_{\text{bj2}}$ 。

(5)根据式(17)、(18)对约束式(13)—(15)进行后处理,求解个体的适应度函数值,计算个体质量,根据适应度函数值对群体进行非支配排序,并将非支配个体组成外部初始精英档案集。

(6)分别计算个体加速度和速度<sup>[17]</sup>,更新个体位

置向量得到  $\mathbf{X}_i(t+1)$ ,得到新的位置向量  $\mathbf{X}'_i(t+1)$ 。

(7)从  $\mathbf{X}'_i(t+1)$  中提取调速系统控制参数,按步骤(3)、(4)重新计算目标函数值,并计算个体适应度函数值和质量,然后将未被支配的个体加入档案集。

(8)令  $t=t+1$ ,若  $t \geq T$ ,则算法结束并输出精英档案集;否则,转入步骤(6)。

## 5 实例分析

本文以我国某水电站为例,按第2节建立一次调频工况下水电机组调速系统数学模型。水电机组调速系统物理参数及 MOGSA 参数见附录中表 A1。

基于水电机组调速系统一次调频数学模型及调速系统在超低频段的阻尼系数表达式,用 MOGSA 求解 3.1 节中的多目标函数,其 Pareto 前沿见图 5,非支配解集中对应的最优控制方案见附录中表 A2。由图 5 知,MOGSA 优化所得 Pareto 前沿分布均匀,有效协调了调速系统在超低频段的阻尼特性指标和一次调频性能综合指标间的矛盾,为电站依据现场实际情况在非支配解集中选取最佳方案提供了决策支持。

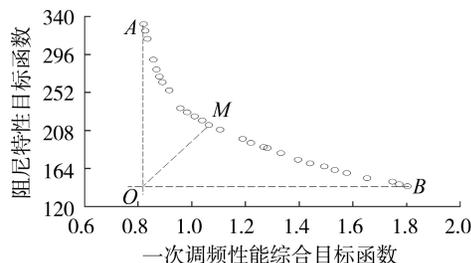


图5 采用 MOGSA 所得 Pareto 前沿  
Fig.5 Pareto front by MOGSA

理论上,表 A2 中所有 Pareto 非支配解均可作为最终的控制参数,然而在电站实际运行中,电站操作人员在评估上述可行方案时,不会区分各方案间的协调关系,因此可能无法准确表达自身偏好程度<sup>[18]</sup>。针对上述情况,本文采用基于理想均衡点的最佳兼容解优选方法<sup>[19]</sup>,如图 5 所示,首先确定 Pareto 前沿的 2 个端点为点 A 和点 B,然后分别从点 A 和点 B 出发平行坐标轴做直线,2 条直线的交点 O 即为理想均衡点,最后求解点 O 与 Pareto 前沿中各点间的欧氏距离,欧氏距离最小的点 M 即对应最佳兼容解。

从图 5 和表 A2 中选取方案 A、B、M 这 3 种方案应用于水电机组调速系统模型中,验证优化策略的有效性。其中,方案 A 可视为仅考虑 1 次调频性能的单目标算法的优化结果,方案 B 可视为仅考虑阻尼特性的单目标算法的优化结果,方案 M 为多目标优化算法得到的最佳兼容解。表 1 给出了非支配解集中最优控制方案(表中反调功率和最小阻尼系数为标么值)。由附录中图 A1 和表 1 可知,方案 A 具有最好的阻尼特性,其最小阻尼系数为  $-3.10 \text{ p.u.}$ ,但其一次调频动态性能最劣,上升时间为  $29.94 \text{ s}$ ,稳定时间

为48.32 s。方案B具有最好的一次调频动态性能,上升时间及稳定时间分别为16.34 s和21.90 s,但其对应的调速系统阻尼特性最差,最小阻尼系数达到-6.49 p.u.。因此,方案A一次调频速动性较差,但对于抑制电网超低频振荡有利;方案B对电网扰动的响应性能较好,但其在超低频段较差的阻尼水平会增加电网发生超低频振荡的概率。相比方案B,方案M的最小阻尼系数提高了2.31 p.u.,但上升时间和稳定时间仅分别增加3.20 s和6.86 s;相比方案A,方案M的最小阻尼系数仅减小了1.08 p.u.,但上升时间和稳定时间分别减少了10.40 s和19.56 s。综上可知,方案M作为非支配解集中的最佳兼容解,能有效协调调速系统阻尼特性与一次调频动态性能间的矛盾关系,比单目标优化算法更具有优越性。

表1 非支配解集中最优控制方案

Table 1 Optimal control scheme in non-dominated solution set

方案	$K_p$	$K_i$	上升时间/s	稳定时间/s	反调功率	最小阻尼系数
A	2.55	6.97	29.94	48.32	-0.0149	-3.10
B	11.98	2.80	16.34	21.90	-0.0162	-6.49
M	11.80	5.56	19.54	28.76	-0.0168	-4.18
原始方案	9.00	8.00	16.38	25.28	-0.0178	-5.43

将方案M与原始控制方案进行对比,结果见附录中图A2。优化后水电机组一次调频上升时间和稳定时间仅分别增加了3.16 s和3.48 s,但阻尼系数却提高了23.02%。优化后的最佳兼容解能在避免一次调频被考核的同时,较好地提升调速系统在超低频段的阻尼水平,有利于抑制超低频振荡的发生。

## 6 结论

针对水电高占比电网超低频振荡抑制需求及现有水电机组调速系统控制参数整定方法难以有效协调系统阻尼特性与一次调频动态性能间的矛盾关系,本文提出一种兼顾阻尼特性的水电机组一次调频多目标优化策略。首先建立基于内特性的水轮机调速系统模型,可较准确模拟机组在小波动工况下的过渡过程;进而推导出调速系统阻尼特性与振荡频率关系表达式;其次引入水电机组阻尼特性和一次调频动态性能的多目标函数,解决了单目标优化中各冲突目标无法协调的矛盾;然后采用预先处理和后处理相结合的约束处理策略,对多重约束条件进行处理,提高了搜索效率;最后采用多目标引力搜索算法对多目标函数进行求解,并对非支配解集进行优选,得出水电机组在一次调频工况下的最优运行参数。仿真结果表明,多目标优化策略在牺牲3.48 s稳定时间的前提下,使阻尼系数提高了23.02%。通过优化结果的敏感性分析可知,多目标优化策略对水电机组水头变化及电站操作因素变化有较好的鲁棒性。多目标优化策略能在避免一次调频被考核的

同时,较好提升调速系统在超低频段的阻尼水平,有利于抑制超低频振荡的发生,为提高并网水电机组运行可靠性、指导水电机组高占比的电网和直流送端孤岛的电网安全稳定运行提供了有效的技术手段。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 王官宏,于钊,张怡,等. 电力系统超低频率振荡模式排查及分析[J]. 电网技术,2016,40(8):2324-2330.  
WANG Guanhong, YU Zhao, ZHANG Yi, et al. Trouble shooting and analysis of ultra-low frequency oscillation mode in power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2324-2330.
- [2] 胡林,申建建,曾云,等. 水电机组PID功率调节对异步送端电网的频率稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):217-223.  
HU Lin, SHEN Jianjian, ZENG Yun, et al. Impact of PID power regulation of hydroelectric unit on frequency stability for asynchronous sending-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 217-223.
- [3] 侯亮宇,杨建东,杨威嘉,等. 水电机组稳定余量域及超低频振荡衰减研究[J]. 水力发电学报,2019,38(8):110-120.  
HOU Liangyu, YANG Jiandong, YANG Weijia, et al. Ultra-low frequency oscillation attenuation and stability margin region of hydropower units[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8): 110-120.
- [4] 周靖皓,江崇熙,甘德强,等. 基于值集法对云南电网超低频振荡的稳定分析[J]. 电网技术,2017,41(10):3147-3152.  
ZHOU Jinghao, JIANG Chongxi, GAN Deqiang, et al. Stability analysis of ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid based on value set approach[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3147-3152.
- [5] 王官宏,黄兴. 汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):87-90.  
WANG Guanhong, HUANG Xing. Influence of turbine governor parameters on power system damping[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 87-90.
- [6] CHEN G, TANG F, SHI H B, et al. Optimization strategy of hydrogovernors for eliminating ultra low-frequency oscillations in hydrodominant power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1086-1094.
- [7] 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):1371-1377.  
DENG Wei, WANG Delin, WEI Mengxi, et al. Influencing mechanism study on turbine governor parameters upon ultra-low frequency oscillation of power system[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1371-1377.
- [8] 李伟,肖湘宁,陶顺,等. 特高压直流送端孤岛系统频率稳定控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):197-203.  
LI Wei, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. Frequency stability control for islanded UHVDC sending end system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 197-203.
- [9] 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.
- [10] YANG W J, NORRLUND P, BLADH J, et al. Hydraulic damping mechanism of low frequency oscillations in power sys-

- tems: Quantitative analysis using a nonlinear model of hydropower plants[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1138-1152.
- [11] 赵志高, 杨建东, 杨威嘉, 等. 抽水蓄能机组电路等效实时精细化模型研究及应用[J]. 水利学报, 2019, 50(4): 475-487.  
ZHAO Zhigao, YANG Jiandong, YANG Weijia, et al. Study on the real-time accurate model of pumped storage unit based on equivalent circuit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(4): 475-487.
- [12] 田田, 郭琦, 刘昌玉, 等. 基于改进闭环子空间的水电机组参数辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 169-176.  
TIAN Tian, GUO Qi, LIU Changyu, et al. Parameter identification method for hydropower generator based on improved closed-loop subspace[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 169-176.
- [13] 赵志高, 周建中, 张勇传, 等. 抽水蓄能机组复杂空载工况增益自适应PID控制[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3918-3927.  
ZHAO Zhigao, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Heuristic gain-scheduling nonlinear PID control of pumped storage units under complicated no-load condition[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3918-3927.
- [14] 刘子全, 姚伟, 文劭宇, 等. 调速系统频率模态对电网低频振荡的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2978-2986.  
LIU Ziquan, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Influence of governor system and its frequency mode on low frequency oscillations of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2978-2986.
- [15] 魏守平. 水轮机调节系统仿真[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 117-119.
- [16] 中华人民共和国发展与改革委员会. 中华人民共和国电力行业标准电网运行准则: DL/L 1040—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] LI C L, ZHOU J Z, LU P, et al. Short-term economic environmental hydrothermal scheduling using improved multi-objective gravitational search algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 127-136.
- [18] ZHAO Z G, YANG J D, YANG W J, et al. A coordinated optimization framework for flexible operation of pumped storage hydropower system: nonlinear modeling, strategy optimization and decision making[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 194: 75-93.
- [19] JIANG R H, YIN H B, PENG K W, et al. Multi-objective optimization, design and performance analysis of an advanced trigenerative micro compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 323-333.

#### 作者简介:



付亮

付亮(1981—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士,研究方向为水电机组调速系统控制及源网协调(E-mail: flinag111@163.com);

赵志高(1992—),男,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向为水电机组控制优化(E-mail: zgzhao@whu.edu.cn);

杨建东(1956—),男,湖北武汉人,教授,博士,主要研究方向为水电站过渡过程与控制、电站输水发电系统设计理论、流体瞬变流等(E-mail: jdyang@whu.edu.cn);

杨威嘉(1989—),男,湖南长沙人,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为水电站(抽水蓄能电站)过渡过程与控制、水电站与电力系统动态稳定性及源网协调等(E-mail: weijia.yang@whu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

## Multi-objective optimization strategy of primary frequency regulation for hydropower unit considering damping characteristics of ultra-low frequency oscillation

FU Liang<sup>1</sup>, ZHAO Zhigao<sup>2</sup>, YANG Jiandong<sup>2</sup>, YANG Weijia<sup>2</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aiming at the inhibition requirement of ultra-low frequency oscillation suppression in power grid with high proportion of hydropower and the problem that current control parameter setting method of speed regulation system of hydropower unit can hardly effectively coordinate the contradiction relationship between system damping characteristics and dynamic performance of primary frequency regulation, a multi-objective optimization strategy of primary frequency regulation for hydropower unit considering damping characteristics is proposed. Firstly, the speed regulation system model of hydropower unit suitable for small fluctuation condition is established, the relationship between damping characteristics of speed regulation system and oscillation frequency is derived, and the multi-objective functions are introduced to coordinate the damping characteristics of hydropower unit and dynamic performance of primary frequency regulation. Secondly, the corresponding constraints are dealt with the combination of pre-processing and post-processing. Finally, MOGSA (Multi-Objective Gravitational Search Algorithm) is used to solve the objective functions, and the non-dominated solution set is optimized to obtain the optimal operation parameters of hydropower unit under primary frequency regulation condition. The simulative results show that the optimum compatible solution obtained by the proposed strategy can not only better improve the damping level of speed regulation system in ultra-low frequency period but also avoid the check of primary frequency regulation, which is beneficial to suppress ultra-low frequency oscillation.

**Key words:** ultra-low frequency oscillation; primary frequency regulation; hydropower unit; damping characteristics; multi-objective optimization

附录：

表 A1 水电站物理参数及优化算法参数

Table A1 Physical parameters of hydropower station and parameters of optimization algorithm

(a) 电站参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$T_w$	4.0	随动装置死区	0.013 7	$e_y$	1	$e_x$	1
$T_y$	2.0	限幅环节	1.12	$e_{qy}$	1	$e_{yx}$	0
$b_p$	0.05	$K_p$	9	$e_h$	1.5	$\Delta f$	0.01
$E_f$	0.05	$K_i$	8	$e_{qh}$	0.5		

(b) 算法参数

参数	数值	参数	数值
$N$	100	$\alpha$	10
$T$	200	$L_0$	0.2
$N_{rep}$	30	$\delta$	8.5
$G_0$	6.5		

表 A2 非支配解集中各方案适应度函数

Table A2 Fitness functions of each scheme in non-dominated solution set

方案	$O_{bj1}$	$O_{bj2}$	方案	$O_{bj1}$	$O_{bj2}$	方案	$O_{bj1}$	$O_{bj2}$
1	1.801 7	143.42	11	1.329 6	181.74	21	0.955 5	232.95
2	1.791 8	144.36	12	1.278 7	187.23	22	0.913 1	253.71
3	1.769 1	145.43	13	1.264 8	188.80	23	0.889 9	263.47
4	1.744 4	148.39	14	1.218 5	193.03	24	0.876 6	269.47
5	1.650 3	152.84	15	1.188 0	197.73	25	0.866 2	278.02
6	1.575 1	158.73	16	1.103 3	208.62	26	0.855 0	288.88
7	1.530 5	161.93	17	1.061 4	213.98	27	0.831 8	312.95
8	1.491 8	165.93	18	1.037 1	219.26	28	0.823 8	322.83
9	1.437 1	169.61	19	1.009 0	223.71	29	0.818 0	327.88
10	1.393 8	173.95	20	0.980 6	228.59	30	0.817 6	330.39

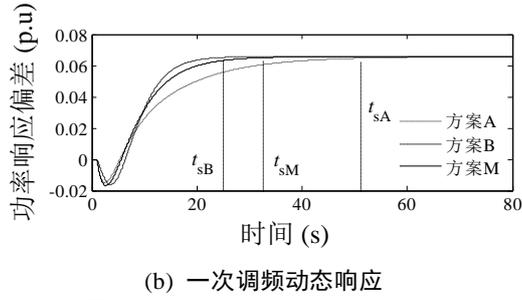
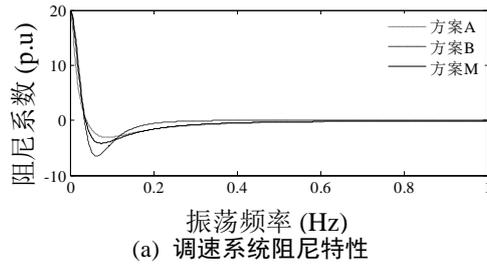


图 A1 各方案动态性能对比分析

Fig.A1 Comparative analysis of dynamic performance among each scheme

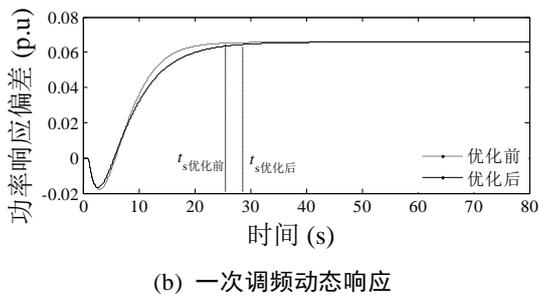
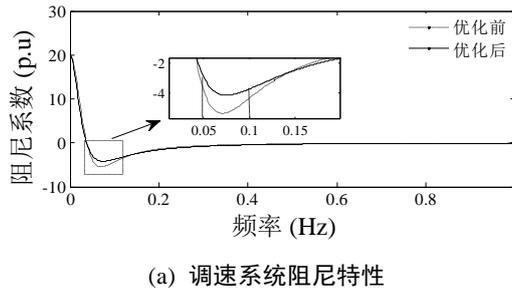


图 A2 优化前后水电机组动态性能对比分析

Fig.A2 Comparative analysis of dynamic performance of hydropower units between before and after optimization