

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221909

# 基于串级 PI-(1+PD)算法的含飞轮储能互联电网 AGC 控制器设计

王育飞, 程伟, 薛花, 张宇华, 米阳

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对传统控制器存在的响应速度较慢、超调较大及鲁棒性较差等问题, 提出一种基于串级 PI-(1+PD)算法的含飞轮储能互联电网 AGC 控制器设计方法。首先, 建立含飞轮储能的两区域互联电网 AGC 系统模型, 模拟飞轮储能联合火电机组参与 AGC 的过程。然后, 设计一种基于串级 PI-(1+PD)算法的 AGC 控制器。外环采用 PI 控制, 内环采用带滤波系数的(1+PD)控制。在保证系统稳态性能的前提下, 提高动态响应速度和抗扰能力, 并通过粒子群算法的迭代寻优获得最优的控制器参数。最后, 基于 Matlab/Simulink 进行算例仿真分析。结果表明: 与传统 PID 控制和 PI-PD 控制相比, 所提方法不仅具有更快的响应速度与更小的超调量, 而且增强了系统抵御内部参数摄动的鲁棒性。

**关键词:** 串级 PI-(1+PD)算法; 飞轮储能; 自动发电控制; 控制器设计; 粒子群优化

## Controller design of an AGC based on a cascade PI-(1+PD) algorithm for an interconnected power grid with flywheel energy storage

WANG Yufei, CHENG Wei, XUE Hua, ZHANG Yuhua, MI Yang

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** There are problems of slow response speed, large overshoot, and poor robustness of traditional controllers. Thus a design method for an AGC controller for an interconnected power grid with flywheel energy storage based on a cascade PI-(1+PD) algorithm is proposed. First, the AGC system model of a two-area interconnected power grid with flywheel energy storage is established to simulate the process of a flywheel energy storage combined thermal power unit participating in AGC. Then, an AGC controller based on the cascade PI-(1+PD) algorithm is designed. The outer loop uses PI control, and the inner loop uses (1+PD) control with a filter coefficient. With the aim of ensuring the steady state performance of the system, it improves the dynamic response speed and disturbance suppression ability. The optimal controller parameters are obtained through iterative optimization of the particle swarm optimization algorithm. Finally, simulation analysis is performed in Matlab/Simulink. The results demonstrate that compared with the conventional PID control and the PI-PD control, the proposed method not only has faster response speed and smaller overshoot, but also enhances the robustness of the system against internal parameter perturbation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

**Key words:** PI-(1+PD) algorithm; flywheel energy storage; automatic generation control; controller design; particle swarm optimization

## 0 引言

随着风电、光伏等间歇性新能源并网规模的不

断扩大, 其输出功率的波动性与随机性给电力系统频率稳定性带来巨大挑战<sup>[1-4]</sup>。在电力行业标准 DL/T 1870-2018《电力系统网源协调技术规范》和国家能源局 2020 年发布的《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》、《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》文件中, 对新能源和储能参与电网

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61873159); 上海市科委地方能力建设计划项目资助(22010501400)

调频提出了明确要求<sup>[5-6]</sup>。目前,我国互联电网中主要依靠火电机组提供自动发电控制(automatic generation control, AGC)调频辅助服务,然而,火电机组受调节精度、响应速度和自身可用容量的限制,难以快速有效地跟踪 AGC 发电功率指令<sup>[7-8]</sup>。飞轮储能系统(flywheel energy storage system, FESS)具备双向出力、瞬时响应和精确跟踪 AGC 发电功率指令的特性,将 FESS 并入电网运行已成为辅助 AGC 调频的有效途径之一。因此,研究含 FESS 互联电网 AGC 对提高调频质量以及确保电网的安全稳定运行具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

在 AGC 调频辅助服务中,控制器设计是关键环节。国内外学者已提出了多种先进的控制方法,其中,传统的比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制因其简单高效的特点,在互联电网 AGC 系统中应用最为广泛<sup>[11]</sup>;然而,采用传统的 PID 控制在处理复杂系统时,控制性能受到限制,易出现响应速度较慢、超调较大和鲁棒性较差的问题,无法适应电网频率控制需求<sup>[12-13]</sup>。针对 PID 控制存在的局限性,文献[14]提出了一种模型预测控制算法来实现系统频率波动的快速消除;文献[15]基于事件驱动的鲁棒控制原理,提出了一种风电参与的互联电网 AGC 控制器设计方法;文献[16]将强化学习算法引入到多区域互联电网 AGC 控制器设计中,能够有效减小系统频率偏差和提高系统响应速度。

FESS 联合火电机组提供 AGC 调频辅助服务时,系统呈现出强耦合、强非线性和不确定性等复杂特性<sup>[17]</sup>,采用上述方法无法满足系统频率稳定性要求,亟需设计更先进和简易有效的 AGC 控制器,以提高系统的动态响应性能。近年来,串级控制方法的提出为互联电网 AGC 控制器的设计提供了新的思路,其采用内外两个嵌套的闭环反馈控制回路,能够有效提高响应速度、克服干扰影响<sup>[18]</sup>。文献[19]提出了一种基于 PI-PD 算法的 AGC 控制器,用于仅有火电参与的互联电网 AGC 系统;文献[20]提出了一种串级带滤波系数的 PD-PI 控制器,在含光伏发电的互联电网 AGC 系统中取得了良好的动态控制效果;文献[21]提出了一种串级(1+PD)-PID 控制器,进一步提高了多种可再生能源发电接入的互联电网 AGC 系统的动态响应性能。上述研究表明,采用串级控制方法的系统控制性能良好,且具有较强的适应性,但系统动态响应性能仍有进一步提高的空间。

为有效抑制电网的频率波动,提升系统的动态响应性能,本文提出一种基于串级 PI-(1+PD)算法的

AGC 控制器设计方法。首先,建立含飞轮储能互联电网 AGC 系统模型;然后,针对每个区域设计一种基于串级 PI-(1+PD)算法的 AGC 控制器,采用带滤波系数的(1+PD)控制与 PI 控制内外嵌套的双环结构,并利用粒子群优化算法对所设计的控制器参数进行寻优整定。最后,通过算例验证所提方法的有效性。

## 1 含飞轮储能互联电网 AGC 系统模型

飞轮储能联合火电机组参与互联电网 AGC 的系统结构如图 1 所示。当负荷发生扰动时,区域互联电网 AGC 调度中心根据电网频率与联络线功率等参数,计算得到本控制区的区域控制误差(area control error, ACE),并将其作为 AGC 控制器的输入信号,输出信号为总 AGC 发电功率指令,再分配给各个 AGC 调频单元。随后,火储联合系统与其他调频机组快速响应 AGC 指令并及时跟踪负荷扰动,从而维持区域互联电网频率的稳定及联络线功率的动态平衡。

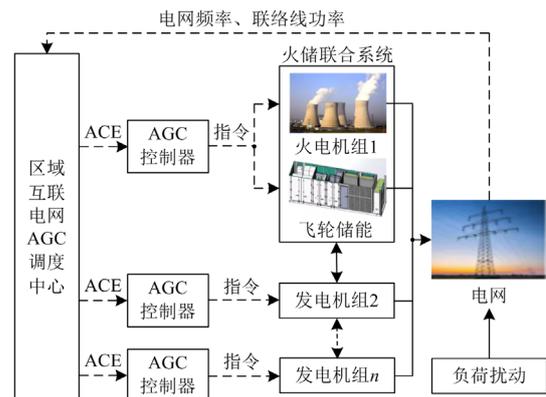


图 1 飞轮储能联合火电机组参与 AGC 的系统结构

Fig. 1 System structure of flywheel energy storage combined thermal power unit participating in AGC

### 1.1 互联电网 AGC 系统模型

在典型两区域互联电网 AGC 系统<sup>[22]</sup>的基础上选择合理的方式融入飞轮储能,建立含飞轮储能两区域互联电网 AGC 系统模型,如图 2 所示。系统主要包括再热式火电机组、FESS、AGC 控制器以及联络线模型等,其中 FESS 配置在区域 1 中,并考虑调频死区、机组爬坡率等强非线性环节的影响,更符合互联电网组成的实际现状<sup>[23]</sup>。

图 2 中,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为各区域的频率偏差系数;  $R_1$  和  $R_2$  为机组调差系数;  $M_1$  和  $M_2$  为发电机组转动惯量;  $D_1$  和  $D_2$  为负荷阻尼系数;  $a_G$  和  $a_{FESS}$  分别为传统火电机组和 FESS 的 AGC 指令分配系数;  $A_{CE1}$  和

$A_{CE2}$  为各区域控制误差;  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  为各区域的频率偏差;  $\Delta P_G$  和  $\Delta P_{FESS}$  分别为火电机组和 FESS 的输出功率;  $\Delta P_{tie12}$  为联络线交换功率偏差;  $\Delta P_{L1}$  和  $\Delta P_{L2}$  为负载变化量;  $T_{12}$  为联络线功率同步系数;  $\alpha_{12}$  为两系统的功率换算系数。设置指令分配系数  $a_G$  和

$a_{FESS}$  时, 需综合考虑 FESS 功率需求和该参数对系统调频效果的影响等因素: 当  $a_{FESS}$  设置较大时, FESS 承担较多的调频任务, 导致对其功率需求较大; 当  $a_{FESS}$  设置较小时, 可能导致调频效果无法达到要求<sup>[24]</sup>。系统中主要环节的具体模型如下。

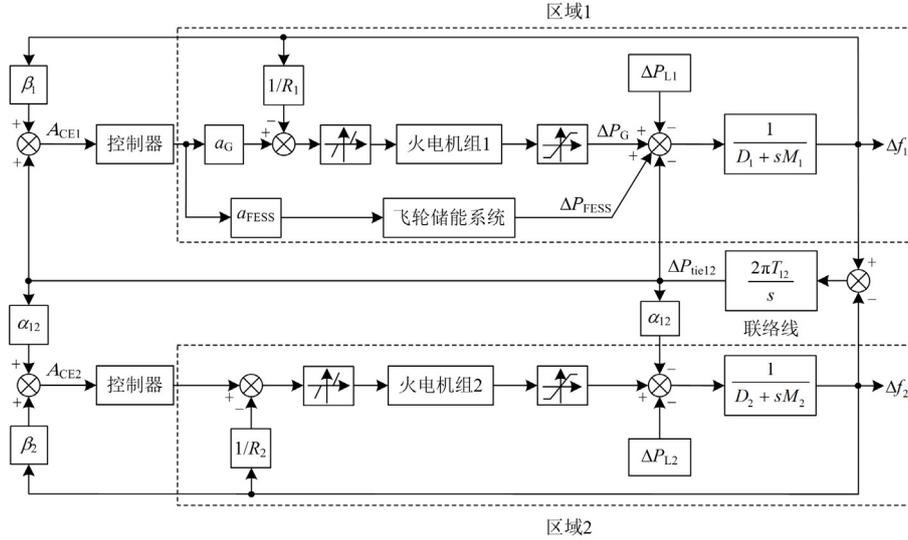


图 2 含飞轮储能两区域互联电网 AGC 系统模型

Fig. 2 AGC system model of two-area interconnected power system with flywheel energy storage

1) 火电机组

火电机组由调速器和再热式汽轮机构成, 由此构建火电机组的传递函数  $G_g(s)$  为

$$G_g(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \times \frac{1 + sK_r T_r}{(1 + sT_t)(1 + sT_r)} \quad (1)$$

式中:  $s$  为拉普拉斯变换运算符;  $T_g$  和  $T_t$  分别为调速器和再热式汽轮机的时间常数;  $K_r$  与  $T_r$  分别为再热器增益与再热蒸汽容积时间常数。

2) 区域控制误差

采用定联络线功率与频率偏差控制模式, 在该控制模式下需要同时检测  $\Delta f$  和  $\Delta P_{tie12}$ <sup>[25]</sup>, 将其线性

组合后的 ACE 计算公式为

$$\begin{cases} A_{CE1}(s) = \beta_1 \times \Delta f_1(s) + \Delta P_{tie12}(s) \\ A_{CE2}(s) = \beta_2 \times \Delta f_2(s) + \alpha_{12} \Delta P_{tie12}(s) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 飞轮储能系统控制模型

对于调频应用场景下的飞轮储能系统控制模型, 文献[26]已验证并在适当情况下进行简化, 不仅能够保证较高的仿真精度, 而且能够提高系统的仿真速度。因此, 建立满足系统频率稳定性要求的 FESS 控制模型如图 3 所示。该模型包含 PCS 环节、飞轮储能机电动态过程及储能剩余能量状态(state of energy, SOE)约束环节等。

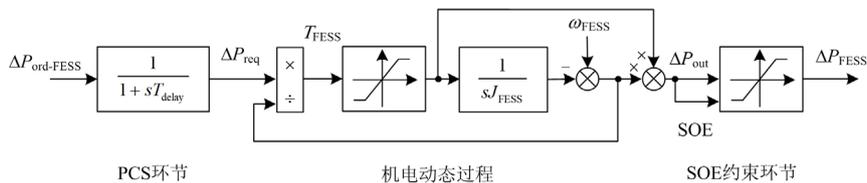


图 3 FESS 控制模型

Fig. 3 Control model for FESS

1) PCS 环节: 考虑变流器响应时间常数远小于调频时间, 因此, 忽略与变流器相关的系统动态响应过程, 将其等效为一阶惯性环节。

2) 机电动态过程: FESS 通过驱动飞轮加速或减速来控制其输出功率, 完成存储和释放电能的任务。该过程可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{out}}(t) = T_{\text{FESS}}(t) \times \omega_{\text{FESS}}(t) \\ \omega_{\text{FESS}}(t+1) = \omega_{\text{FESS}}(t) - T_{\text{FESS}}(t) \times \frac{1}{sJ_{\text{FESS}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\Delta P_{\text{out}}(t)$  为  $t$  时刻飞轮储能输出功率； $T_{\text{FESS}}(t)$  为飞轮电磁转矩； $J_{\text{FESS}}$  为飞轮转动惯量； $\omega_{\text{FESS}}(t)$  为飞轮转动角速度。

3) SOE 约束环节：考虑 FESS 的容量限制，当飞轮储能系统 SOE 越限时，该环节闭锁  $\Delta P_{\text{out}}(t)$ ，FESS 实际输出功率  $\Delta P_{\text{FESS}}(t)$  与  $\Delta P_{\text{out}}(t)$  的关系可表示为

$$\Delta P_{\text{FESS}}(t) = \begin{cases} \Delta P_{\text{out}}(t) & S_{\text{OE},\text{min}} \leq S_{\text{OE}}(t) \leq S_{\text{OE},\text{max}} \\ 0 & S_{\text{OE}}(t) > S_{\text{OE},\text{max}} \text{ 或 } S_{\text{OE}}(t) < S_{\text{OE},\text{min}} \end{cases} \quad (4)$$

其中， $t$  时刻飞轮储能系统 SOE 为

$$S_{\text{OE}}(t) = S_{\text{OE}}(t_0) + \int_{t_0}^t \Delta P_{\text{out}}(t) dt / E_{\text{rate}} \quad (5)$$

式中： $S_{\text{OE},\text{max}}$  和  $S_{\text{OE},\text{min}}$  分别为飞轮储能系统 SOE 上、下限值； $S_{\text{OE}}(t_0)$  为  $t_0$  时刻飞轮储能系统 SOE； $E_{\text{rate}}$  为飞轮储能系统的额定容量。

## 2 基于串级 PI-(1+PD)算法的 AGC 控制器设计

FESS 具有双向出力、瞬时响应和精确控制的特性，其联合火电机组提供 AGC 调频辅助服务可在一定程度上提高调频质量。与此同时，设计合理的控制器应用于含飞轮储能互联电网 AGC 系统，则能够进一步增强系统的抗干扰能力，提升系统的动态响应性能。

### 2.1 串级 PI-(1+PD)控制器设计

串级控制方法的原理框图如图 4 所示。其主要思想是将外环主控制器的输出信号作为内环副控制器的设定值，在扰动到达系统的其他部分之前将其快速抑制，更好地控制外环被控量。外环传递函数可表示为

$$Y(s) = G_1(s)U_1(s) - d(s) \quad (6)$$

式中： $G_1(s)$  表示外环控制对象； $U_1(s)$  表示  $G_1(s)$  的输入信号； $d(s)$  表示扰动量。

内环传递函数可表示为

$$Y_2(s) = G_2(s)U_2(s) \quad (7)$$

式中： $G_2(s)$  表示内环控制对象； $U_2(s)$  表示  $G_2(s)$  的输入信号。

串级控制系统传递函数表达式为

$$Y(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)C_1(s)C_2(s)R(s) - G_1(s)d(s)}{1 + G_2(s)C_2(s) + G_1(s)G_2(s)C_1(s)C_2(s)} \quad (8)$$

式中： $C_1(s)$  表示外环主控制器传递函数； $C_2(s)$  表示内环副控制器传递函数； $R(s)$  表示外环被控量。

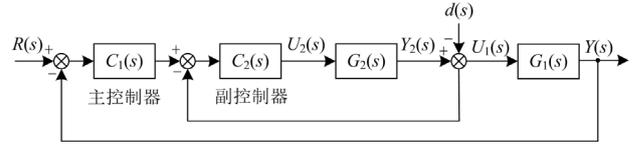


图 4 串级控制方法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of cascade control method

在含飞轮储能的互联电网 AGC 系统中应用串级控制方法后，对于系统的内环调节部分，考虑火电机组和飞轮储能等控制对象滞后较大，同时外部可能发生较频繁的负荷扰动。此时，频率偏差变化速度越大，则产生的超调越大，动态响应时间越长。为了能够直接根据频率偏差的变化趋势进行动作，提高控制器的动态响应速度，降低超调量，引入区域频率偏差  $\Delta f_i(s)$  和偏差系数  $\beta_i$  二者的乘积作为副被控变量，设计带滤波系数的(1+PD)控制作为副控制器。其中，滤波系数的作用是考虑到输入信号中可能有高频噪声的存在，设置滤波系数能够有效减小高频噪声的不利影响<sup>[27]</sup>。该控制部分能够在提高系统动态响应速度的同时，实现“粗调”。

对于系统的外环调节部分，将区域控制误差  $A_{\text{CE}i}(s)$  作为主被控变量，主控制器选择采用 PI 控制。其中，比例环节可以适当放大或缩小输入信号，但同时也可能会使得偏差值放大，加入积分环节后则能够消除比例环节的稳态误差，同时保证主被控变量  $A_{\text{CE}i}(s)$  的控制精度。该控制部分能够在保证系统稳态性能的同时，实现“细调”。

所设计的串级 PI-(1+PD)控制器结构如图 5 所示。图中，外环 PI 控制传递函数  $C_1(s)$  表达式如式(9)所示；内环带滤波系数的(1+PD)控制的传递函数  $C_2(s)$  表达式如式(10)所示。控制器输出量  $\Delta P_{\text{C}i}(s)$  为区域  $i$  的总功率调节指令，表达式如式(11)所示。

$$C_1(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (9)$$

$$C_2(s) = 1 + K_{\text{PI}} + K_{\text{D}} \times \frac{sN_{\text{C}}}{s + N_{\text{C}}} \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{C}i}(s) = C_2(s) \times [A_{\text{CE}i}(s) \times C_1(s) - \Delta f_i(s) \times \beta_i] \quad (11)$$

式中： $K_p$  和  $K_{\text{PI}}$  为比例项系数； $K_I$  和  $K_{\text{D}}$  分别为积分项和微分项系数； $N_{\text{C}}$  为滤波系数。

为进一步分析所提串级 PI-(1+PD)控制器结构对于系统性能的影响，假设图 2 中区域 2 频率偏差和区域间联络线交换功率偏差均为零，不计区域 2 对区域 1 的影响，选择 FESS 接入的区域 1 作为研究对象。此时，串级 PI-(1+PD)控制和传统 PID 控

制下系统的控制框图分别如图 6 和图 7 所示。

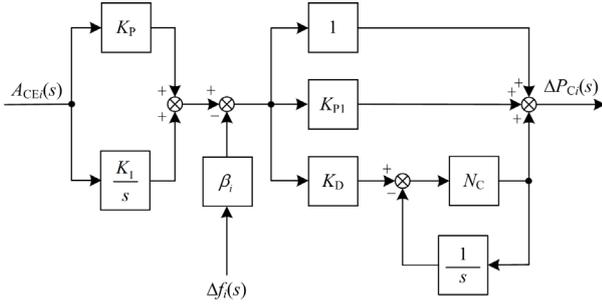


图 5 串级 PI-(1+PD)控制器结构

Fig. 5 Structure of cascade PI-(1+PD) controller

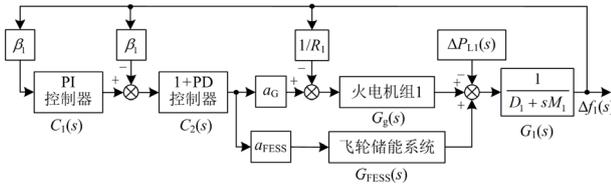


图 6 串级 PI-(1+PD)控制框图

Fig. 6 Block diagram of cascade PI-(1+PD) control

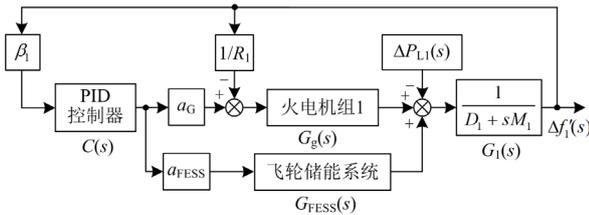


图 7 传统 PID 控制框图

Fig. 7 Block diagram of traditional PID control

根据图 6 和图 7 可得, 串级 PI-(1+PD)控制和传统 PID 控制下的负荷扰动  $\Delta P_{L1}(s)$  至系统输出通道的传递函数分别如式(12)和式(13)所示。

$$H_{PI-(1+PD)}(s) = \frac{\Delta f_1(s)}{-\Delta P_{L1}(s)} = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s) \left\{ \begin{array}{l} G_g(s) \left[ (\beta_1(s)C_1(s) - \beta_1(s))C_2(s)a_G - \frac{1}{R_1} \right] + \\ G_{FESS}(s)(\beta_1(s)C_1(s) - \beta_1(s))C_2(s)a_{FESS} \end{array} \right\}} \quad (12)$$

$$H_{PID}(s) = \frac{\Delta f_1(s)}{-\Delta P_{L1}(s)} = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s) \left[ G_g(s) \left( \beta_1(s)C(s)a_G - \frac{1}{R_1} \right) + G_{FESS}(s)\beta_1(s)C(s)a_{FESS} \right]} \quad (13)$$

在相同的负荷扰动作用下, 串级 PI-(1+PD)控

制系统  $\Delta f_1(s)$  与单回路传统 PID 控制系统  $\Delta f_1'(s)$  的大小之比为

$$\frac{\Delta f_1(s)}{\Delta f_1'(s)} = \frac{1 - G_1(s) \left[ G_g(s) \left( \beta_1(s)C(s)a_G - \frac{1}{R_1} \right) + G_{FESS}(s)\beta_1(s)C(s)a_{FESS} \right]}{1 - G_1(s) \left\{ \begin{array}{l} G_g(s) \left[ (\beta_1(s)C_1(s) - \beta_1(s))C_2(s)a_G - \frac{1}{R_1} \right] + \\ G_{FESS}(s)(\beta_1(s)C_1(s) - \beta_1(s))C_2(s)a_{FESS} \end{array} \right\}} \quad (14)$$

由式(14)可知, 该值远小于 1, 说明在串级 PI-(1+PD)控制下, 负荷扰动  $\Delta P_{L1}(s)$  至系统输出通道的动态增益明显减小, 当扰动出现时能够将其快速抑制, 相比传统 PID 控制, 扰动抑制能力明显增强。

## 2.2 基于 PSO 算法的控制器参数整定优化方法

对于含飞轮储能的两区域互联电网 AGC 系统, 为了简化分析, 两区域均采用相同的串级 PI-(1+PD)控制器, 需要整定 5 个参数:  $K_p$ 、 $K_{p1}$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  和  $N_C$ 。传统的参数整定方法, 如逐步逼近法、一步调整法和两步调整法, 存在耗时长、整定准确性低及控制效果不理想的问题, 且负荷扰动存在不确定性和波动性, 也增加了控制器参数整定的复杂度。

PSO 算法是一种受鸟群觅食行为启发提出的随机优化算法, 由  $M$  个粒子组成一个种群, 每个粒子根据自身经验和群体经验不断更新自身飞行速度和位置, 驱动粒子在搜索空间内搜寻到最优解。采用 PSO 算法对串级 PI-(1+PD)控制器的参数进行整定优化, 不仅能够降低控制器参数整定复杂度, 而且能够进一步提高控制器的抗干扰能力和系统的动态响应性能。粒子群算法的更新公式为

$$\begin{cases} v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_i(t) - x_i(t)] + \\ \quad c_2 \cdot r_2 \cdot [g(t) - x_i(t)] \\ x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $v_i(t+1)$  和  $x_i(t+1)$  分别为  $t+1$  次迭代第  $i$  个粒子的速度和位置;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0,1]$  的随机数;  $w$  为惯性系数;  $c_1$  和  $c_2$  分别为自我学习因子和群体学习因子;  $p_i(t)$  和  $g(t)$  分别为第  $i$  个粒子在搜索历史中的个体最优解和种群在搜索历史中的全局最优解。

基于 PSO 算法的串级 PI-(1+PD)控制器参数整定优化问题可表述为以时间乘以误差绝对值积分 (integral of time multiplied absolute error, ITAE) 最小为目标, 以控制器各参数的取值范围为约束条件,

通过 PSO 算法求解得到一组最佳  $K_P$ 、 $K_{P1}$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  和  $N_C$  的值, 使系统频率控制的动态性能最优。所建立的目标函数如式(16)所示。

$$\min J = \int_0^{t_{sim}} [(|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie12}|) \times t] dt \quad (16)$$

式中,  $t_{sim}$  为仿真时间。

约束条件为

$$\begin{cases} K_P^{\min} \leq K_P \leq K_P^{\max} \\ K_I^{\min} \leq K_I \leq K_I^{\max} \\ K_{P1}^{\min} \leq K_{P1} \leq K_{P1}^{\max} \\ K_D^{\min} \leq K_D \leq K_D^{\max} \\ N_C^{\min} \leq N_C \leq N_C^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $K_P^{\min}$ 、 $K_P^{\max}$ 、 $K_I^{\min}$ 、 $K_I^{\max}$ 、 $K_{P1}^{\min}$ 、 $K_{P1}^{\max}$ 、 $K_D^{\min}$ 、 $K_D^{\max}$ 、 $N_C^{\min}$ 、 $N_C^{\max}$  分别为  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_{P1}$ 、 $K_D$ 、 $N_C$  的下限和上限。

基于 PSO 算法的控制器参数整定优化过程描述如下: 首先, 初始粒子群可行域(控制器各参数的取值范围), 并从中随机产生  $M$  个粒子(控制器各参数的具体取值), 然后, 计算每一个粒子的适应度值(目标函数值), 通过不断迭代更新得到多组候选解, 直至算法结束, 输出串级 PI-(1+PD)控制器的最优优化参数, 具体流程如图 8 所示。

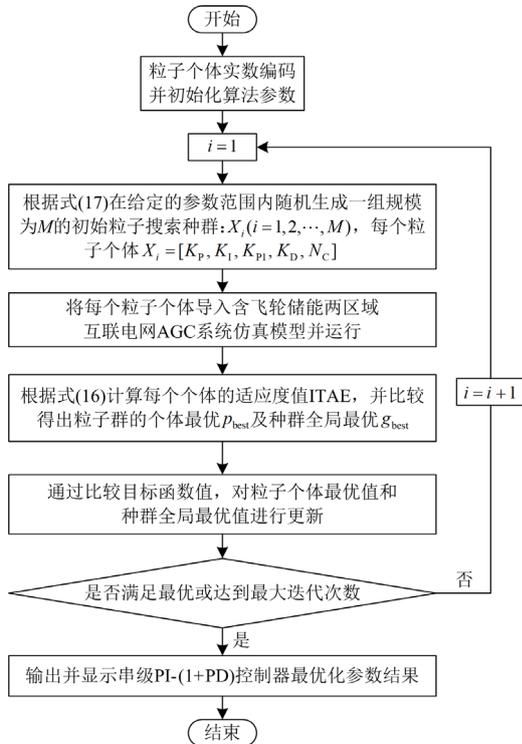


图 8 基于 PSO 的控制器参数整定优化流程图

Fig. 8 Flow chart of controller parameters tuning and optimization based on PSO

### 3 算例分析

#### 3.1 算例数据

为了验证所提基于串级 PI-(1+PD)算法的含飞轮储能互联网 AGC 控制器设计方法的有效性, 根据图 2 在 Matlab/Simulink 环境下搭建含飞轮储能的两区域互联电网 AGC 系统仿真模型。设置单台火电机组额定容量为 300 MW, 飞轮储能系统容量为 10 MW/2 MWh, 系统的仿真参数如表 1 所示。基准值  $P_B = 300$  MW,  $f_B = 50$  Hz。设置控制器参数  $K_P$ 、 $K_{P1}$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $N_C$  的取值范围为  $[1, 300]$ <sup>[28]</sup>。PSO 算法初始参数取值: 种群规模  $s = 50$ ; 最大迭代数  $G_{cr} = 30$ ; 惯性系数  $w = 0.6$ ; 自我学习因子  $c_1 = 2$ ; 群体学习因子  $c_2 = 2$ 。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of system

主要参数	数值	主要参数	数值
$T_{g1}/T_{g2}$	0.1/0.08	$\beta_1/\beta_2$	35/21.5
$T_{i1}/T_{i2}$	0.2/0.3	$R_1/R_2$	0.03/0.05
$K_{e1}/K_{e2}$	0.25/0.375	$a_G/a_{FESS}$	0.8/0.2
$T_{r1}/T_{r2}$	10/8	$T_{delay}$	0.02
$T_{12}$	0.882	$J_{FESS}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	344
$D_1/D_2$	2.75/2.0	$SOE_{\min}$	0.2
$M_1/M_2$	10.5/12	$SOE_{\max}$	0.8

设置阶跃负荷扰动和连续负荷扰动两种典型工况, 将通过 PSO 算法基于两种不同负荷扰动的 ITAE 指标参数整定优化得到的传统 PID 控制器、文献[19]中所提 PI-PD 控制器和本文所提串级 PI-(1+PD)控制器分别应用于含飞轮储能两区域互联电网 AGC 系统, 在 3 种不同控制器作用下对其进行控制性能对比分析、动态响应性能对比分析及鲁棒性能对比分析, 以验证所提方法的可行性和有效性。

#### 3.2 控制性能对比分析

在 0 s 时刻将幅值为 15 MW 和 7.5 MW 的阶跃负荷扰动分别加入区域 1 和区域 2, 此时 3 种控制器的优化结果如表 2 所示。选择 FESS 接入的区域 1 作为研究对象。此时, 串级 PI-(1+PD)控制系统图如图 9 所示。图中,  $A_{CEr}$  为区域控制误差 ACE 的给定值, 设为 0。

将图 9 的控制系统内环闭合、外环断开, 分别计算 PID 控制、PI-PD 控制和串级 PI-(1+PD)控制 3 种方法下, 系统输入量  $A_{CEr}$  至系统输出量  $-A_{CE}$  通道的开环传递函数, 得到系统开环过程的伯德图如图 10 所示。

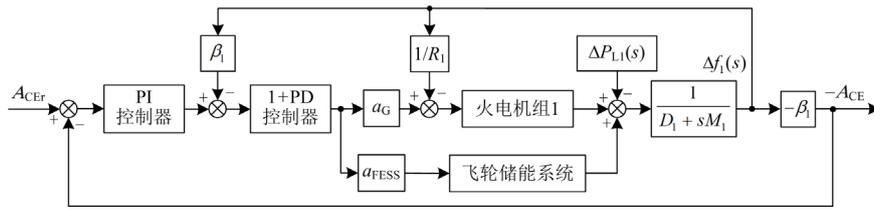


图 9 串级 PI-(1+PD)控制系统

Fig. 9 Cascade PI-(1+PD) control system

表 2 AGC 控制器参数

Table 2 AGC controller parameters

参数	传统 PID	PI-PD	串级 PI-(1+PD)
$K_P$	-1	1	-1
$K_I$	-0.9569	1	-1
$K_D$	-0.0824	-1	0.0893
$K_{PI}$	—	-1	1
$N_C$	—	—	254.04

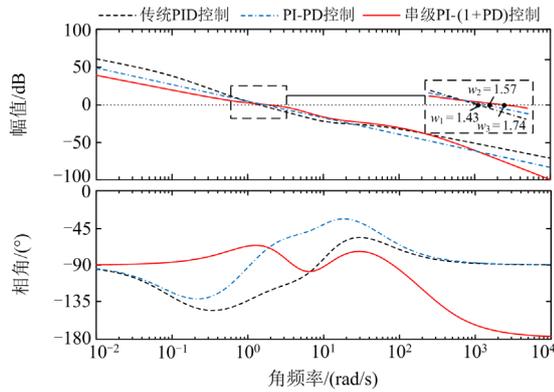
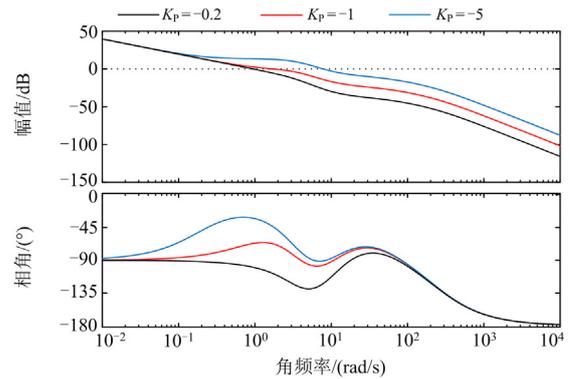


图 10 3 种控制方法的伯德图

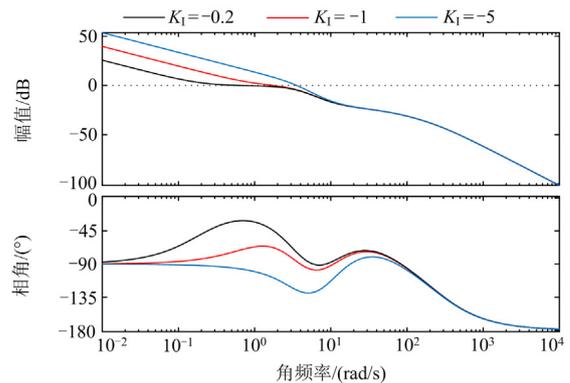
Fig. 10 Bode diagram of three control methods

由图 10 中的幅频特性曲线可见, 3 种控制方法在低频段的斜率近似相同, 说明 3 种控制方法具有相同的稳态性能。中频段部分传统 PID 控制、PI-PD 控制和串级 PI-(1+PD)控制的开环截止频率分别为 1.43 rad/s、1.57 rad/s 和 1.74 rad/s, 说明相较于 PID 控制和 PI-PD 控制, 串级 PI-(1+PD)控制动态响应更加快速; 在高频段部分, 串级 PI-(1+PD)控制的增益下降更快, 斜率更大, 反映其抗高频干扰能力更强。可见相比于传统 PID 控制和 PI-PD 控制, 所提串级 PI-(1+PD)控制方法具有更可靠的控制性能, 且 3 种控制方法下系统的幅值裕度和相位裕度均为正值, 表明系统稳定。

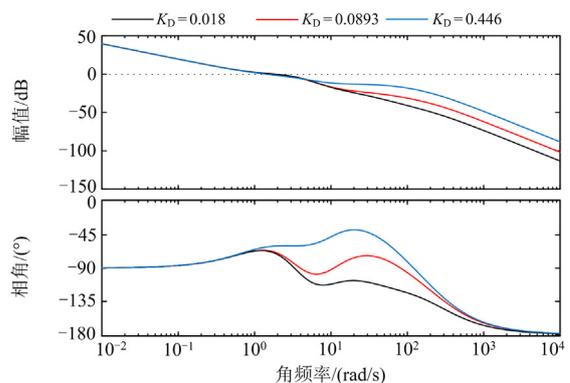
为进一步分析所提串级 PI-(1+PD)控制器参数对于控制性能的影响, 得到串级 PI-(1+PD)控制器参数  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  变化时系统开环过程的伯德图如图 11 所示。



(a) 系统随  $K_P$  变化的开环伯德图



(b) 系统随  $K_I$  变化的开环伯德图



(c) 系统随  $K_D$  变化的开环伯德图

图 11 系统随  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  变化的开环伯德图

Fig. 11 Open-loop bode diagram of the system varying with  $K_P$ ,  $K_I$  and  $K_D$

由图 11 中的幅频特性曲线可见, 低频段部分, 串级 PI-(1+PD) 控制器具有相同的斜率, 表明  $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_D$  变化对系统稳态性能的影响较小; 中频段部分, 适当减小  $K_p$  和  $K_I$  能够增大开环截止频率, 即闭环系统将具有更高的带宽, 获得更快的响应速度, 减小  $K_D$  对响应速度的影响不明显。

### 3.3 动态性能对比分析

#### 3.3.1 阶跃负荷扰动工况

在阶跃负荷扰动工况下, 基于 PSO 算法的传统 PID 控制器、PI-PD 控制器和串级 PI-(1+PD) 控制器的参数寻优过程中最优 ITAE 值收敛曲线、系统的动态响应和评价指标结果分别如图 12、图 13 和表 3 所示。评价指标为区域 1 和区域 2 频率偏差最大绝对值  $|\Delta f_{\max}|$ 、联络线交换功率偏差最大绝对值  $|P_{\text{tie}12,\max}|$  和 ITAE, 其值越小, 则表明含飞轮储能互联电网 AGC 系统的动态响应性能越优。

由图 12 可见, 在 3 种控制器参数整定优化过程中, PSO 算法均能够较快地搜索到全局最优解, 未陷入局部最优, 具有较高的寻优效率, 且相较于传统 PID 控制器和 PI-PD 控制器, 在串级 PI-(1+PD) 控制器参数整定优化过程中, PSO 算法能够搜寻到更小的目标函数值。由图 13 可见, 当电网中发生负荷阶跃扰动时, 3 种控制器都能在一定时间内有效地抑制该扰动引起的频率和联络线交换功率的波

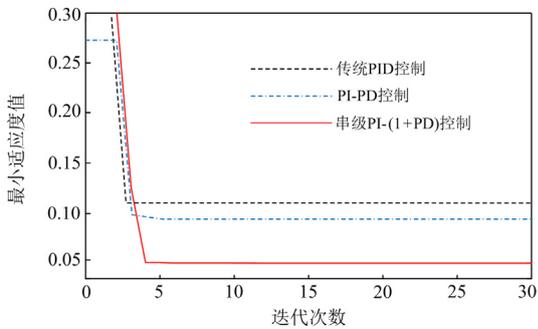
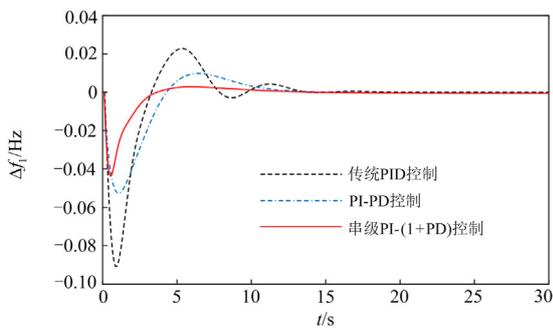
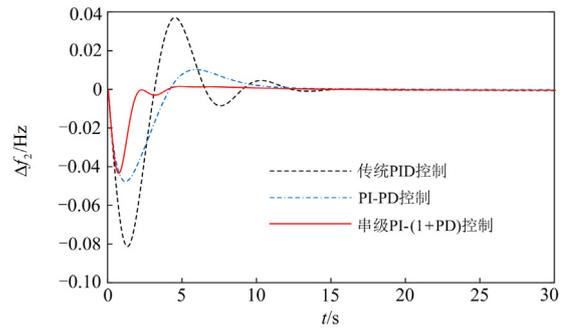


图 12 3 种控制器参数整定优化收敛曲线

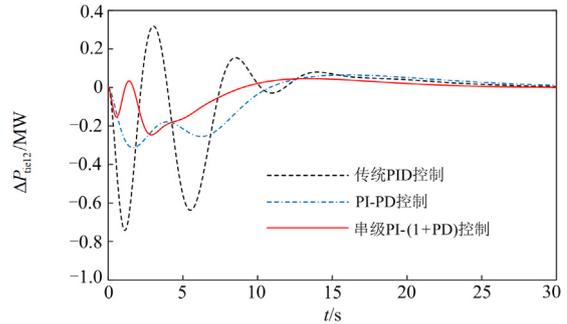
Fig. 12 Convergence curve of three controllers parameters tuning and optimization



(a) 区域 1 频率偏差



(b) 区域 2 频率偏差



(c) 联络线交换功率偏差

图 13 阶跃负荷扰动工况下系统动态响应

Fig. 13 System dynamic response under stepped load disturbance mode

表 3 阶跃负荷扰动工况下评价指标结果

Table 3 Evaluation index results under stepped load disturbance mode

控制器	$ \Delta f_{1,\max} /\text{Hz}$	$ \Delta f_{2,\max} /\text{Hz}$	$ P_{\text{tie}12,\max} /\text{MW}$	ITAE
串级 PI-(1+PD)	0.043	0.043	0.246	0.046
传统 PID	0.091	0.081	0.782	0.114
PI-PD	0.052	0.047	0.271	0.089

动。采用传统 PID 控制时, 负荷扰动对于系统的动态响应性能产生较明显的影响, 动态响应过程出现较大超调量, 响应速度较慢, 负荷扰动抑制能力有限; 采用 PI-PD 控制时, 系统的动态响应性能得到提升, 优于 PID 控制; 采用本文所提串级 PI-(1+PD) 控制时, 由于将区域频率偏差  $\Delta f_i(s)$  和偏差系数  $\beta_i$  二者的乘积作为副被控变量, 可直接根据系统频率偏差的变化趋势进行动作, 缩短了调节时间, 系统的动态响应性能得到进一步提升, 有效减小了该负荷扰动对于系统动态响应性能的不利影响。结合表 3 中定量指标可知, 采用串级 PI-(1+PD) 控制时, 相较于传统 PID 控制, 3 种评价指标  $|\Delta f_{1,\max}|$ 、 $|\Delta f_{2,\max}|$  和  $|P_{\text{tie}12,\max}|$  分别减小了 52.8%、46.9% 和 68.5%。相较于 PI-PD 控制, 3 种评价指标分别减小约 17.3%、8.5% 和 9.2%。另外, 串级 PI-(1+PD) 控

制的 ITAE 性能指标值相比于 PID 控制减小约 59.7%，相比于 PI-PD 控制减小约 48.3%，从定量角度也证明了串级 PI-(1+PD)控制的响应速度更快，调节效果更显著。

上述结果表明，所提方法在系统发生负荷阶跃扰动时，不仅能够使得系统频率和联络线交换功率偏差更加快速地恢复至稳态，而且可以有效地减小系统频率和联络线交换功率的超调量，显著提升含飞轮储能互联电网 AGC 系统的动态响应性能。

### 3.3.2 连续负荷扰动工况

参照文献[9]，在 Matlab/Simulink 中利用信号叠加方式得到如图 14 所示的连续负荷扰动信号，并将其加入区域 1。此时 3 种控制器的优化结果如表 4 所示。在连续负荷扰动工况下，基于 PSO 算法的传统 PID 控制器、PI-PD 控制器和串级 PI-(1+PD)控制器的参数寻优过程中，最优 ITAE 值收敛曲线、系统的动态响应和评价指标结果分别如图 15、图 16 和表 5 所示。评价指标为区域 1 和区域 2 频率偏差最大绝对值  $|\Delta f_{\max}|$ 、频率偏差的均方根值  $\Delta f_{\text{rms}}$ 、联络线交换功率偏差最大绝对值  $|P_{\text{tie}12,\text{max}}|$  和 ITAE，其值越小，则表明含飞轮储能互联电网 AGC 系统的动态响应性能越优。

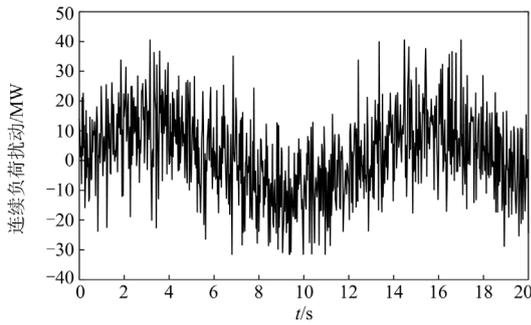


图 14 连续负荷扰动

Fig. 14 Continuous load disturbance

表 4 AGC 控制器参数

Table 4 AGC controller parameters

参数	传统 PID	PI-PD	串级 PI-(1+PD)
$K_P$	-1	-1	-1
$K_I$	-1	-1	-1
$K_D$	0.4208	1	0.3755
$K_{P1}$	—	1	1
$N_c$	—	—	103.47

由图 15 可见，在 3 种控制器参数整定优化过程中，PSO 算法能够较快地搜索到全局最优解，且相较于传统 PID 控制器和 PI-PD 控制器，在串级 PI-(1+PD)控制器参数整定优化过程中，PSO 算法能够搜寻到更小的目标函数值。由图 16 可见，当电

网中发生负荷连续扰动时，相较于传统 PID 控制和 PI-PD 控制，采用串级 PI-(1+PD)控制对频率和联络线交换功率的波动抑制效果更好，确保系统能够获得更好的稳定性。由表 5 中的定量指标可知，采用串级 PI-(1+PD)控制时，相比于传统 PID 控制，6 种评价指标  $|\Delta f_{1,\text{max}}|$ 、 $\Delta f_{1,\text{rms}}$ 、 $|\Delta f_{2,\text{max}}|$ 、 $\Delta f_{2,\text{rms}}$ 、 $|P_{\text{tie}12,\text{max}}|$  和 ITAE 分别减小 67.3%、62.5%、74.4%、73.9%、50%和 36.3%。相比于 PI-PD 控制，6 种评价指标分别减小 25%、46.4%、54.5%、62.5%、31.8%和 35.9%。说明在连续负荷扰动工况下，相比传统 PID 控制和 PI-PD 控制，串级 PI-(1+PD)控制在有效降低电网频率偏差和联络线交换功率偏差峰值的同时，可以显著地减小频率波动的峰谷差，限制电网频率变化量在一定的范围之内，具有更强的抗扰能力。

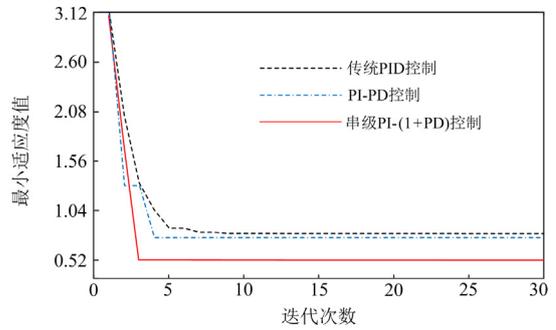
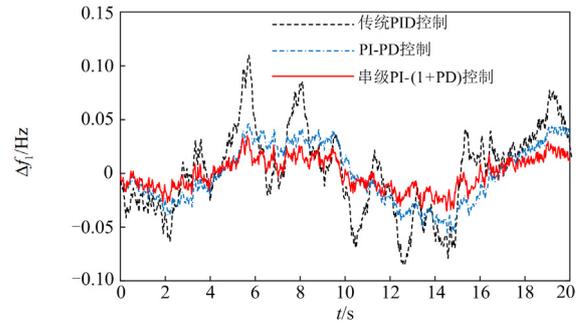
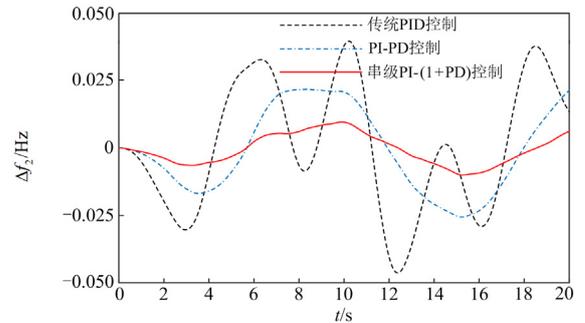


图 15 3 种控制器参数整定优化收敛曲线

Fig. 15 Convergence curve of three controllers parameters tuning and optimization



(a) 区域1频率偏差



(b) 区域2频率偏差

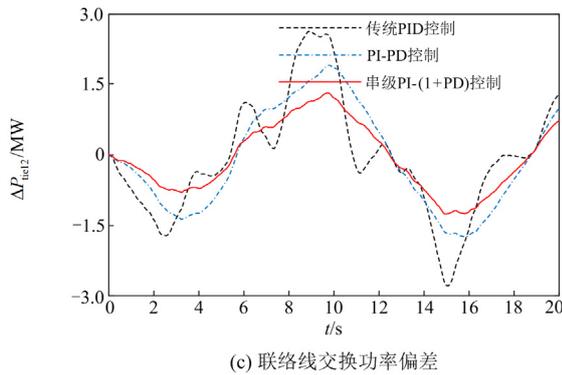


图 16 连续负荷扰动工况下系统动态响应

Fig. 16 System dynamic response under continuous load disturbance mode

表 5 连续负荷扰动工况下评价指标结果

Table 5 Evaluation index results under continuous load disturbance mode

控制器	$ \Delta f_{1,max} $ Hz	$\Delta f_{1,rms}$ Hz	$ \Delta f_{2,max} $ Hz	$\Delta f_{2,rms}$ Hz	$ P_{line12,max} $ MW	ITAE
串级 PI-(1+PD)	0.036	0.015	0.010	0.006	1.31	0.524
传统 PID	0.110	0.040	0.039	0.023	2.62	0.823
PI-PD	0.048	0.028	0.022	0.016	1.92	0.817

通过上述含飞轮储能互联电网 AGC 系统不同工况下的仿真验证与量化分析可以看出，所提基于串级 PI-(1+PD)算法设计的 AGC 控制器在抑制外部扰动、提高响应速度和降低响应超调量等方面表现出更佳的控制性能，使得系统动态响应性能得到明显提升。

### 3.4 鲁棒性能对比分析

考虑电力系统运行条件的变化导致系统模型参数的不确定性问题，对比分析串级 PI-(1+PD)控制对于系统内部参数摄动的鲁棒性，在上述阶跃负荷扰动工况下，各控制器的参数保持不变，假定两个区域的调速器时间常数、汽轮机时间常数、联络线功率同步系数和飞轮初始时刻转动角速度相对其基准值在-20%~20%内同时存在 10%的摄动情况，此时 PID 控制、PI-PD 控制和串级 PI-(1+PD)控制 3 种方法下区域 1 的频率偏差如图 17 所示。

由图 17 可见，当系统内部参数发生摄动时，在串级 PI-(1+PD)控制下，区域 1 频率偏差的波动较小，与 PI-PD 控制下频率偏差的波动相当，而 PID 控制时频率偏差的波动比串级 PI-(1+PD)控制大。因此，串级 PI-(1+PD)控制器能够抵御系统参数不确定性对含飞轮储能互联电网 AGC 系统动态性能的不利影响，可以有效增强系统的鲁棒性。

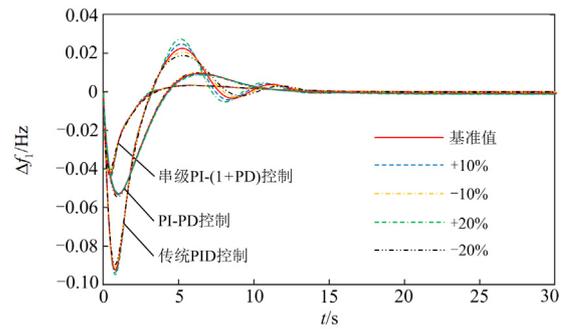


图 17 区域 1 频率偏差

Fig. 17 Frequency deviation of area 1

## 4 结论

针对含飞轮储能互联电网 AGC 系统在采用传统 PID 控制时易出现响应速度较慢、超调较大及鲁棒性较差等问题，本文提出了一种基于串级 PI-(1+PD)算法的 AGC 控制器设计方法。在 Matlab/Simulink 平台上的仿真结果表明：在阶跃负荷扰动场景下，所提串级 PI-(1+PD)控制相较于传统 PID 控制，区域 1、区域 2 频率偏差最大值、联络线交换功率偏差最大值和 ITAE 值分别减小 52.8%、46.9%、68.5%和 59.7%，相较于 PI-PD 控制分别减小 17.3%、8.5%、9.2%和 48.3%；在连续负荷扰动场景下，相较于传统 PID 控制，区域 1、区域 2 频率偏差最大值、联络线交换功率偏差最大值和 ITAE 值分别减小 67.3%、74.4%、50%和 36.3%，相较于 PI-PD 控制分别减小 25%、54.5%、31.8%和 35.9%。所提方法在提高系统动态响应速度的同时，显著减小了电网频率偏移量和联络线交换功率变化量的超调量，且当系统内部参数发生摄动时呈现出更强的鲁棒性。

所提方法是从控制角度出发，有效提升了系统的动态响应性能，暂未考虑实际工程应用中存在的通信时延等问题。后续研究将重点考虑通信时延和网络带宽资源受限等诸多因素对系统动态响应性能的影响。

### 参考文献

[1] AKRAM U, MITHULANANTHAN N, RAZA M Q, et al. RoCoF restrictive planning framework and wind speed forecast informed operation strategy of energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 224-234.

[2] JOSHI A, SURESH A, KAMALASADAN S. Grid frequency regulation based on point of common coupling angle deviation control of distributed energy resources

- with fully active hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4473-4485.
- [3] 焦东东, 陈洁, 方圆, 等. 基于变分模态分解下利用混合储能平抑风电出力波动的控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 14-19.  
JIAO Dongdong, CHEN Jie, FANG Yuan, et al. Control strategy of hybrid energy storage for suppressing fluctuation of wind power output based on variational mode decomposition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 14-19.
- [4] 张欣, 黄永章. 大规模风电接入对系统功角稳定性影响的研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 119-124.  
ZHANG Xin, HUANG Yongzhang. Research on the effect of large-scale wind power integration on the power angle stability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 119-124.
- [5] 中国电力企业联合会. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
China Electricity Council. Technical specification for power grid and source coordination: DL/T 1870—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [6] 中华人民共和国国家能源局华中监管局. 国家能源局华中监管局关于印发《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》的通知[EB/OL].(2020-09-07)[2020-10-25]. <http://hzj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=AEB05CC013329FBDE050A8C0C1C8659B>.
- [7] 李嘉文, 余涛, 张孝顺, 等. 基于改进深度确定性梯度算法的 AGC 发电功率指令分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7198-7212.  
LI Jiawen, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. AGC power generation command allocation method based on improved deep deterministic policy gradient algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7198-7212.
- [8] 张朝辉, 杨家豪, 苏杰和. 直流互联异步电网的 HVDC 与 AGC 协同功率分配[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 162-167.  
ZHANG Zhaohui, YANG Jiahao, SU Jiehe. Collaborative dispatch algorithm for HVDC and AGC in DC interconnected asynchronous power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 162-167.
- [9] 隋云任, 梁双印, 黄登超, 等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2597-2605.  
SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, et al. Simulation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2597-2605.
- [10] HE Junqiang, SHI Changli, WEI Tongzhen, et al. Stochastic model predictive control of hybrid energy storage for improving AGC performance of thermal generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 393-405.
- [11] 李志军, 王硕, 张家安, 等. 基于变论域模糊逻辑的互联电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 151-160.  
LI Zhijun, WANG Shuo, ZHANG Jiaan, et al. Variable universe fuzzy logic-based load frequency control in an interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 151-160.
- [12] 米阳, 伦雪莹, 孟凡斌, 等. 基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源电力系统频率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 13-20.  
MI Yang, LUN Xueying, MENG Fanbin, et al. Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and EV auxiliary regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 13-20.
- [13] YIN Linfei, WU Yunzhi. Mode-decomposition memory reinforcement network strategy for smart generation control in multi-area power systems containing renewable energy[J]. Applied Energy, 2022, 307.
- [14] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 基于双层模型预测结构的跨区域 AGC 机组协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4674-4685.  
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4674-4685.
- [15] 杨超, 姚伟, 文劲宇. 基于事件驱动的含风电互联网负荷频率鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 57-64.  
YANG Chao, YAO Wei, WEN Jinyu. Event triggering based robust control of load frequency for interconnected power grid with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 57-64.
- [16] XI Lei, ZHOU Lipeng, XU Yanchun, et al. A multi-step unified reinforcement learning method for automatic generation control in multi-area interconnected power grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1406-1415.
- [17] SILVA-SARAVIA H, PULGAR-PAINEMAL H, MAURICIO J M. Flywheel energy storage model, control and location for improving stability: the Chilean case[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3111-3119.

[18] SAHA D, SAIKIA L C, RAHMAN A. Cascade controller based modeling of a four area thermal: gas AGC system with dependency of wind turbine generator and PEVs under restructured environment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 201-212.

[19] DASH P, SAIKIA L C, SINHA N. Flower pollination algorithm optimized PI-PD cascade controller in automatic generation control of a multi-area power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016, 82: 19-28.

[20] EL-ELA A A A, EL-SEHIEMY R A, SHAHEEN A M, et al. Enhanced coyote optimizer-based cascaded load frequency controllers in multi-area power systems with renewable[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(14): 8459-8477.

[21] CELIK E, OZTURK N, ARYA Y, et al. (1+PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(22): 15433-15456.

[22] 邵克强, 王渝红, 史华勃, 等. 区域间异步联网直流参与辅助调频服务策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7249-7259.  
TAI Keqiang, WANG Yuhong, SHI Huabo, et al. Research on strategy of HVDC participating in frequency regulation ancillary service in asynchronous interconnection power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7249-7259.

[23] 刘柏私, 汤凡, 余锐, 等. 高比例水电多直流送端电网频率稳定协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 181-187.  
LIU Bosi, TANG Fan, YU Rui, et al. Frequency stability coordination control technology and practice of a multi-DC outgoing power grid with a high proportion of hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 181-187.

[24] 李彦营, 席磊, 郭宜果, 等. 基于权重双Q-时延更新学习算法的自动发电控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5459-5471.  
LI Yanying, XI Lei, GUO Yiguo, et al. Automatic generation control based on the weighted double Q-delayed update learning algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5459-5471.

[25] 席磊, 王昱昊, 陈宋宋, 等. 面向综合能源系统的多智能体协同 AGC 策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(4): 77-88.  
XI Lei, WANG Yuhao, CHEN Songsong, et al. Multi-agent collaborative AGC strategy for integrated energy system[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(4): 77-88.

[26] SANCHEZ F, CAYENNE J, GONZALEZ-LONGATT F, et al. Controller to enable the enhanced frequency response services from a multi-electrical energy storage system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(2): 258-265.

[27] SAHA A, SAIKIA L C. Utilisation of ultra-capacitor in load frequency control under restructured STPP-thermal power systems using WOA optimised PIDN-FOPD controller[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(13): 3318-3331.

[28] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联电网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.  
ZUO Jian, XIE Pingping, LI Yinong, et al. Intelligent optimization algorithm based load frequency controller design and its control performance assessment in interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-01-04

作者简介:

王育飞(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力储能应用技术、电能质量分析与控制、混沌理论与应用; E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn

程伟(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为储能技术在电力系统频率调整中的应用。E-mail: 17354275197@163.com

(编辑 许威)