

基于附加阻尼的水轮机调速系统优化控制研究

刘志坚¹, 自超¹, 李鹏程², 郭成¹, 刘杰¹, 黄伟³

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电网公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

3. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对水轮机调速系统引发电力系统发生超低频振荡的问题, 提出一种调速侧附加阻尼控制策略。首先, 基于阻尼转矩法, 分析得出水轮机调速系统产生的负阻尼是造成电力系统发生超低频振荡的主要原因; 其次, 推导调速系统的阻尼转矩系数表达式, 证明该系数与水锤效应时间常数及调速器PID参数密切相关; 然后, 依托附加阻尼控制策略, 在系统调速侧引入正阻尼补偿, 并采用灰狼优化算法整定调速器PID参数, 以进一步改善系统阻尼特性; 最后, 在Matlab/Simulink仿真平台搭建单机、四机两区域系统进行仿真验证, 结果表明所提控制策略能够明显改善调速系统的阻尼特性, 有效抑制超低频振荡。

关键词: 超低频振荡; 水轮机调速系统; 附加阻尼控制; 阻尼转矩法; 参数整定

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24556

Research on Optimizing Control of Hydraulic Turbine Governing System Based on Additional Damping

LIU Zhijian¹, ZI Chao¹, LI Pengcheng², GUO Cheng¹, LIU Jie¹, HUANG Wei³

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming

650500, Yunnan, China; 2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd.,

Kunming 650217, Yunnan, China; 3. Yunnan Electric Power Dispatching and

Controlling Center, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at ultra-low frequency oscillation in power system caused by hydraulic turbine governing system, an additional damping control strategy for governing side was developed. Firstly, according to the damping torque method, the negative damping generated by the hydraulic turbine governing system was regarded as the main reason for the ultra-low frequency oscillation of the power system. Secondly, the damping torque coefficient expression of the speed regulation system was derived, which proves that the coefficient is closely related to the time constant of water hammer effect and the PID parameters of the governor. Besides, based on the additional damping control strategy, the positive damping compensation was introduced in the speed control side of the system. The grey wolf optimization (GWO) algorithm was applied to optimize the PID parameters to further improve the damping characteristics of the system. Finally, simulation verification in a single-machine system and a four-machine two-area system was executed through Matlab/Simulink. The results illustrate that the proposed control strategy can significantly enhance the damping characteristics of the speed control system and effectively suppress ultra-low frequency oscillation.

Key words: ultra-low frequency oscillation; hydraulic turbine governing system; additional damping control; damping torque method; parameter tuning

基金项目: 中国南方电网科技项目(YNKJXM20191251)

作者简介: 刘志坚(1975—), 男, 博士, 教授, Email: 248400248@qq.com

通讯作者: 郭成(1978—), 男, 博士, 教授级高工, Email: gc325@126.com

水力发电的高速发展以及电网网架拓扑结构的快速变化,使得电力系统的频率稳定问题愈发突出^[1]。在以高比例水电为主体的电力系统中,曾多次出现频率低于0.1 Hz的超低频振荡现象,例如在2016年云南电网和南方电网的异步并网实验过程中,曾检测到频率为0.05 Hz的超低频振荡^[2]。此外,国内天广直流、锦苏直流孤岛实验以及国外土耳其、哥伦比亚电网也曾发生类似事件^[3-6]。为此,针对含高比例水电的电力系统超低频振荡的发生机理及抑制策略开展研究具有重要意义。

目前针对超低频振荡问题,国内外的学者们进行了深入的研究。在振荡机理建模方面,文献[7]采用阻尼转矩法对系统发生超低频振荡的机理进行分析,通过Prony分析法进行了验证。文献[8]引入伯德图,以此来分析单机系统中超低频振荡机理,取得了较好的效果。文献[9]采用暂态能量流的方法分析超低频振荡机理和评估系统阻尼。在上述机理分析方法中,尤以阻尼转矩法应用最为广泛。

就超低频振荡的抑制策略研究而言,现阶段研究成果主要基于运行方式调整、调速系统参数优化以及附加控制技术引入三种主要思路设计。在运行方式调整方面,文献[10]指出调速系统负阻尼具有叠加效应,通过退出部分机组调速器,有助于消除系统的超低频振荡。在调速系统参数优化领域,文献[11]基于改进蜉蝣算法优化调速系统的PID参数,进而改善调速系统的阻尼特性并抑制超低频振荡。文献[12]采用灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法针对调速器PID参数进行优化整定,并通过与多种算法进行对比的方式,验证了所提算法的有效性和优越性。在引入附加控制技术方面,文献[13]通过将附加阻尼控制策略引入新能源并网系统中,提高了系统抑制振荡的能力。文献[14-15]在调速器侧附加串联校正控制器,通过相位补偿,改善调速系统的阻尼特性,达到抑制超低频振荡的效果。以上文献多以单一控制优化方法进行研究,多思路下的复合控制效果有待进一步研究验证。

基于以上研究成果,本文提出一种调速器附加阻尼控制策略,采用阻尼转矩法对Phillips-Hefron模型的调速系统阻尼特性进行分析,推导调速系统的阻尼转矩系数表达式,证明该系数与水锤效应时间常数和调速器PID参数密切相关。在

此基础上,基于附加阻尼控制策略提升系统调速侧正阻尼,并采用GWO优化算法优化调速系统PID参数,以进一步改善系统阻尼特性与超低频振荡抑制性能。

1 水轮机调速系统建模与超低频振荡机理分析

1.1 水轮机调速系统数学模型

水轮机调速系统主要由调节系统、液压系统和水轮机构成,对应系统结构如图1所示,图中 $\Delta\omega$ 表示角速度增量, ΔP_m 表示机械功率增量。

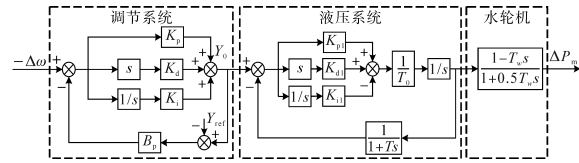


图1 水轮机调速系统

Fig.1 Hydraulic turbine governing system

图1中,调节系统和液压系统统称为调速器,目前在大型水轮机组中,主要基于并联PID架构实现。并联PID调节系统的传递函数为

$$G_{PID}(s) = \frac{K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s}{1 + (K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s) B_p} \quad (1)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为调速器PID的参数; B_p 为永态调差系数。

在实际水轮机中,液压系统的 K_{H1} 和 K_{d1} 一般取值为0,对应的液压系统的传递函数如下式:

$$G_{HS}(s) = \frac{(1 + T_s) K_{p1}}{T_o s^2 (1 + T_s) + K_{p1}} \quad (2)$$

式中: K_{p1} 为液压系统的比例系数; T_o 为油动机的开启时间常数; T_s 为油动机行程反馈环节的时间常数。

在此基础上,水轮机调速器对应的传递函数可进一步表示为

$$G_{gov}(s) = G_{PID}(s) G_{HS}(s) \quad (3)$$

目前,水轮机建模分析环节主要选用刚性水轮机模型,对应的水轮机传递函数为

$$G_{tur}(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (4)$$

式中: T_w 为水锤效应时间常数,通常为0.5~4 s。

综上所述,水轮机调速系统的开环传递函数可以表述为

$$G_m(s) = G_{gov}(s) G_{tur}(s) \quad (5)$$

1.2 水轮机调速系统阻尼特性分析

本文对含水轮机调速系统的 Phillips-Heffron 模型进行分析,模型结构图详见文献[7]。

基于发电机二阶模型,水轮机转子运动方程可表述为

$$T_J s \Delta \omega = \Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega \quad (6)$$

其中
$$\Delta \omega = \frac{1}{\omega_0} s \Delta \delta$$

式中: T_J 为惯性时间常数; ΔP_e 为原动机的电磁功率增量; D 为阻尼系数; ω_0 为基准角频率; $\Delta \delta$ 为功角的偏差值。

当系统的振荡频率为 ω_d ,角速度增量为 $\Delta \omega$ 时,机械功率增量为

$$\Delta P_m = G_m(s)(-\Delta \omega) \quad (7)$$

将 $s=j\omega_d$ 代入式(7)可得:

$$\begin{aligned} -\Delta P_m &= G_m(j\omega_d)\Delta \omega \\ &= \text{Re}[G_m(j\omega_d)]\Delta \omega + j\text{Im}[G_m(j\omega_d)]\Delta \omega \\ &= \text{Re}[G_m(j\omega_d)]\Delta \omega + \frac{\omega_d}{\omega_0} \text{Im}[G_m(j\omega_d)]\Delta \delta \\ &= K_{md}\Delta \omega + K_{ms}\Delta \delta \end{aligned} \quad (8)$$

式中: K_{md} 为阻尼转矩系数; K_{ms} 为电磁转矩系数。

忽略网损,原动机的电磁功率增量可直接等效为负荷的有功增量,则有

$$\Delta P_e = \Delta P_L = K_L \Delta \omega \quad (9)$$

式中: ΔP_L 为负荷有功增量; K_L 为负荷频率调节效应系数。

将式(8)、式(9)代入式(6)可得:

$$T_J s^2 \Delta \delta + (K_{md} + K_L + D)s \Delta \delta + \omega_0 K_{ms} \Delta \delta = 0 \quad (10)$$

进而可推知,水轮机系统的阻尼比可表示为

$$\xi = \frac{K_{md} + K_L + D}{2\sqrt{T_J \omega_0 K_{ms}}} \quad (11)$$

调速系统为系统提供的阻尼特性取决于 K_{md} 参数取值,当 $K_{md}>0$ 时,调速系统为系统提供正阻尼,当 $K_{md}<0$ 时,调速系统提供负阻尼。对于常规负荷而言, K_L 参数取值恒为正,对应发电机阻尼系数 D 亦恒大于0。

在此基础上,由式(11)可知当调速系统超低频段产生的负阻尼较大,使得 $K_{md}+K_L+D \leq 0$ 时,系统呈现不稳定状态,易发生超低频振荡现象。特别是在水电高占比的电力系统,水轮机调速系统的负阻尼效应是造成电力系统发生超低频振荡的主要原因。

1.3 水轮机调速系统阻尼转矩系数求解与分析

当振荡频率为 ω_d 时,将 $s=j\omega_d$ 代入式(5),所得表达式的实部即为水轮机调速系统阻尼转矩系数 K_{md} 的表达式。据此分析影响调速系统在超低频段的阻尼转矩系数 K_{md} 变化的主要因素。

基于图1所示的水轮机调速系统,参考云南典型水电站运行工况,设定调速系统参数 $K_p=5$, $K_i=3$, $K_d=0$, $B_p=0.05$, $K_{p1}=3$, $K_{i1}=K_{d1}=0$, $T_s=0.02$, $T_0=12$,水锤效应时间常数 T_w 分别取1 s,2 s,3 s和4 s,分析水轮机调速系统不同的水锤效应时间常数对调速系统的阻尼转矩系数 K_{md} 的影响,具体如图2所示。

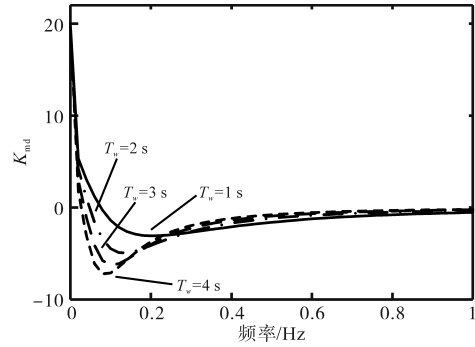


图2 不同 T_w 取值下的阻尼转矩系数

Fig.2 Damping torque coefficient under different T_w

从图2可知,调速系统的阻尼转矩系数 K_{md} 的值在超低频段呈现负阻尼,且 T_w 的值越大, K_{md} 值越小,负阻尼效应越严重。水电站的水锤效应是造成调速系统产生负阻尼的主要原因,且水锤效应时间常数越大,产生的负阻尼越大。

除水锤效应外,相关研究表明调速器PID的参数设置也会影响系统的稳定运行。为此,本文同时基于前文参数设置结果,在给定 $T_w=3$ s前提下,分别选取如下三组不同的PID参数: $K_p=3$, $K_i=1$, $K_d=1$; $K_p=6$, $K_i=2$, $K_d=1$; $K_p=10$, $K_i=3$, $K_d=2$,以分析不同的PID参数对调速系统的阻尼转矩系数 K_{md} 的影响,统计结果如图3所示。

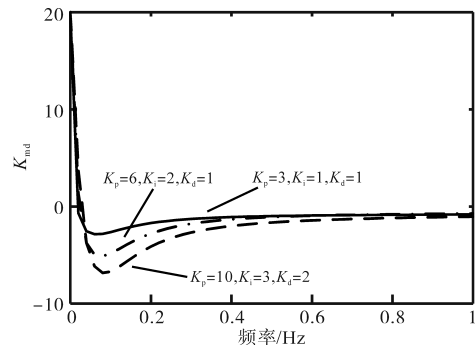


图3 不同的PID下的阻尼转矩系数

Fig.3 Damping torque coefficient under different PID

可见,不同的调速器PID参数设置对调速系统的阻尼转矩系数 K_{md} 的值影响较大,PID参数设置的不合理会加剧水轮机调速系统的负阻尼效应,进而引发电力系统发生超低频振荡现象。

综上所述,水轮机调速系统的水锤效应和调速器PID参数整定不合理是引发系统发生超低频振荡的主要原因。鉴于水锤效应时间常数与水电站建设环节密切相关,难以改变,故而有必要立足于调速器PID参数整定优化和加装附加控制器等方面,针对抑制电力系统超低频振荡的问题进行更深入研究。

2 调速系统的优化控制

2.1 调速侧附加阻尼控制

本文提出一种基于相位补偿原理的调速侧附加阻尼控制策略,该策略通过增大调速系统正阻尼方式,以改善调速系统的阻尼特性。附加阻尼的传递函数如下式所示:

$$G_1(s) = K \frac{sT}{1+sT} \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^m \quad (12)$$

式中: K 为增益; T, T_1, T_2 为时间常数,一般控制器参数需要满足 $T_1 > T_2 > 0$; m 为补偿环节级数。 $sT/(1+sT)$ 为高通滤波环节,可将直流分量隔离,使得阻尼控制仅在动态过程中发挥作用,保证附加控制后系统的稳定性; $[(1+sT_1)/(1+sT_2)]^m$ 为相位补偿环节,可调制阻尼控制环节在低频段处的相移,使得该环节为调速系统提供正阻尼, m 根据补偿需求设置,一般取1~2。

在水轮机调速系统中引入附加阻尼控制,其系统控制模型如图4所示。

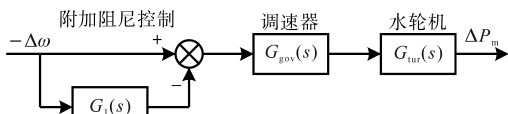


图4 含附加阻尼的调速器系统控制模型

Fig.4 Control model of governor system with additional damping

基于图1所示的水轮机调速系统,设置参数 $K_p=5, K_i=3, K_d=0, B_p=0.05, K_{pi}=3, K_{ii}=K_{di}=0, T_s=0.02, T_o=12, T_w=3$,附加阻尼控制器参数设置为 $K=0.8, T=1, T_1=3, T_2=2, m=2$,以此来分析附加阻尼控制策略加入前、后,调速系统在超低频段的阻尼转矩系数的变化,并与文献[14-15]所采用的串联校正控制策略进行对比,串联校正策略即将控制器直接串联在调速器前,具体对比结果如图5所示。

由图5可知,无附加控制情况下,调速系统在

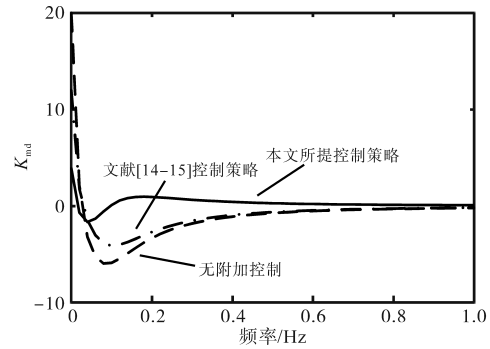


图5 附加控制后 K_{md} 对比

Fig.5 K_{md} comparison after additional control

超低频段处的阻尼转矩系数为负,产生较大的负阻尼,系统易发生超低频振荡。在采用文献[14-15]提出的串联校正附加阻尼控制策略后,相比于无附加控制系统,超低频段的调速系统负阻尼减小,系统超低频振荡发生得到了有效抑制。引入本文所提附加阻尼控制策略后,调速系统在超低频段、低频段的阻尼转矩系数均较其他工况组得到了明显提升,调速系统负阻尼得到有效削减,增强了电力系统对超低频振荡的抑制能力。

2.2 水轮机调速器PID参数整定

调速器PID参数整定与系统的稳定运行密切相关,且 K_p, K_i, K_d 三个参数耦合关系密切,人工整定PID参数存在困难且难以达到最佳控制效果。鉴于GWO算法通过模仿灰狼的狩猎和社会等级行为进行寻优,具有收敛快、求解精度高、稳定性强的特点^[12],本文选用GWO算法来对水轮机调速器的PID参数进行整定。

为保证电力系统在不同的工况下均能表现出良好的调节能力,达到“稳、准、快”的控制效果,参数优化引入绝对误差乘以时间积分(integral of time-multiplied absolute value of error, ITAE)指标,即以ITAE最小化为优化目标,表达式如下:

$$J = \int_0^{t_s} t|e(t)|dt \quad (13)$$

式中: t_s 为仿真总时长; $e(t)$ 为频率(转速)偏差值。

式(13)所示的目标函数可以较好地反映系统的动态性能,同时兼顾系统响应速度以及控制精度两方面调控需求。在此基础上,调速系统PID参数优化模型如下式所示:

$$\begin{cases} \min & J = \int_0^{t_s} t|e(t)|dt \\ \text{s.t.} & \begin{cases} K_{p \min} \leq K_p \leq K_{p \max} \\ K_{i \min} \leq K_i \leq K_{i \max} \\ K_{d \min} \leq K_d \leq K_{d \max} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

GWO算法优化流程如图6所示。

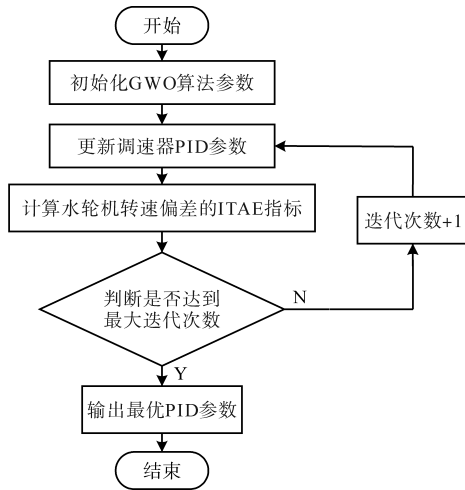


图6 GWO算法优化流程图

Fig.6 GWO algorithm optimization flow chart

3 仿真分析

3.1 单机系统仿真

本节基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建单机单负荷系统。系统包含一台装机容量为 200 MV·A 的水轮机组,具体参考云南典型水电站实际运行工况取定。水轮机调速系统初始参数设为 $K_p=3$, $K_i=0.865$, $K_d=0$, $B_p=0.05$, $K_{p1}=3$, $K_{i1}=K_{d1}=0$, $T_s=0.02$, $T_o=12$, $T_w=2.67$ 。调速器 PID 参数整定过程中, K_p , K_i 的范围设置为 $[0, 10]$, K_d 的范围设置为 $[0, 2]$, 算法最大迭代次数设为 20。

设置仿真时间为 200 s,在初始扰动下,系统出现超低频振荡现象,振荡波动幅值约为 ± 0.025 Hz,振荡频率为 0.09 Hz,不改变系统参数,在调速侧采用附加控制策略后,超低频振荡消失,系统的频率偏差曲线如图7所示,不同控制性能对比如表1所示。

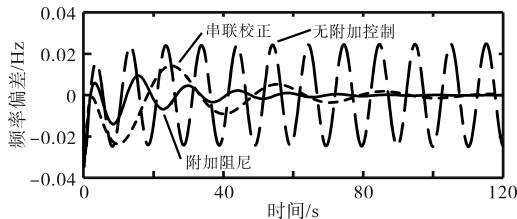


图7 单机系统不同附加控制下的频率偏差

Fig.7 Frequency deviation of single machine system under different additional control

表1 单机系统超低频振荡下不同附加控制性能比较

Tab.1 Comparison of different additional control performances under ultra-low frequency oscillation in single machine system

控制方法	调节时间/s	最大频率偏差/Hz	ITAE
串联校正	120	0.026	13.8
附加阻尼	80	0.014	6.10

据图7与表1分析可知,串联校正以及附加阻尼控制策略均能改善系统阻尼特性,有效抑制超低频振荡。串联校正策略介入后,系统最大频率偏差值为 0.026 Hz,并在运行 120 s 后振荡消失,系统恢复稳定,全过程 ITAE 指标值为 13.8。附加阻尼控制工况下,超低频振荡最大频率偏差值降至 0.014 Hz,振荡消失时间提前至运行后 80 s,全过程 ITAE 指标值下降 7.7,附加阻尼控制工况下,系统超低频振荡抑制能力明显改善。

针对上述单机系统发生的超低频振荡现象,无附加控制的情况下,采用 GWO 算法对调速器 PID 参数进行整定,并与传统粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法进行对比。优化过程中,粒子群数量和狼群数量均设为 30。GWO 算法参数优化结果为 $K_p=2.34$, $K_i=0.332$, $K_d=0$, PSO 算法参数优化结果为 $K_p=3.12$, $K_i=0.538$, $K_d=0$ 。对应的调速器 PID 参数优化收敛过程及系统频率偏差统计结果分别如图8、图9所示。

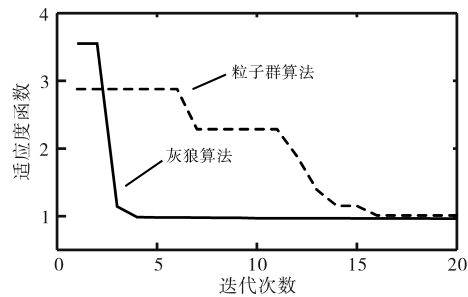


图8 单机系统不同算法适应度函数

Fig.8 Single machine system fitness function of different algorithms

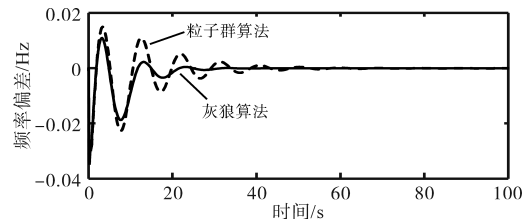


图9 单机系统不同算法整定后的系统频率偏差

Fig.9 System frequency deviation of single machine system after different algorithm tuning

上述结果表明,改善的运行参数有助于抑制系统超低频振荡现象。此外,图8结果同时显示了 GWO 算法收敛速度更快,较之于 PSO 算法迭代 16 次方才收敛的结果,GWO 算法仅需要 4 次迭代即可实现参数收敛,且对应适应度取值更低,优化效果更好。

由图9可知,系统在初始扰动下,与 PSO 算法相比,系统在 GWO 算法整定参数下运行,频率的超调量更小,调节时间更短,系统稳定性更强。

综上所述,单机系统中采用 PSO 算法和 GWO 算法对调速器 PID 参数进行整定,可以有效改善调速系统阻尼,抑制超低频振荡,仿真实验表明 GWO 算法的整定效果要优于 PSO 算法。

为探究附加控制在优化参数下的控制表现,针对 GWO 算法优化参数下的附加阻尼控制效果进行仿真实验。设置调速器 PID 参数为 $K_p=2.34$, $K_i=0.332$, $K_d=0$, 在最优参数下,系统在机组启动后分别设置 10% 的频率扰动、10% 的负荷扰动,对分别采用串联校正和附加阻尼两种控制策略进行仿真,仿真的频率偏差如图 10 所示,控制性能对比如表 2 所示。

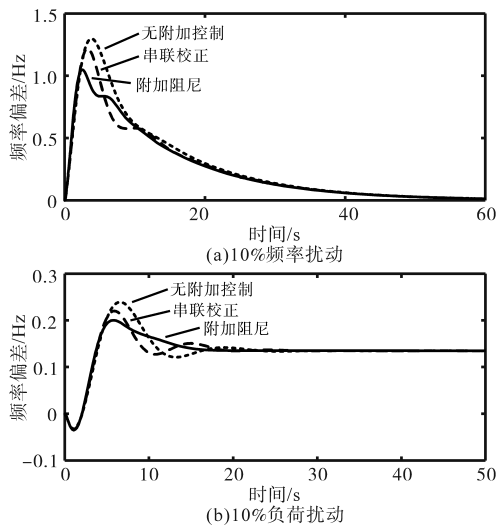


图 10 优化参数下不同附加控制的系统频率偏差

Fig.10 System frequency deviation of different additional control under optimization parameters

表 2 单机优化参数下不同附加控制性能比较

Tab.2 Comparison of different additional control performance under single machine optimization parameters

扰动类型	控制方法	最大频率偏差/Hz	ITAE
频率扰动	串联校正	1.22	208
	附加阻尼	1.05	200
负荷扰动	串联校正	0.22	2 550
	附加阻尼	0.19	2 500

图 10 结果表明,向系统施加 10% 的频率扰动,较之于无附加控制工况,引入串联校正以及附加阻尼控制策略均能够有效降低系统频率偏差。如表 2 所示,同步引入串联校正策略后,系统的最大频率偏差降为 1.22 Hz,振荡全过程 ITAE 指标值为 208。而附加阻尼控制工况下,系统的最大频率偏差进一步降至 1.05 Hz,全过程 ITAE 指标值亦降低至 200。

向系统施加 10% 的负荷扰动后,随着串联校

正策略的介入,系统对应最大频率偏差为 0.22 Hz,全过程 ITAE 指标值为 2 550。与之相对应的是附加阻尼控制工况下,系统的最大频率偏差进一步降至 0.19 Hz,对应全过程 ITAE 指标值为 2 500。可见,附加阻尼控制策略能够有效应对系统频率、负荷波动问题,对应系统的超调量更小,全过程 ITAE 指标更低,控制性能更为理想。

由此可知,通过优化调速器 PID 参数,并采用串联校正及附加阻尼控制,能进一步提升系统稳定性。结合图 7 所示结果可知,所提附加阻尼控制策略在 PID 参数整定前后,均能针对系统抑制超低频振荡问题,附加阻尼控制策略具有更强抑制能力。

基于上述分析可知,本文所提附加阻尼控制策略能够有效改善单机调速系统的阻尼特性,提升系统总阻尼。并通过优化调速器参数整定方式,进一步增强系统超低频振荡抑制能力。

3.2 四机两区域系统仿真

针对多机系统,本节在 Matlab/Simulink 中搭建四机两区域系统,该系统的拓扑图如图 11 所示。系统配置 900 MV·A 的 4 台水电机组,区域 1 向区域 2 输送有功功率为 413 MW。4 台水轮机参数设置相同,调速器系统初始参数为 $K_p=6.91$, $K_i=6$, $K_d=0$, $B_p=0.05$, $K_{pi}=3$, $K_{ii}=K_{di}=0$, $T_s=0.02$, $T_o=12$, $T_w=2.67$ 。4 台机组的励磁系统均配置多频段电力系统稳定器 (multi-band power system stabilizer, MB-PSS)。PID 参数整定过程中, K_p, K_i 的范围设置为 $[0, 10]$, K_d 的范围设置为 $[0, 2]$, 优化算法最大迭代次数设为 20。

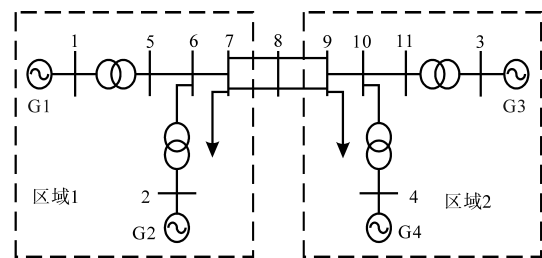


图 11 四机两区域系统示意图

Fig.11 Four-machine two-area system diagram

设置仿真时间为 100 s,在初始扰动下,系统出现超低频振荡现象,振荡频率为 0.08 Hz,4 台机组均发生振荡,且振荡一致,频率偏差如图 12a 所示。如图 12b 所示,区域 1 传输到区域 2 的有功功率也发生了振荡,幅值在 200 ~ 605 MW。不改变系统参数,在调速侧采用附加控制策略后,系统的阻尼特性得到改善,系统频率偏差变化曲线如

图 12c 所示,系统在运行后,超低频振荡现象消失,频率偏差值为 0,系统稳定运行。如图 12d 所示,区域 1 到区域 2 之间的传输有功功率振荡消失,传输有功功率保持在 413.4 MW,两种附加控制性能对比如表 3 所示。

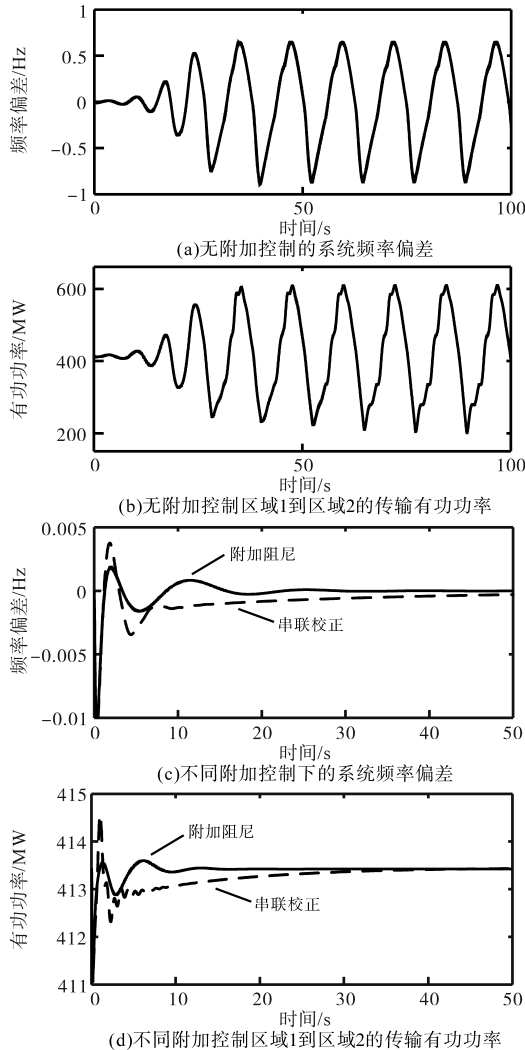


图 12 多机系统不同附加控制下运行情况对比

Fig.12 Comparison of operation situation of multi-machine system under different additional control

表 3 多机系统不同附加控制性能比较

Tab.3 Comparison of control performance of multi-machine system under different additional control

控制方法	最大频率偏差/Hz	ITAE	调节时间/s
串联校正	0.004	4.75	50
附加阻尼	0.002	0.48	25

据图 12c、图 12d 和表 3 分析可知,在多机系统中,串联校正以及附加阻尼控制策略均能提高系统正阻尼。串联校正策略介入后,系统的最大频率偏差为 0.004 Hz,调节时间为 50 s,全过程

ITAE 指标为 4.75。附加阻尼工况下,系统最大频率偏差降为 0.002 Hz,调节时间降为 25 s,全过程 ITAE 指标降为 0.48。串联校正以及附加阻尼控制策略均有效地抑制了超低频振荡,附加阻尼控制工况下,系统的稳定性更强。

针对多机系统发生的超低频振荡现象,在无附加控制的情况下,采用 GWO 算法对调速器 PID 参数进行整定,并与传统 PSO 算法进行对比,粒子群数量和狼群数量均设为 30。GWO 算法参数优化结果为 $K_p=4.51, K_i=3.12, K_d=0$, PSO 算法参数优化结果为 $K_p=5.11, K_i=3.26, K_d=0$ 。两种优化算法下,系统参数迭代收敛过程如图 13 所示,对应系统运行的频率偏差如图 14 所示。

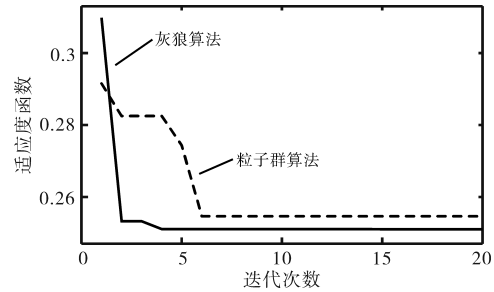


图 13 多机系统不同算法适应度函数

Fig.13 Different algorithm fitness functions of multi-machine system

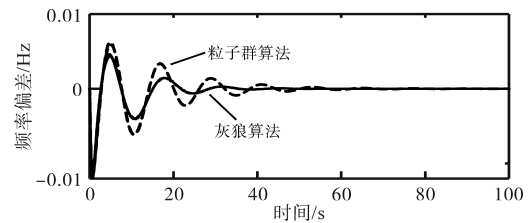


图 14 多机系统不同算法整定后的系统频率偏差

Fig.14 System frequency deviation after different algorithm tuning in multi-machine system

基于图 13、图 14 结果可知,四机两区域系统中,采用优化算法对调速器 PID 参数整定后,超低频振荡现象消失,并在振荡开始 30 s 内恢复稳定运行,系统四台机组频率变化一致。此外,图 13 结果同时显示,GWO 算法较之于传统 PSO 算法迭代次数明显下降,且对应优化结果适应度函数取值更低,优化结果更为理想。这一结果的出现与图 14 中 GWO 算法介入后,系统频率超调量以及调节时间指标进一步降低的结果相吻合,进一步验证了所提策略在提升系统稳定性方面的有效性。

进一步探究附加控制在 GWO 算法优化参数下的控制表现。设置调速器 PID 参数为 $K_p=4.51,$

$K_i=3.12, K_d=0$, 在最优参数下, 系统在节点7、节点9之间的传输线路上设置三相短路故障, 分别对采用串联校正控制策略和附加阻尼控制策略两种情况进行仿真, 仿真频率偏差曲线如图15所示, 控制效果对比如表4所示。

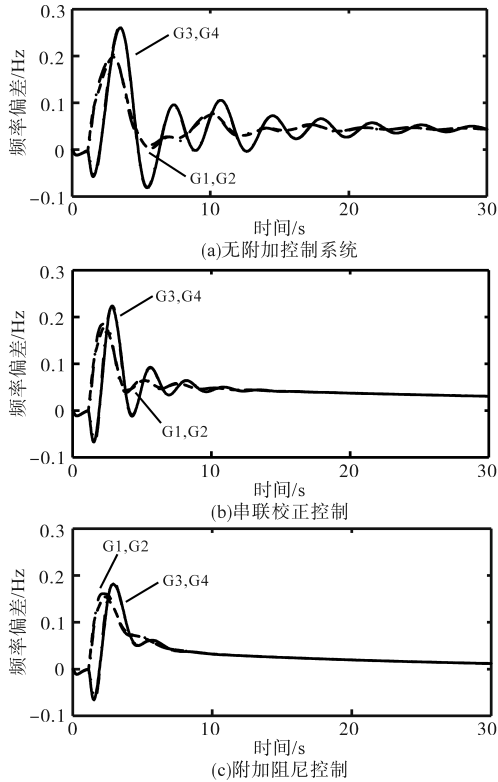


图15 多机系统优化参数下不同附加控制的系统频率偏差

Fig.15 System frequency deviation of different additional control of multi-machine system under optimization parameters

表4 多机系统最优参数不同附加控制性能比较

Tab.4 Performance comparison of different additional control of multi-machine system under optimization parameters

控制方法	最大频率偏差/Hz	ITAE	振荡次数
串联校正	0.22	341	3
附加阻尼	0.17	87.5	0.5

据图15和表4进行分析, 在GWO算法优化的参数下, 无附加控制下系统以频率偏差值为0.045 Hz的方式运行。串联校正策略介入后, 系统的最大频率偏差为0.22 Hz, 全过程ITAE指标值为341, 系统运行180 s后以频率偏差为0稳定运行。采用附加阻尼控制策略后, 系统的频率偏差下降至0.17 Hz, 全过程ITAE指标值下降为87.5, 系统运行60 s后以频率偏差为0稳定运行。在优化参数下, 串联校正和附加阻尼控制策略下系统的抗干扰能力增强, 且附加阻尼控制策略下, 系统的抗干扰能力更强。

综上所述, 所提附加阻尼控制策略在多机系统中, 亦可通过增加调速系统正阻尼的方式改善系统阻尼特性, 进而有效抑制超低频振荡。此外, 所提策略同时能够基于GWO算法优化调速器参数设置, 进一步提升系统的抗干扰性能。

4 结论

针对水轮机调速系统引发的超低频振荡问题, 提出一种基于附加阻尼控制的抑制策略。所提策略在明晰系统超低频振荡诱发机理基础上, 通过引入附加阻尼控制, 以改善系统的阻尼特性。在此基础上, 基于GWO算法优化调速器PID参数, 以进一步增强系统超低频振荡抑制能力。文章所得结论概述如下:

1) 调速系统产生的负阻尼效应是电力系统发生超低频振荡的主要原因, 该效应与水轮机的水锤效应和调速器PID参数密切相关。

2) 所提附加阻尼控制策略通过相位补偿的方法, 可为调速系统提供正阻尼, 改善系统阻尼特性。

3) 在单机和多机系统中, 附加阻尼控制策略可有效抑制超低频振荡, 在此基础上, 配合GWO算法对调速器PID参数进行整定, 可以进一步提升系统的抗干扰能力, 有利于电力系统的稳定运行。

参考文献

[1] 袁小威, 王金梅, 苗海东, 等. 基于LCC的高压直流输电换流站无功功率控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 14-19. YUAN Xiaowei, WANG Jinmei, MIAO Haidong, et al. Research on reactive power control strategy of HVDC converter station based on LCC[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 14-19.

[2] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29-34. LIU Chunxiao, ZHANG Junfeng, CHEN Yiping, et al. Mechanism analysis and simulation on ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 29-34.

[3] 陈亦平, 程哲, 张昆, 等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 96-102. CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 96-102.

[4] 贺静波, 张剑云, 李明节, 等. 直流孤岛系统调速器稳定问题的频域分析与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 137-143. HE Jingbo, ZHANG Jianyun, LI Mingjie, et al. Frequency do-

- main analysis and control for governor stability problem in islanded HVDC sending systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 137-143.
- [5] GENCOGLU C, TOR O B, CEBECE E, et al. Assessment of the effect of hydroelectric power plants' governor settings on low frequency inter area oscillations[C]//International Conference on Power System Technology, IEEE, 2010.
- [6] VILLEGAS Pico H, MCCALLEY J D, ANGEL A, et al. Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1906-1915.
- [7] 王官宏,陶向宇,李文锋,等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 80-86.
WANG Guanhong, TAO Xiangyu, LI Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [8] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
LU Xiaomin, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64-70.
- [9] 陈磊,路晓敏,陈亦平,等. 利用暂态能量流的超低频振荡在线分析与紧急控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 9-14.
CHEN Lei, LU Xiaomin, CHEN Yiping, et al. Online analysis and emergency control of ultra-low-frequency oscillations using transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 9-14.
- [10] 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.
- [11] GUO Lei, XU Chang, YU Tianhang, et al. An improved mayfly optimization algorithm based on median position and its application in the optimization of PID parameters of hydro-turbine governor[J]. IEEE Access, 2022, 10: 36335-36349.
- [12] 周克良,邓飞翔,王威. 基于IGWO-PID预测算法的水轮机调速控制[J]. 现代电子技术, 2021, 44(23): 121-125.
ZHOU Keliang, DENG Feixiang, WANG Wei. Hydraulic turbine speed control based on IGWO-PID prediction algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(23): 121-125.
- [13] 何伟,熊俊杰,赵伟哲,等. 一种虚拟同步发电机的附加阻尼控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 18-24.
HE Wei, XIONG Junjie, ZHAO Weizhe, et al. Research on an additional damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 18-24.
- [14] 熊鸿韬,汪宗恒,尚磊,等. 一种用于电力系统低频振荡抑制的新能源电站阻尼注入控制器设计及特性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2690-2698.
XIONG Hongtao, WANG Zongheng, SHANG Lei, et al. Damping injection controller of renewable energy for power system low frequency oscillation mitigation and its dynamic characteristics analysis[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2690-2698.
- [15] 许寅,王佳璇,吴翔宇,等. 水光互补发电系统超低频振荡抑制控制策略研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(12): 1248-1257.
XU Yin, WANG Jiakuan, WU Xiangyu, et al. Suppression control strategy of ultra-low frequency oscillation in hydro-PV complementary generation system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12): 1248-1257.

收稿日期:2022-08-15
修改稿日期:2022-09-01