

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.013

基于特性曲线的水轮机调速器新型功率调节模式研究

李桂林¹, 冯 陈¹, 张玉全¹, 蔡卫江², 杜玉照², 郑 源¹

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要: 为了提升水电机组的快速响应能力和运行稳定性, 针对基于水轮机特性曲线的调速器新型功率调节模式, 建立机组仿真模型研究了该模式下机组的阻尼特性、频率特性及稳定性, 并提出了新型功率调节模式的两种改进策略。结果表明: 相较于传统的功率调节模式, 新型功率调节模式下机组的负阻尼更大, 在小网运行时稳定性更差, 但是在电网运行时调频速动性更好; 插值输出控制策略与导叶速率控制策略均能有效抑制功率反调, 但是均略微降低了系统一次调频速动性, 其中导叶速率控制策略对功率反调的抑制效果更好, 插值输出控制策略对调速器其他调节功能的兼容性更强。

关键词: 水轮机调速器; 功率调节模式; 一次调频; 水锤效应

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0110-09

Research on a novel power regulation mode of water turbine governor based on characteristic curve

LI Guilin¹, FENG Chen¹, ZHANG Yuquan¹, CAI Weijiang², DU Yuzhao², ZHENG Yuan¹

(1. College of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: To enhance the rapid response capability and operational stability of hydraulic generating units, a unit simulation model was established to investigate the damping characteristics, frequency characteristics, and stability under the novel power regulation mode of the governor derived from water turbine characteristic curves. Two improved strategies for the novel power regulation mode were developed. Results demonstrate that compared with conventional power regulation modes, the novel power regulation mode exhibits greater negative damping of the units, leading to inferior stability in small-grid operations but better frequency-modulated fast-acting in large-grid operations. Both the interpolation output control strategy and the guide vane speed control strategy can effectively suppress reverse regulation of power but both partially sacrifice the system's primary frequency-modulated fast-acting. The guide vane speed control strategy shows superior suppression of reverse regulation of power, whereas the interpolation output control strategy offers better compatibility with other governor regulation functions.

Key words: water turbine governor; power regulation mode; primary frequency regulation; water hammer effect

水电机组凭借启停迅速、效率高、调度灵活等优势, 在网源协同系统中发挥着至关重要的作用^[1-3]。随着“双碳”目标的提出^[4]、电网“两个细则”考核指标的实施^[5]以及大规模新能源电力系统的接入^[6], 电力系统对水电机组的一次调频性能提出了更高要求^[7], 这给调速器性能带来了新的挑战^[7-8]。通常情况下, 根据反馈信号的差异, 水轮机调速器的主要工作模式可分为频率调节模式、功率调节模式和开度调节模式^[9]。然而, 现有的调节模式存在明显局限, 频率调节模式仅适用于空载和小网运行工况; 在并大网运行时, 开度调节模式的调节速度不足, 功率调节模式的稳定性不高^[10]。程远楚等^[11-12]研究表明水轮机调速器的控制调节作用恶化了系统阻尼特性; 何胜明等^[13-14]通过建立水力-机械-电气精细化模型, 分析了开度调节模式和功率调节模式在小扰动下的稳定性, 发现调速器的控制参数设置不合理易引发超低频振荡。此外, 传统功率调节模式和

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209110, 52339006, 25171257); 中国博士后科学基金项目(2022M711017); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B220202005); 江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介: 李桂林(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水轮机自动控制研究。E-mail: 1945871663@qq.com

引用本文: 李桂林, 冯陈, 张玉全, 等. 基于特性曲线的水轮机调速器新型功率调节模式研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 110-118.

LI Guilin, FENG Chen, ZHANG Yuquan, et al. Research on a novel power regulation mode of water turbine governor based on characteristic curve[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 110-118.

开度调节模式还会导致一次调频与自动发电控制(automatic generation control, AGC)之间的矛盾,进而削弱机组的一次调频能力^[2,15]。

为改善水轮机调速器的控制能力,刘少博等^[16]采用阻尼转矩法分析了原动机调节系统在功率闭环下的负阻尼现象,并提出了基于相位补偿的调速器侧电力系统稳定器(governor power system stabilizer, GPSS)控制方法,以提高水轮机控制系统稳定性;马晓伟等^[17]建立了多级频率控制模型,并利用粒子群优化算法优化参数以抑制电网超低频振荡;史华勃等^[18]、Wang 等^[19]、Yan 等^[20]分别采用智能算法、奈奎斯特曲线、粒子群算法对水轮机调速器参数进行多目标优化,兼顾了系统的稳定性与一次调频的快速性。

为了提高调速器对不同水头的适应性,并缓解一次调频与 AGC 之间的矛盾,国内已有部分电站采用新型功率调节模式^[21]。然而,现有研究大多基于水轮机的传统功率调节模式和开度调节模式,尚缺少针对新型功率调节模式的进一步深入研究。因此,本文建立水轮机线性和非线性模型,采用特征值法和阻尼转矩法对水轮机新型功率调节模式进行详细分析,并提出改进策略,以期为该模式的规模化应用提供理论基础。

1 新型功率调节模式及建模

1.1 新型功率调节模式介绍及调速器系统建模

新型功率调节模式是在传统功率调节模式基础上的改进。当监控系统接收到来自上级 AGC 的功率指令或电网频率偏差信号时,传统功率调节模式将偏差信号输入比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器,逐渐调整导叶开度至与目标功率对应的稳态开度,其具体控制结构见图 1。

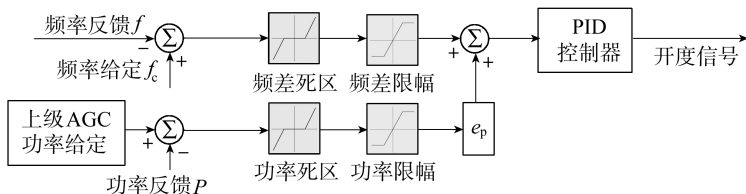


图 1 传统功率调节模式控制结构

Fig. 1 Traditional power regulation mode control structure

传统功率调节模式的状态方程为

$$-K_p\Delta\dot{f}-\Delta\dot{u}-K_p e_p\Delta\dot{P}_t=K_i\Delta f+K_i e_p\Delta P_t \tag{1}$$

式中: Δf 为频率偏差相对值; Δu 为 PID 控制器输出的开度偏差相对值; ΔP_t 为功率偏差相对值; e_p 为功率调差系数; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。然而,传统功率调节模式的动态响应较慢,其调节过程需较长时间才能达到稳态。尽管其调节速度优于同参数下的开度调节模式,但仍有改进空间。若为加快调节速度而将 PID 参数设置较大,会引起较大水锤效应,进而导致超低频振荡等现象,因此需要对传统功率调节模式进行改进。

新型功率调节模式的基本流程如下:当系统接收到电网频率偏差或上级 AGC 的功率给定偏差时,计算出目标功率;同步测量当前机组运行水头,根据水轮机运转特性曲线,通过插值算法计算出与该目标功率和水头对应的稳态目标导叶开度;当导叶开度调整至目标开度附近时,切换为 PID 控制器进行微调,从而缩短调节时间。新型功率调节模式的具体控制结构见图 2。

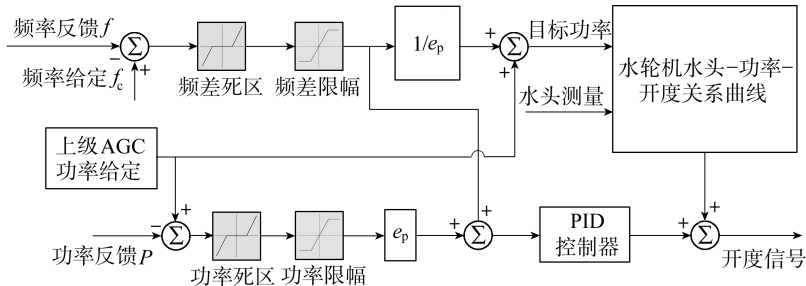


图 2 新型功率调节模式控制结构

Fig. 2 Novel power regulation mode control structure

在小扰动条件下,定义水轮机力矩对导叶开度的传递系数为 e_y 。根据水轮机力矩方程,当系统处于稳态时,转速、水头均不变,因此,可得到水轮机功率 P_t 与导叶开度 y 之间的关系为

$$\Delta P_t = e_y \Delta y \tag{2}$$

式中 Δy 为导叶开度的变化量。

在一次调频过程中,功率给定值保持不变,则有 $\Delta P_t = \Delta f / e_p$,故可得新型功率调节模式调速器的状态方程为

$$-(1/e_p e_y + K_p) \Delta \dot{f} - \Delta \dot{u} - K_p e_p \Delta \dot{P}_t = K_i \Delta f + K_i e_p \Delta P_t \tag{3}$$

为分析新型功率调节模式在小扰动工况下的频率特性、阻尼特性等,本文对执行机构进行简化,简化后的执行机构状态方程为

$$T_y \Delta \dot{y} = -\Delta y + \Delta u \tag{4}$$

式中 T_y 为接力器响应时间常数。

1.2 机组其他部分建模

1.2.1 水轮机

水轮机结构复杂,其流场中的流态也较为复杂,故通常用水轮机力矩、流量特性描述其动态特性。通过水轮机模型综合特性曲线可获得单位力矩、单位流量、单位转速以及导叶开度之间的关系(式(5)),从而建立水轮机系统非线性模型。

$$\begin{cases} M_{11} = F(y, n_{11}) \\ Q_{11} = G(y, n_{11}) \end{cases} \tag{5}$$

式中: Q_{11} 、 M_{11} 、 n_{11} 分别为水轮机单位流量、单位力矩和单位转速; $F(\cdot)$ 为单位力矩关于开度和单位转速的非线性映射; $G(\cdot)$ 为单位流量关于开度和单位转速的非线性映射。为定性分析新型功率调节模式的特性,在额定工况点对水轮机非线性模型进行线性化,建立水轮机的线性化模型如下:

$$\begin{cases} \Delta P_t = e_x \Delta f + e_y \Delta y + e_h \Delta h \\ \Delta q = e_{qx} \Delta f + e_{qy} \Delta y + e_{qh} \Delta h \end{cases} \tag{6}$$

式中: Δq 为流量偏差相对值; Δh 为水压偏差相对值; e_x 、 e_h 分别为水轮机出力对水轮机转速 x 、水头 h 的传递系数; e_{qx} 、 e_{qy} 、 e_{qh} 分别为流量 q 对水轮机转速、导叶开度、水头的传递系数。

1.2.2 引水系统

引水系统的运动方程和连续性方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f_l}{2gDA^2} \frac{Q^3}{Q} = 0 \\ \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中: Q 为微管段的流量; H 为微管段的测压管水头; l 为微管段长度; D 为微管段直径; A 为微管段横截面积; c 为水击波速; f_l 为摩阻系数; g 为重力加速度; t 为时间。采用特征线法,引入上下游水库、压力钢管、水轮机节点等边界条件,建立了过水系统非线性模型。同时,采用解析建模法建立管道线性水击模型,其在弹性水击理论下的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{\Delta h}{\Delta q} = \frac{-T_w s}{1 + 0.125 T_r^2 s^2} \tag{8}$$

式中: $G_p(\cdot)$ 为管道流量对管道水压的传递函数; T_w 为水流惯性时间常数; T_r 为水击相长时间常数; s 为拉普拉斯变量。

1.2.3 发电机及负载系统

本文主要研究机组频率特性,该特性与机械功率相关性强,因此采用简化电磁部分参数的发电机一阶模型,得到同步发电机的状态方程为

$$\Delta \dot{f} = -\frac{e_g}{T_a} \Delta f + \frac{1}{T_a} \Delta P_t \tag{9}$$

式中: T_a 为机组惯性时间常数; e_g 为发电机负载自调节系数。

2 新型功率调节模式并小网特性分析

在机组并入小网运行工况下, 机组的频率稳定性是研究的主要目标。为检验新型功率调节模式在小网中的运行稳定性, 本文建立了单机带负荷模型, 采用发电机一阶模型, 研究机组在新型功率调节模式下受扰动后, 关键参数变化对其频率稳定性的影响。

联立式(1)~(9)可得新型功率调节模式下机组状态方程为

(Δḟ, Δu̇, Δẏ, Δḣ₁, Δḣ) = A · (Δf, Δu, Δy, Δh₁, Δh) (10)

其中

Δh₁ = Δḣ

A = [a₁₁ -1 a₁₃ 0 a₁₅]⁻¹ · [b₁₁ 0 b₁₃ 0 b₁₅]

[0 0 a₂₃ 0 0]

[a₃₁ 0 0 0 0]

[0 0 0 0 1]

[a₅₁ 0 a₅₃ a₅₄ a₅₅]

[b₃₁ 0 b₃₃ 0 b₃₅]

[0 0 0 1 0]

[0 0 0 0 -1]

a₁₁ = -K_pe_pe_x - 1/e_pe_y - K_p a₁₃ = -K_pe_pe_y a₁₅ = -K_pe_pe_h a₂₃ = T_y a₃₁ = T_a

a₅₁ = T_we_{qx} a₅₃ = T_we_{qy} a₅₄ = 0.125T_r² a₅₅ = T_we_{qh} b₁₁ = K_i + K_ie_pe_x

b₁₃ = K_ie_pe_y b₁₅ = K_ie_pe_h b₃₁ = e_x - e_g b₃₃ = e_y b₃₅ = e_h

求解状态矩阵 A 可得到系统的特征根, 第 i 个特征根的值: λ_i = α_i + β_ij (i = 1, 2, ..., 5), 其中, α_i 为第 i 个特征根的实部, β_i 为第 i 个特征根的虚部。根据矩阵稳定性判定理论, 当矩阵所有特征根的 α_i 均小于 0 时, 系统的阻尼为正, 受到扰动后会趋于稳定。系统的阻尼比可表示为

ξ_i = -α_i / √(α_i² + β_i²) (11)

式中 ξ_i 为第 i 个振荡模式下的阻尼比。取所有振荡模式的最小阻尼比 ξ_{min} 作为主要指标来判定系统的稳定性, 当 ξ_{min} < 0 时, 系统为不稳定状态。

本文仿真计算采用的参数值源自某实际电站的模型数据^[9,14]: e_{qy} = 0.6, e_{qx} = 0.11, e_{qh} = 0.5, e_x = -0.9, e_h = 1.5, e_g = 1, T_y = 0.2, T_w = 2.5, T_r = 0.23, T_a = 9, e_p = 0.04。

图 3 和图 4 给出了 e_y 及调速器参数变化对新型功率调节模式系统最小阻尼比的影响。从图 3 可以看出, 相较于调速器参数 K_p 的变化, e_y 的变化对新型功率调节模式系统稳定性的影响更为显著; 当 e_y 增大时, 系统稳定性增大; 而当 e_y 较小时, 系统稳定性则很差。对比图 4(a)(b) 与图 4(c)(d) 可知, 传统功率调节模式系统的稳定性受 e_y 的影响显著小于新型功率调节模式, 说明在水轮机侧, e_y 的变化不会对传统功率调节模式机组的稳定性产生过大影响。由式(1)和式(3)可知, e_y 对新型功率调节模式调速器侧的影响在于增加了一个等效的比例环节 1/e_ye_p, 且由于 1/e_ye_p 远大于 K_p, 因此, e_y 变化对调速器稳定性的影响占据主导地位。由式(2)可知, 当 e_y 较大时, 功率变化导致的开度变化较小, 因此稳定性较好。因此, 新型功率调节模式更适用于 e_y 较大的工况或 e_y 较大的水轮机组。

图 4(a)(b) 可以验证前文关于“新型功率调节模式稳定性受 e_y 影响较大”的结论。对比图 4(a)(b) 与图 4(c)(d) 可知, 传统功率调节模式与新型功率调节模式的系统阻尼比随调速器参数 K_p、K_i 的变化规律相似, 即当 e_y 较小时, K_p、K_i 增大会导致系统稳定性下降, 而当 e_y 较大时, 若 K_p 增大而 K_i 保持不变, 系统稳定性会略微增大, 且该趋势随 K_i 的增大而更加明显。然而, 在相同参数条件下, 新型功率调节模式的最小阻尼比低于传统功率调节模式, 对应的系统稳定性更差。

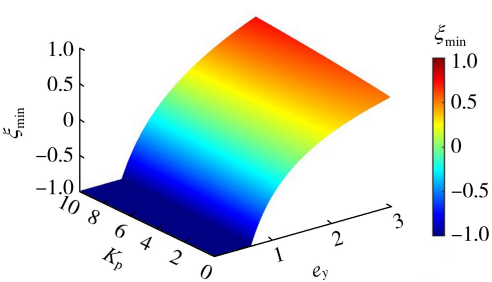


图 3 不同 e_y 下新型功率调节模式系统最小阻尼比随 K_p 的变化

Fig. 3 Variation of system's minimum damping ratio of novel power regulation mode with K_p under different e_y values

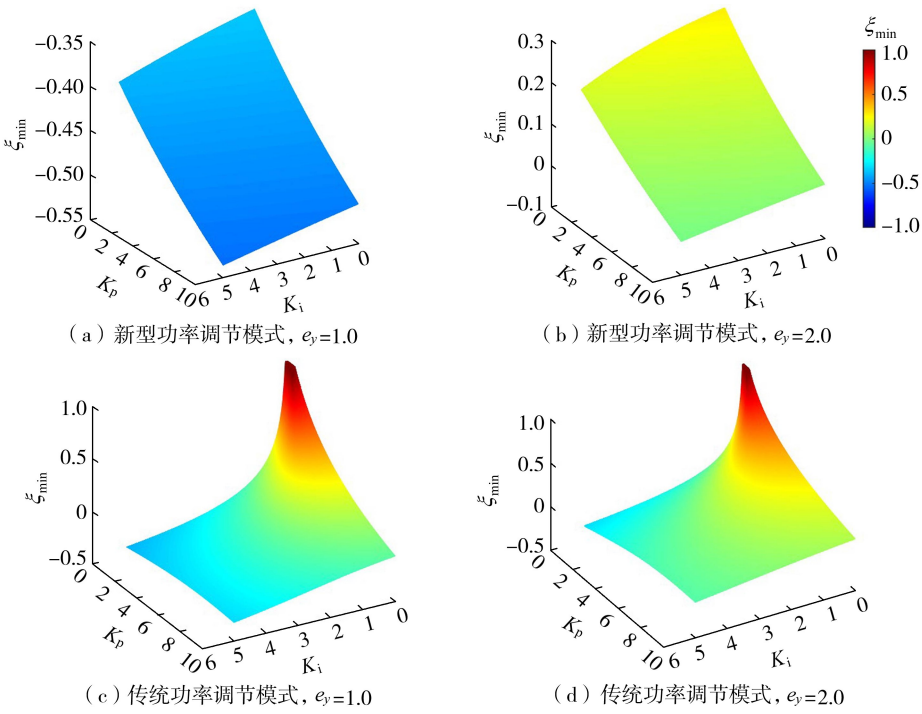


图 4 调速器参数变化对两种功率调节模式系统最小阻尼比的影响

Fig. 4 Impact of governor parameter variations on system's minimum damping ratio with two power regulation modes

图 5 给出了不同 e_y 下两种模式的单机闭环频率响应曲线,其中 $f^* = f/50$ 。由图 5 可见,当 e_y 较小时,新型功率调节模式出现了频率振荡,验证了前文关于其稳定性较差的结论;而当 e_y 较大时,相较于传统功率调节模式,新型功率调节模式的速动性更好。因此,尽管采用新型功率调节模式的水电机组具有速动性好的优势,但是其稳定性不足的问题使其不适合在小网中运行。

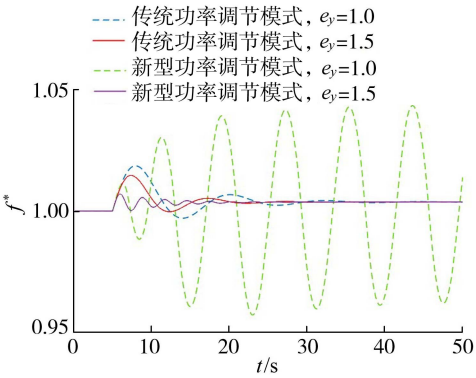


图 5 不同 e_y 下两种功率调节模式单机闭环频率响应曲线 ($K_p=2.0, K_i=2.0$)

Fig. 5 Single-machine closed-loop frequency response curves for two power regulation modes under different e_y values ($K_p=2.0, K_i=2.0$)

3 新型功率调节模式并大网特性分析

3.1 阻尼特性

在分析机组的阻尼特性时,通常采用 Phillips-heffron 模型^[9],该模型是发电机组单机无穷大系统的线性化描述。为确定输入发电机转子中的机械功率,根据图 6 所示的新型功率调节模式水轮机-调速器系统结构,可得出该模式下水轮机-调速器系统的传递函数为

$$G_{sys}(s) = \frac{\Delta P_t}{-\Delta \omega} = \frac{[(1/e_y e_p + K_p)s + K_i][e_y(1 + 0.125T_r^2s^2) - ET_ws]}{(T_y s + 1)[(1 + 0.125T_r^2s^2) + e_{qh}T_ws]s + [e_y(1 + 0.125T_r^2s^2) - ET_ws]e_p K_i}$$
 (12)

其中 $E = e_{qy}e_h - e_{qh}e_y$

式中 $\Delta \omega$ 为角频率偏差相对值。

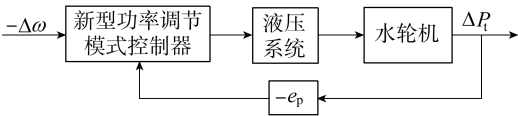


图 6 新型功率调节模式水轮机-调速器系统结构

Fig. 6 Water turbine and governor system structure under novel power regulation mode

水轮机-调速器系统输出的机械功率 P_l 作用于发电机转子上,此时发电机转子的运动方程为

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_l - \Delta P_e - D\Delta\omega \\ \Delta\omega = \frac{d\Delta\delta}{\omega_0 dt} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω_0 为系统基准角频率; M 为转子惯性时间常数; $\Delta\delta$ 为转子角增量; ΔP_e 为发电机电磁功率增量。根据阻尼转矩理论,需将机械功率与发电机转子转速偏差通过复转矩方法建立联系,从而分解出与 $-\Delta\omega$ 同相的阻尼转矩和与 $-\Delta\omega$ 正交的同步转矩。令 $s = j\omega_d$,代入式(12)可得:

$$-\Delta P_l = \text{Re}[G_{\text{sys}}(j\omega_d)]\Delta\omega - j\text{Im}[G_{\text{sys}}(j\omega_d)]\Delta\omega \quad (14)$$

令

$$D_G = \text{Re}[G_{\text{sys}}(j\omega_d)] \quad D_S = \text{Im}[G_{\text{sys}}(j\omega_d)]$$

式中: D_G 为阻尼转矩系数; D_S 为同步转矩系数; ω_d 为系统振荡角频率。 D_G 反映了机组提供的阻尼大小,当 $D_G > 0$ 时,水轮机-调速器系统提供正阻尼,阻碍系统转速变化,使系统趋于稳态;当 $D_G \leq 0$ 时,水轮机-调速器系统提供负阻尼或无阻尼,加剧或保持系统的转速变化,降低系统稳定性。

图 7 给出了不同 e_y 下新型功率调节模式的水轮机-调速器系统的阻尼转矩系数随系统频率的变化曲线,同时给出了相同模型与参数下传统功率调节模式的对应曲线。由图 7 可见,相较于传统功率调节模式,新型功率调节模式的负阻尼在不同 e_y 取值下都很大,表明系统稳定性较差;传统功率调节模式的较大负阻尼主要集中在超低频区域(频率小于 0.1 Hz),而新型功率调节模式的较大负阻尼则主要位于低频区域(频率大于 0.2 Hz),表明在无死区、限幅等非线性环节时,新型功率调节模式更易引发低频振荡。此外,水轮机在不同工况下的 e_y 不同,在 e_y 较大的工况下,水轮机-调速器系统的负阻尼更小,这与第二节的结论相互印证。

3.2 并大网一次调频性能

在机组并大网运行过程中,一次调频更关注输出功率的响应。本文建立了包含死区、限幅及精细化水力-机械耦合系统的水轮机-调速器非线性模型。仿真工况设置为机组初始出力为 80%额定出力,水头为额定水头并保持不变,对机组施加 10%功率扰动,两种模式下机组参数均设定为 $K_p = 3$ 。图 8 给出了机组的导叶开度及出力变化曲线,图中绿色直线表示稳态值, $y^* = y/y_0, P_l^* = P_l/P_r, y_0$ 为导叶接力器全行程, P_r 为额定机械功率。

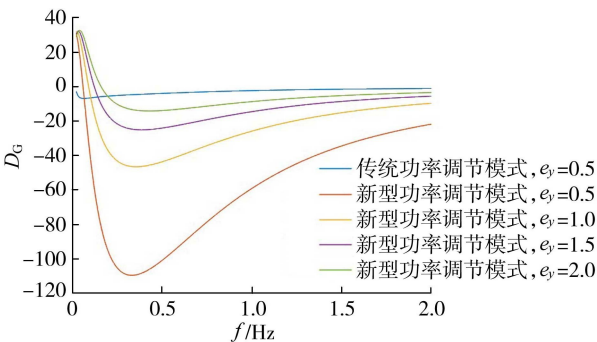


图 7 不同 e_y 下新型功率调节模式水轮机-调速器系统的阻尼转矩系数随系统频率的变化曲线
Fig. 7 Damping torque coefficient variation of water turbine and governor system under novel power regulation mode with system frequency under different e_y values

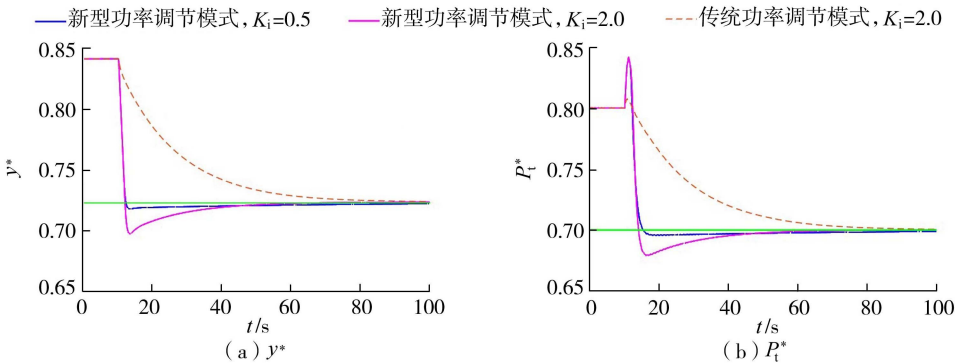


图 8 机组一次调频仿真实验开度和功率响应曲线

Fig. 8 Opening and power response curves of primary frequency regulation simulation experiment of units

由图 8 可见,在相同参数下,新型功率调节模式的调节速率更快,但是其过快的导叶运动速率诱发了较为严重的水锤效应,导致功率反调与超调。产生超调的原因是查表得到的开度与 PI 控制器输出的参数直接叠加,导致开度过调。在新型功率调节模式下,减小 K_i 可抑制超调,但会延长功率偏差的消除时间。在实际

运行过程中,由于功率死区的存在,这些功率偏差无法彻底消除,因此该现象在工程应用中可以接受。

4 新型功率调节模式改进策略

随着电网运行“两个细则”要求的实施,水电机组需要在速动性和抑制水锤效应引起的功率反调之间做好协调。新型功率调节模式虽然能提前确定大致的目标开度,并控制导叶直接趋近该目标开度,但是调节速度过快易引发过大水锤效应,导致功率反调,需要对此进行优化改进。通常来说,已建成电站的过水系统已经固定,若通过增设调压井等方式成本巨大,则需从导叶控制策略上着手,据此本文提出插值输出控制策略和导叶速率控制策略两种优化策略。

4.1 插值输出控制策略

由于目前新型功率调节模式将插值得到的稳态开度指令直接输出给执行机构,导致执行机构动作过快,进而引发较大的水锤效应,同时因调节速度过快产生超调。因此,考虑在插值环节后加入一个一阶惯性环节,对其速率进行控制。

加入的一阶惯性环节的传递函数可表示为

$$G_n(s) = 1/(T_n s + 1)$$
 (15)

式中: $G_n(\cdot)$ 为一阶惯性环节的传递函数; T_n 为一阶惯性环节时间常数,本文取值为 $T_n=4$ 。

图 9 为加入插值输出控制策略后新型功率调节模式的一次调频开度和功率响应曲线,其中 PI 控制器的参数设为 $K_p=3.0, K_i=0.5$ 。由图 9 可见,加入一阶惯性环节后,功率反调有所减小,但是调节时间有所增加。该策略仅改变了插值输出信号,对调速器的其他控制模式没有影响。

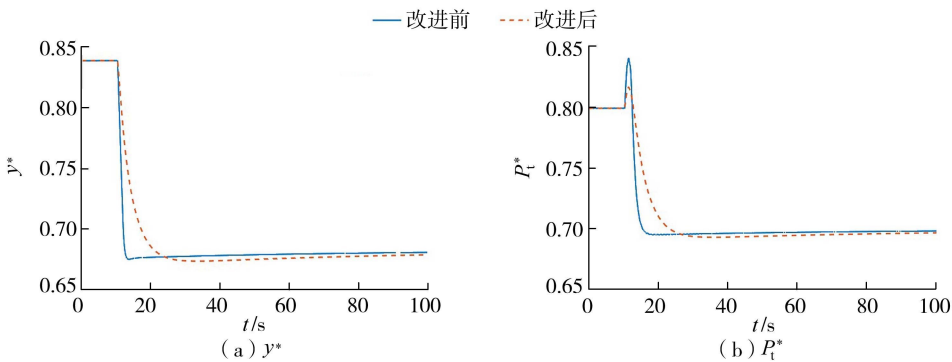


图 9 加入插值输出控制策略后新型功率调节模式的一次调频开度和功率响应曲线

Fig. 9 Primary frequency regulation opening and power response curves of novel power regulation mode after incorporating interpolation output control strategy

4.2 导叶速率控制策略

为防止导叶运动速率过快所带来的不利影响,提出了一种导叶速率控制策略,以限制导叶运动速率。该策略与新型功率调节模式协同完成机组的一次调频。导叶速率控制策略的液压系统结构如图 10 所示,其中 u_d 为液压系统开度偏差相对值。

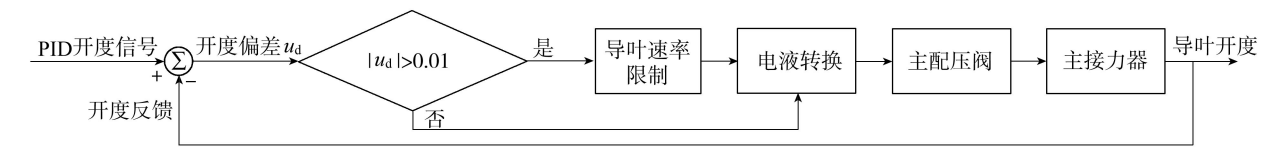


图 10 导叶速率控制策略的液压系统结构

Fig. 10 Hydraulic system structure of guide vane speed control strategy

图 11 为加入导叶速率控制策略后新型功率调节模式的一次调频响应曲线,其中调速器参数设为 $K_p=3.0, K_i=0.5$,导叶速率限制值设定为 $|u_d| \leq 0.005$ 。该控制策略在导叶调节初期采用慢速控制,当开度偏差较小时,采用快速控制以满足速动性要求。从图 11 可以看出,相较于插值输出控制策略,导叶速率控制策略显著减小了功率反调,但调节时间略有增加。该策略也存在不足,由于其改变了执行机构的控制结构,因此对调速器其他控制模式产生了不利影响,例如在开机、工况转换等对导叶启闭速率要求较高的过程中,执行

机构的结构变化会延长运行时间,不利于机组的快速响应。

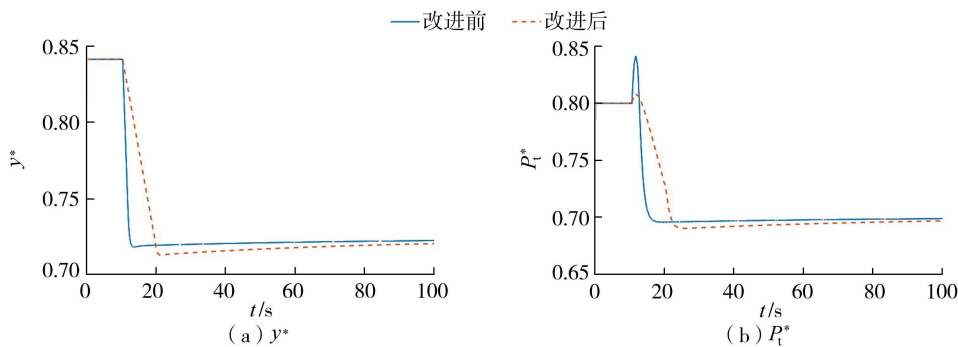


图 11 加入导叶速率控制策略后新型功率调节模式的一次调频开度和功率响应曲线

Fig. 11 Primary frequency regulation opening and power response curves of novel power regulation mode after incorporating guide vane speed control strategy

5 结 论

- a. 与传统功率调节模式相比,新型功率调节模式在小网运行时频率稳定性显著下降,极易引发频率振荡,因此采用该模式的机组不适合在小网中运行。
- b. 与传统功率调节模式相比,新型功率调节模式的稳定域更小,系统稳定性受 e_y 的影响极为显著。当 e_y 较小时,系统稳定性极差;当 e_y 较大时,系统稳定性有所改善,且此时新型功率调节模式的速动性更好。
- c. 在新型功率调节模式下,水轮机-调速器系统呈现较大的负阻尼特性,不利于系统稳定。在并大网时,新型功率调节模式的一次调频功率响应速度更快,但会引发较大的功率反调,同时伴随一定的超调,可通过减小 K_i 值抑制超调。
- d. 插值输出控制策略和导叶速率控制策略均能有效抑制机组运行中的水锤效应。其中,插值输出控制策略对功率反调的抑制效果不如导叶速率控制策略,但是导叶速率控制策略会对调速器的其他调节性能产生不利影响。

参考文献:

[1] 孙东磊. 电力系统源、网协同调度的理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

[2] 肖洋, 刘伟, 王官宏, 等. 水轮机调速系统源网协调问题研究[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1852-1861. (XIAO Yang, LIU Wei, WANG Guan hong, et al. Source-grid coordination of hydraulic turbine governing system[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1852-1861. (in Chinese))

[3] 李继清, 龙健, 刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 1-10. (LI Jiqing, LONG Jian, LIU Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))

[4] 贡力, 董洲全, 贾治元, 等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 1-9. (GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 1-9. (in Chinese))

[5] 潘菊芳. 抽水蓄能电站参与“两个细则”管理分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(3): 116-120. (PAN Jufang. Participation of pumped storage power station in the management analysis of “two rules”[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(3): 116-120. (in Chinese))

[6] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694. (WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694. (in Chinese))

[7] 吴凡, 饶士立. 基于两个细则的水电机组 AGC 与一次调频优化设计[J]. 电工技术, 2018(17): 38-43. (WU Fan, RAO Shili. Optimization design of AGC unit in hydropower and primary frequency regulation based on two rules[J]. Electric

Engineering,2018(17): 38-43. (in Chinese))

[8] 刘志森,张德虎,曹林宁,等. 水轮发电机组闭环开机特性仿真及优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3): 209-213. (LIU Zhimiao,ZHANG Dehu,CAO Linning,et al. Simulation and optimization of closed-loop start-up characteristics for hydraulic turbines[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3): 209-213. (in Chinese)).

[9] 程远楚,张江滨. 水轮机自动调节[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[10] 郭文成,杨建东,杨威嘉. 水轮机三种调节模式稳定性比较研究[J]. 水力发电学报,2014,33(4): 255-262. (GUO Wencheng,YANG Jiandong,YANG Weijia. Comparative study on stability of three hydraulic turbine regulation modes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(4): 255-262. (in Chinese))

[11] 程远楚,赵洁,叶鲁卿,等. 水电机组水力系统和调速器控制规律对电力系统稳定的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(4): 59-62. (CHENG Yuanchu,ZHAO Jie,YE Luqing,et al. Effects of water inertia and control action of turbine governor on power system stability[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(4): 59-62. (in Chinese))

[12] 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. (in Chinese))

[13] 何胜明,张健,段贵金,等. 水轮机调速器不同控制模式对电网超低频振荡影响分析[J]. 水电能源科学,2023,41(12): 195-199. (HE Shengming,ZHANG Jian,DUAN Guijin,et al. Analysis of ultra-low frequency oscillation mechanism of hydraulic turbine governor under different control modes[J]. Water Resources and Power,2023,41(12): 195-199. (in Chinese))

[14] YANG W,NORRLUND P,CHUNG C Y,et al. Eigen-analysis of hydraulic-mechanical-electrical coupling[J]. Renewable Energy,2018,115: 1014-1025.

[15] 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. (in Chinese))

[16] 刘少博,王德林,马宁宁,等. 水电机组引起的超低频振荡特性及抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18): 5354-5362. (LIU Shaobo,WANG Delin,MA Ningning,et al. Study on characteristics and suppressing countermeasures of ultra-low frequency oscillation caused by hydropower units[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(18): 5354-5362. (in Chinese))

[17] 马晓伟,魏平,王吉利,等. 抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5): 126-132. (MA Xiaowei,WEI Ping,WANG Jili,et al. Optimization of multi-stage frequency control parameters of hydro power unit for ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(5): 126-132. (in Chinese))

[18] 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. (in Chinese))

[19] WANG G,XU Z,GUO X,et al. Mechanism analysis and suppression method of ultra-low-frequency oscillations caused by hydropower units[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2018,103: 102-114.

[20] YAN W,SUN Y. Research on governor parameter optimization to suppress ultra-low frequency oscillation of power system caused by hydropower unit[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,2087: 012001.

[21] 丁占涛,蔡卫江,赵文利,等. 基于水轮机运转曲线的调速器调节策略优化与实践[J]. 水电与抽水蓄能,2023,9(4): 92-97. (DING Zhantao,CAI Weijiang,ZHAO Wenli,et al. Regulation strategy optimization and practice of governor based on turbine operating curve[J]. Hydropower and Pumped Storage,2023,9(4): 92-97. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-04 编辑:雷燕)