

飞轮储能辅助火电机组一次调频控制策略

赵康¹, 田玉婷², 刘锶淇¹, 孙昕炜², 魏巍³

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041)

摘要:为应对新能源大规模并网造成的电力系统频率不稳定性问题,提出了一种基于飞轮储能辅助火电机组一次调频控制策略。针对火电机组爬坡速度慢、易引发机组振荡等问题的影响,利用飞轮储能的高频次瞬间精准放电、高转换效率及长寿命等特点来弥补传统调频方式的不足。基于 Matlab/Simulink 建立了含火电与飞轮储能的电力系统频率特性模型,对比分析了火电机组单独调频、定系数下垂控制以及变系数下垂控制下飞轮储能辅助调频的电力系统频率特性、机组输出功率以及联络线交换功率变化。仿真结果表明:飞轮储能的引入能够显著提高电力系统频率稳定性,减少火电机组出力并延长其寿命;变系数下垂控制充分考虑了储能荷电状态,相较于定系数下垂控制,变系数下垂控制下储能荷电状态变化范围缩小,能够减少储能过充过放等问题。

关键词: 飞轮储能; 汽轮机; 频率特性; 一次调频

中图分类号: TM 621 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0024-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250204

Primary Frequency Regulation Control Strategies for Thermal Power Units Assisted by Flywheel Energy Storage

ZHAO Kang¹, TIAN Yuting², LIU Siqu¹, SUN Xinwei², WEI Wei³

(1. School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: To address the frequency instability in power systems caused by the large-scale integration of new energy sources, a primary frequency regulation control strategy for thermal power units assisted by flywheel energy storage (FES) is proposed. This strategy aims to make up for shortcomings of traditional frequency regulation methods, such as slow ramping speed and potential oscillations of thermal power units, with the characteristics of FES, including its high-frequency instantaneous precise discharge capability, high conversion efficiency, and long service life. A power system frequency characteristic model incorporating thermal power and FES is established using Matlab/Simulink. Comparative analyses are carried out on power system frequency characteristics, unit output power and tie-line power exchange under three different control scenarios: thermal power unit frequency regulation alone, fixed-coefficient droop control and variable-coefficient droop control with FES-assisted frequency regulation. The simulation results show that the introduction of FES significantly enhances the frequency stability of power system, reduces the output power of thermal power units, and prolongs its service life. Moreover, compared with the fixed-coefficient droop control, variable-coefficient droop control takes into account the state of charge (SOC) of energy storage system, which can narrow the variation range of SOC and effectively mitigate overcharging and over-discharging of energy storage system.

Key words: flywheel energy storage; turbine; frequency characteristics; primary frequency regulation

0 引 言

为了实现“双碳”目标,中国筹划构建一种以风、光等新型清洁能源为主的电力供应体系,旨在加速能源电力行业的低碳化转型^[1]。截止 2024 年 6 月底,全国风电、光伏装机容量分别达到 467 GW 和 714 GW,合计规模已超过煤电装机^[2]。以风光为代表的新能源具有间歇性与波动性,其大规模并网势必会影响电网内发电量与用电量的实时平衡,使输出功率不稳定,进而影响电力系统的有功功率与负荷需求的平衡,使系统频率波动较大。以火电、水电为代表的传统调频方式由于调节精度低、响应速度慢等问题难以满足当下调频需求。

为了增强系统调频能力,可以引入储能系统协同火电机组参与电网调频。近年来,国内外关于电化学储能技术辅助电力系统调频的研究取得了显著进展,尽管在其应用领域方面已积累一定成果,但电化学储能系统由于其存在的安全风险与循环寿命限制问题,仍面临多重挑战^[3-4]。飞轮储能是一种新兴物理储能技术,凭借其高频次瞬时充放电、长寿命及高转换效率等特性,被视为改善电网频率波动、辅助火电机组调频的理想选择^[5-7]。文献[8]基于已建的风光储基地实施了飞轮储能系统的充放电实验,实验结果表明,飞轮储能系统展现出了高度的运行稳定性与可靠性,在功率输出与响应速度等方面均凸显出较优的性能,能针对电网频率波动迅速做出反应,较为适合辅助电力系统调频。文献[9-10]通过仿真计算,利用飞轮储能耦合火电机组进行一、二次调频,能够有效提高机组调频性能,延长机组寿命。文献[11-12]将飞轮储能系统应用于风电功率的平滑处理,明显减小了风电输出功率的波动性,提高了电网频率稳定性。文献[13]研究了飞轮储能与风电机组的协同运行策略,不仅优化了系统恢复同步稳定过程中的动态响应能力,还减轻了同步发电机在调频过程中的有功调节压力,提高了调频效率。文献[14]提出了一种电网负荷分配策略,依据负荷周期的不同特点,将调频任务合理分配至飞轮储能与火电机组,有效提升了整体的调频效果与资源利用效率。文献[15]构建了一个融合虚拟同步发生器与永磁同步电机的飞轮储能系统,该系统能够基于电网频率的实时变化信号,灵活调节飞轮转

速,从而有效减缓电网频率的波动速度。

上述研究表明,飞轮储能可有效平滑新能源功率波动、降低火电机组调频压力,但其与火电联合调频的协同控制策略仍存在动态适应性不足或动态响应速度相对较慢等缺点。如定系数下垂控制可能在抑制频率恶化的同时阻碍频率的恢复,导致系统频率二次下降,影响电力系统的稳定性,并且可能造成储能系统过充、过放等问题。针对上述问题,下面提出一种基于罗吉斯蒂克(logistic)函数的自适应下垂控制策略。通过 Matlab/Simulink 建立火-储一次调频系统低阶线性模型,引入 logistic 函数以储能荷电状态(state of charge, SOC)为自变量用于动态调整下垂系数,合理规划储能出力,分析对比在火电机组单独调频、定系数下垂控制以及所提自适应下垂控制 3 种策略下的调频结果,以验证火-储系统在所提自适应下垂控制下的调频性能。

1 飞轮储能辅助火电机组一次调频模型

飞轮储能利用其高频次瞬间精准放电的能力以及转换效率高、安全性好、使用寿命长等特点,弥补火电机组调频能力的不足,通过两者的协同作用,可以实现更快速、更准确的调频效果。

1.1 一次调频原理

一次调频属于有差调节,其调频原理^[16]如图 1 所示,实现流程为:1) 设初始稳定状态系统频率为 f_0 ,此时机组运行点为 a 点。2) 当电网负荷发生波动,负荷功率增加 P_1 ,负荷功频特性曲线从 $L_1(f)$ 变为 $L_2(f)$,此时发电机通过控制调速器启动一次调频,增发功率 P_g ,新的功频特性曲线 $L_2(f)$ 与 $G(f)$ 相交于 c 点,达到新的频率稳定状态,频率为 f_1 ,频率偏差为 Δf ,一次调频过程结束。

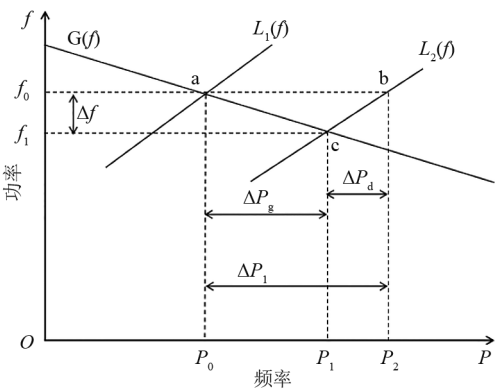


图 1 一次调频原理

在分析电力系统总体频率特性时,忽略对电压和功角的动态特性研究,采用小信号模型将电力系统一次调频模型简化为图 2 中的结构^[17],该模型由 3 个模块所构成。

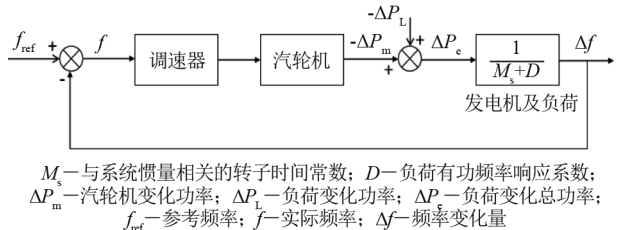


图 2 传统火电机组一次调频结构

1.2 燃煤火电机组模型

随着电力系统的发展,其运行模式从单一独立向多区域互联转变。在区域负荷扰动引发功率失衡与频率偏差时,调频机组启动一次调频。由于不同区域机组转速响应差异,会导致联络线交换功率的变化^[18]。为了更有效地分析储能系统参与调频的应用效果,采用含有联络线的两区域模型进行仿真,分析机组输出功率变化量、频率变化量以及联络线交换功率变化量,其中两区域模型是通过划分不同

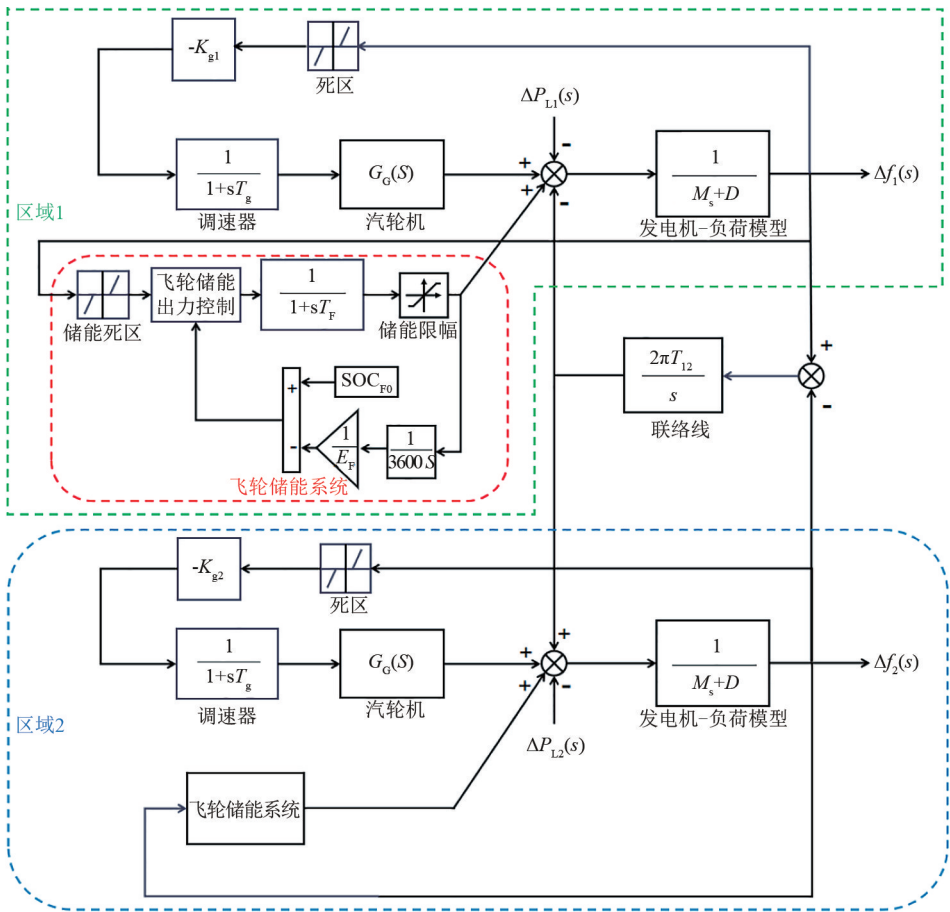
动态特性的子系统模拟区域间功率交换及频率响应,以评估系统调频性能和稳定性。这里主要针对系统中功率变化与频率变化进行仿真研究,当电网频率发生波动时,火-储联合系统作为调频主体对频率变化信号共同做出反应,实现快速的频率调节。在 Matlab/Simulink 中建立包含飞轮储能的一次调频的两区域模型,如图 3 所示。

为了提高机组热力循环效率,仿真研究中选择搭建再热式汽轮机。再热凝气式汽轮机结构如图 4 所示。

为了使再热式汽轮机模型能准确跟随频率偏差信号进行调频动作,根据现有的汽轮机理论模型^[19],完成模型的搭建如图 5 所示。其中各缸的输出功率用功率系数体现。

再热式汽轮机模型传递函数为

$$G_{en}(s) = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (1)$$



k_{g1} 、 k_{g2} 为区域1、区域2的火电机组调频静特性系数

图 3 火储联合调频两区域模型

火电机组调速器模型传递函数为

$$G_{OV}(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (2)$$

式中, T_g 为调速器时间惯性常数。

发电机-负荷模型传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Ms + D} \quad (3)$$

式中, $M=2H$, H 为惯性时间常数。

两区域之间联络线的传递函数为

$$G_l(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} \quad (4)$$

式中, T_{12} 为联络线同步系数。

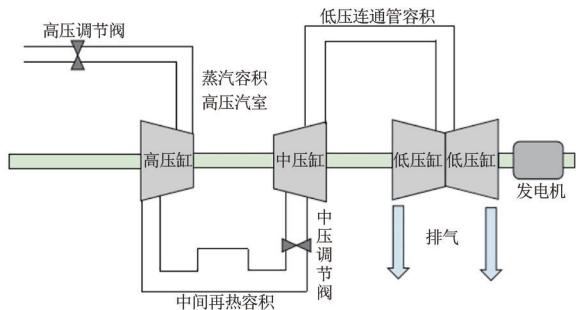
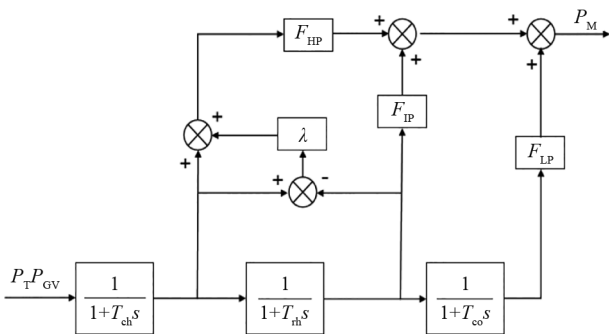


图 4 再热凝气式汽轮机结构示意图



P_T —蒸汽压力; P_{GV} —调门开度; T_{ch} —高压蒸汽容积时间常数;
 T_{th} —再热蒸汽容积时间常数; T_{co} —低压蒸汽容积时间常数; F_{HP} —
 高压缸功率系数; F_{IP} —中压缸功率系数; F_{LP} —低压缸功率系数;
 λ —高压缸过调系数; P_M —汽轮机机械功率输出

图 5 再热式汽轮机动态模型

1.3 飞轮储能模型

飞轮储能的基本原理就是利用飞轮转子的高速旋转来存储与释放能量。采用一阶惯性模型作为飞轮储能的等效模型^[20],并设计虚拟下垂控制为其运行的控制方法^[21],因此飞轮储能系统的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{K_F}{1 + sT_F} \quad (5)$$

式中: K_F 为虚拟下垂控制系数; T_F 为储能时间惯性常数。

飞轮储能系统如图 6 所示,其模块主要由 5 部分组成。

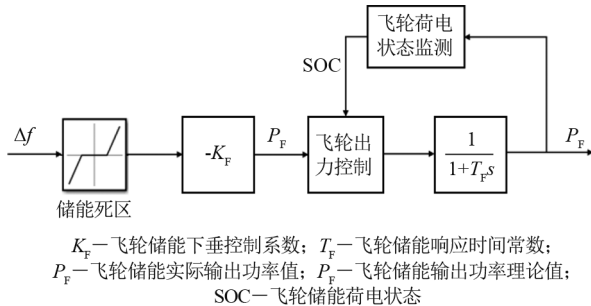


图 6 飞轮储能系统

飞轮储能荷电状态监测系统通过飞轮储能输出功率值计算得出 SOC 实时值,再将 SOC 信号反馈给储能出力控制模块。飞轮储能实时储电量模型计算公式^[22]为

$$S_{OCt} = S_{OC0} - \frac{\int_0^t P_F dt}{E} \quad (6)$$

式中: P_F 为飞轮储能实时输出功率, MW; S_{OC0} 为飞轮储能初始 SOC; E 为飞轮储能总储存电量, MWh。

提出以 logistic 函数^[23]模型为基础,自变量为飞轮储能 SOC 量,因变量为输出功率与额定功率的比值,并以此模型作为飞轮出力的控制方式。其 t 时刻最大充放电值如式(7)与式(8)所示^[24-25]。

$$P_d(t) = \frac{K P_m p \times e^{\frac{r \times (S_{OCt} - S_{OCmin})}{b}}}{K + p_0 \times e^{\frac{r \times (S_{OCt} - S_{OCmin})}{b}}} \quad (7)$$

$$P_c(t) = \frac{K P_m p \times e^{\frac{r \times (S_{OCmax} - S_{OCt})}{b}}}{K + p_0 \times e^{\frac{r \times (S_{OCmax} - S_{OCt})}{b}}} \quad (8)$$

式中: $P_d(t)$ 为飞轮储能放电功率, MW; $P_c(t)$ 为飞轮储能充电功率, MW; S_{OCmax} 为飞轮储能 SOC 上限值; S_{OCmin} 为飞轮储能 SOC 下限值; P_m 为飞轮储能额定输出功率, MW; K, p_0, p, b, r 均为常数。

飞轮储能的 SOC 也可由飞轮转子转动角速度计算,如式(9)所示^[26],可知飞轮的最大转速对应的 SOC 值取 1,最小转速对应 SOC 值取 0。将其值带入式(7)与式(8)中可得出飞轮储能出力控制曲线,如图 7 所示。

$$S_{OC} = \frac{\omega_F^2 - \omega_{Fmin}^2}{\omega_{Fmax}^2 - \omega_{Fmin}^2} \quad (9)$$

飞轮储能,作为一种高效的物理储能系统,为确保其稳定运行,通过设置储能死区,以避免飞轮储能因电网微小频率波动引发非必要的充放电动作。这里,飞轮储能系统的死区设定遵循了电网调频领域

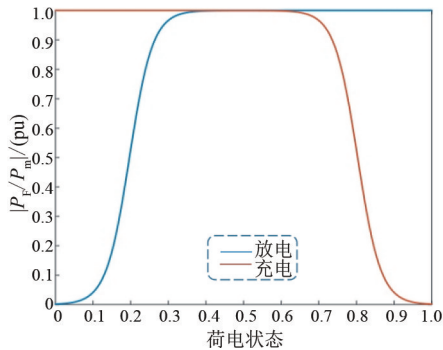


图 7 飞轮储能出力控制曲线

中对于储能设备死区设置的通用准则,将死区值设定为 0.033 Hz,以此作为启动飞轮充放电响应的基准频率变化量^[26]。飞轮储能动作的策略如图 8 所示。

在飞轮充电过程中,为了提高飞轮储能的充电效率,可选择在 SOC 低于 0.6 时进行充电,其最大充电功率可按照额定功率输出,则实际出力值可表示为

$$P_F = -\min(|P'_F|, |P_m|) \tag{10}$$

式中, P'_F 为频率发生波动后系统计算出本应由飞轮储能承担的输出功率值。

当飞轮储能的 SOC 值超过 0.6 时,需要对其输出功率进行调节以避免其储电量过快到达上限,此时飞轮储能实际充电功率为

$$P_F = -\min(|P'_F|, |P_c(t)|) \tag{11}$$

在飞轮放电过程中,由图 6 可知,飞轮储能能在其 SOC 高于 0.4 的情况下放电相对较强,这时可以管好其额定功率输出,其实际出力值表示为

$$P_F = \min[P'_F, P_d(t)] = \min(P'_F, P_m) \tag{12}$$

当飞轮储能 SOC 低于 0.4 时,其储能容量偏小,放电能力较弱,因此需按照飞轮储能的实时 SOC 值来调节输出功率,实际出力值可表示为

$$P_F = \min[P'_F, P_d(t)] \tag{13}$$

故飞轮储能系统的功率指令为

$$P_F = \begin{cases} \min[P'_F, P_d(t)], & \Delta f < -0.033 \text{ Hz} \\ -\min(|P'_F|, |P_c(t)|), & \Delta f > 0.033 \text{ Hz} \end{cases} \tag{14}$$

基于 logistic 函数的储能充电自适应下垂系数仿真模型如图 9 所示。

2 仿真分析

通过所搭建的火-储联合一次调频的仿真模型(见图 3),分别对火电机组单独调频以及火-储联合调频时采用定系数下垂控制和所提基于 logistic 函

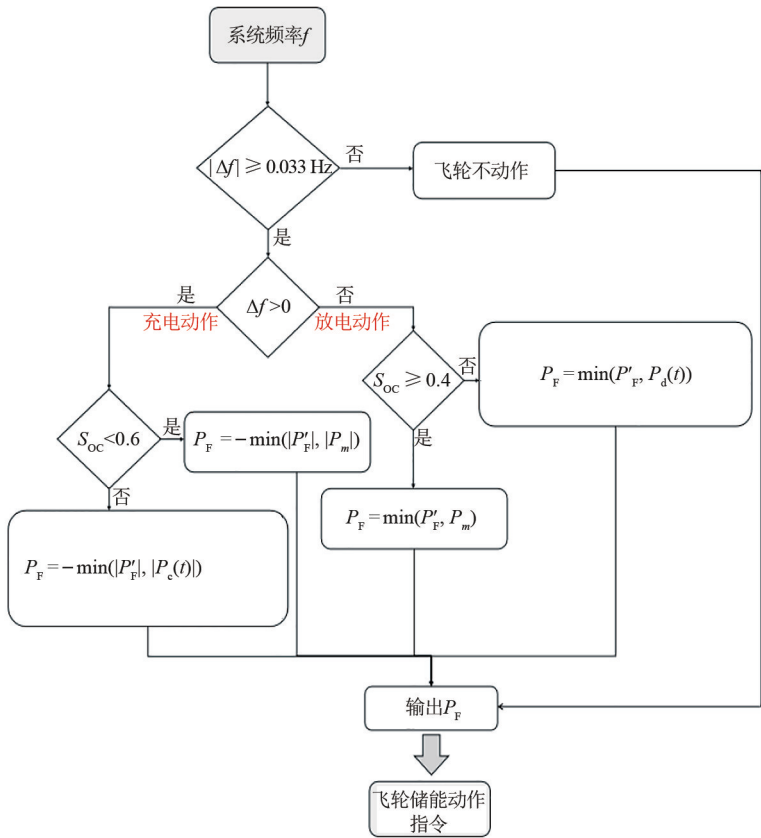


图 8 飞轮储能动作控制策略

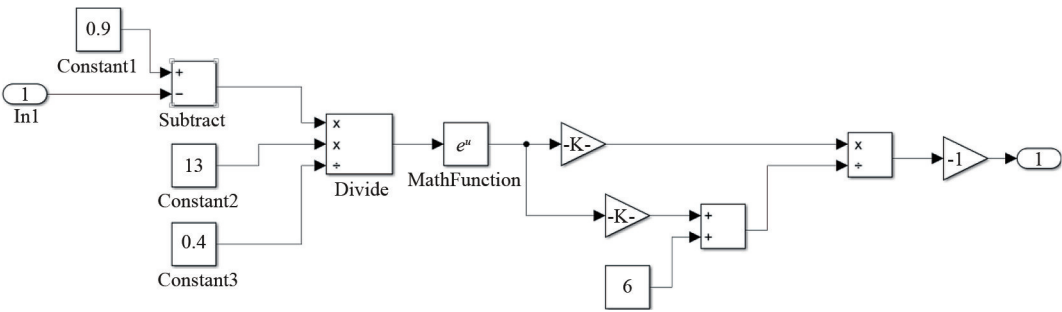


图 9 飞轮储能充电时自适应下垂系数模型

数的自适应下垂控制进行对比分析。模型中火电机组额定功率设为 600 MW,并采用 1 MW/0.25 MWh 的飞轮储能辅助调频,飞轮储能初始 SOC 设为 0.6,模型中相关参数均采用标么值,以 600 MW、50 Hz 为基准值,其中模型选取的各项参数如表 1 所示^[17]。

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
T_g	0.08	T_{CO}	0.5
F_{HP}	0.3	H	6
F_{IP}	0.3	D	2
F_{LP}	0.4	T_{12}	0.881
T_{CH}	0.3	T_F	0.02
T_{RH}	10	K_{g1}/K_{g2}	20
λ	0.805		

2.1 阶跃扰动

$t = 1\text{ s}$ 时,在区域 1、2 中分别加入了 0.01 pu、0.02 pu 的阶跃扰动量。由于两区域的仿真曲线变化相似,故以区域 1 的仿真结果为分析对象。仿真结果如图 10—图 13 所示。

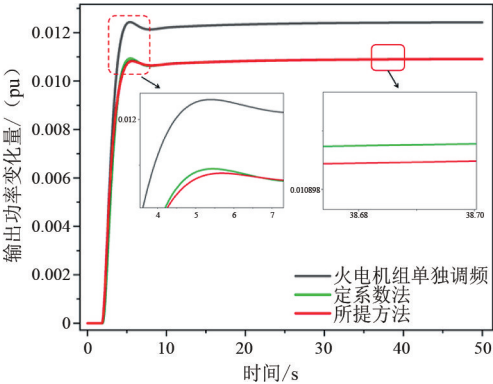


图 10 区域 1 火电机组输出功率变化曲线

由图 10 可知在火电机组单独调频时,汽轮机的输出功率峰值为 0.013 2 pu,稳态输出功率为 0.012 5 pu;在耦合了飞轮储能进行联合调频后,所用两种控制方法的汽轮机输出功率峰值与稳态值均有所下降,从图中可以看出所提方法相比于定系数法控制效果更好。其中,定系数下垂控制下火电机组输出功率峰值比火电机组单独调频减少了 16.67%,

稳态功率减少了 12.71%;所提方法输出功率峰值比火电机组单独调频减少了 18.93%,稳态输出功率减少了 12.73%。

由图 11 可知,在火电机组单独调频时,联络线交换功率峰值为 0.005 4 pu;采用火-储联合调频时,传统定系数法下联络线上交换功率峰值降低了 1.85%,而所提方法交换功率峰值降低了 5.56%,同样体现出所提控制方法更优。

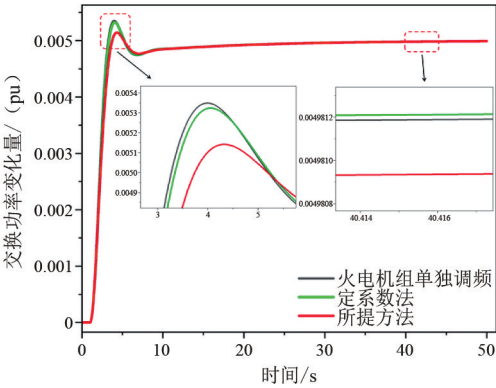


图 11 区域 1 联络线交换功率变化曲线

从图 12 中可以看出,相较于火电机组单独调频,耦合了飞轮储能后调频能力得到明显提升。其中定系数法最大频率变化量为 0.001 56 pu,相比于火电机组单独调频降低了 7.69%,而所提方法最大频率变化量为 0.001 52 pu,相比于火电机组单独调频降低了 10.06%,二者频率偏差相对于无储能的情

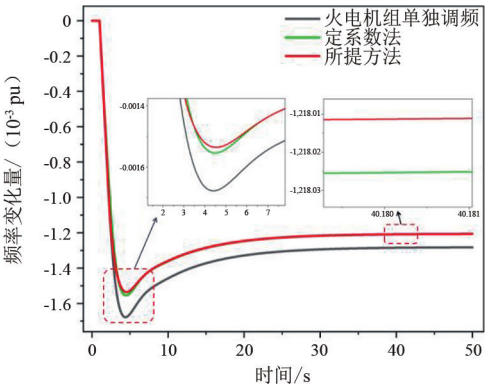


图 12 区域 1 频率变化曲线

况下均有提升,但所提方法的效果更佳。

从图 13 可知,所提基于 logistic 函数的自适应下垂控制相比于传统定系数法最大的优势则是考虑了储能 SOC,能够缩小储能 SOC 的变化范围,减少过充、过放等问题。

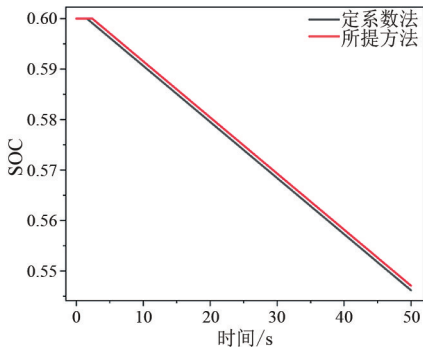


图 13 储能 SOC 变化曲线

2.2 连续扰动

通常一次调频动作是由连续无规律的小幅度负荷快速波动而引起的。因此,下面进一步研究连续扰动下的火-储联合调频效果。区域 1、区域 2 的连续负荷扰动范围分别设置为 $[-0.02, 0.02]$ pu、 $[-0.03, 0.03]$ pu,其中连续扰动持续时间为 5 min。区域 1 与区域 2 仿真结果相似,因此以区域 1 为分析对象,其仿真结果如图 14—图 17 所示。由图 14—图 16 可知,连续扰动下飞轮储能参与调频时在两种控制方法下系统调频效果均有所提升,而所提方法相较于定系数法效果更好,这是由于定系数法存在动态适应性不足等问题,并且定系数法未考虑储能 SOC,飞轮储能在调频过程中还容易造成

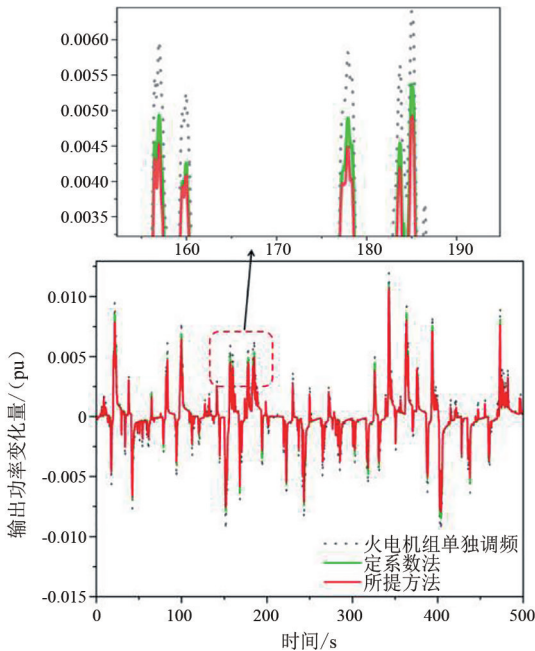


图 14 区域 1 火电机组输出功率变化曲线

过充、过放,而所提方法着重考虑了储能 SOC 与储能输出功率的关系,能够在提高系统调频能力的同时避免飞轮储能在长时间动作时过充、过放。

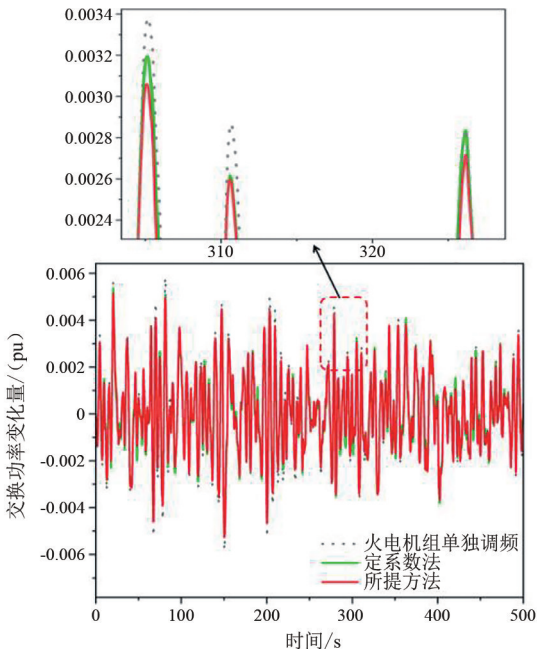


图 15 区域 1 联络线交换功率变化曲线

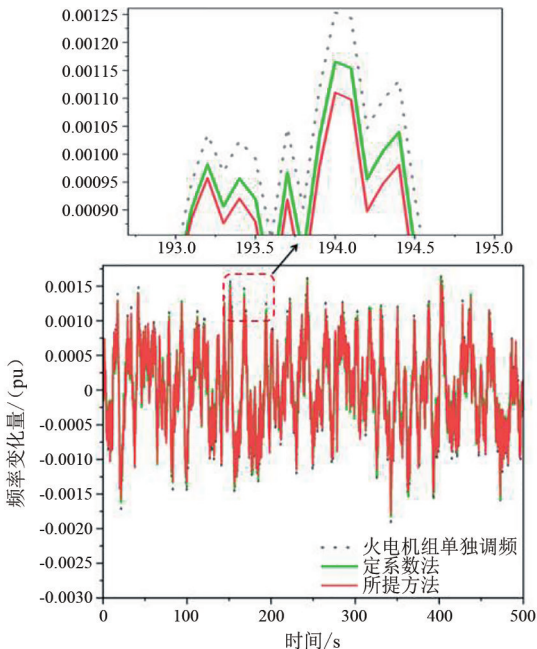


图 16 区域 1 频率变化量

从图 17 可知,采用所提控制方法时储能 SOC 变化相比于定系数法更加稳定,储能 SOC 变化速度和变化范围均有所减小,飞轮储能在输出功率时会结合自身 SOC 情况决定最终输出功率,不会造成储能系统过充、过放等问题。

表 2 为一次调频中两区域频率偏差的峰值绝对值 ($|f_{\max}|$) 与频率偏差的标准差 ($|f_{\text{std}}|$) 仿真结果。

从表 2 中 3 种不同情况下两区域频率偏差对比可知,在飞轮储能参与调频时系统频率偏差波动更小,两种控制方法的调频能力均有提升,其中所提方法控制效果更佳。

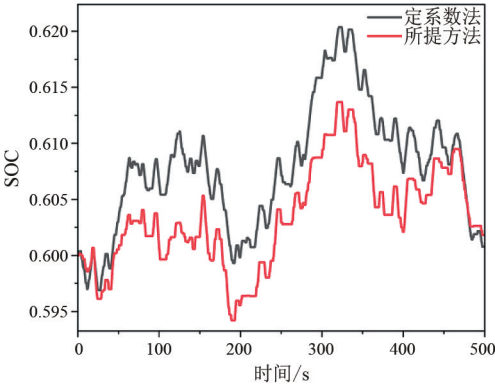


图 17 区域 1 飞轮储能 SOC 变化曲线

表 2 连续扰动下一次调频中频率波动仿真结果

单位: 10^{-3} pu

调频方法	区域 1		区域 2	
	$\Delta f_{1\max}$	$\Delta f_{1\text{std}}$	$\Delta f_{2\max}$	$\Delta f_{2\text{std}}$
仅火电机组	1.908	0.668	2.672	0.723
火-储联合定系数法	1.827	0.617	2.585	0.683
所提方法	1.804	0.609	2.538	0.678

3 结 论

针对高比例新能源并网引发的电力系统频率失稳问题,上面提出了一种基于飞轮储能辅助火电机组的变系数下垂控制策略,通过仿真分析与实验验证,得出以下结论:

- 1) 所提控制方法在飞轮储能系统辅助火电机组一次调频时能够更有效地减少频率偏差,提高电力系统稳定性。如区域 1 加入 0.01 pu 阶跃扰动量时,所提方法最大频率偏差相比于火电机组单独调频时减少了 10.06%,相较于定系数法减少了 2.37%。
- 2) 所提控制方法在减小两区域间联络线上交换功率波动以及火电机组输出功率效果更佳。如区域 1 加入 0.01 pu 阶跃扰动量时,所提方法联络线交换功率峰值相比于定系数法降低了 3.71%,火电机组输出功率峰值相比于定系数法降低了 2.26%,说明所提方法能够更有效地提高电力系统稳定性,减少火电机组出力。
- 3) 所提方法通过引入 logistic 函数动态调整储能下垂控制系数,提升储能系统的动态适应性,合理

优化了储能出力,减少了飞轮储能过充、过放等问题,并且所提方法能够在保持较好调频效果的同时使储能 SOC 也维持良好。

参考文献

[1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.

[2] 刘园园.国家能源局:我国风电光伏发电装机规模超过煤电[N].科技日报,2024-08-01(003).

[3] 唐亮,尹小波,吴候福,等.电化学储能产业发展对安全标准的需求[J].储能科学与技术,2022,11(8):2645-2652.

[4] 陈海生,李泓,徐玉杰,等.2023 年中国储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(5):1359-1397.

[5] JONES C R, HILPERT P, GAEDE J, et al. Batteries, compressed air, flywheels, or pumped hydro? Exploring public attitudes towards grid-scale energy storage technologies in Canada and the United Kingdom[J]. Energy Research & Social Science, 2021(80):102228.

[6] 戴兴建,魏鲲鹏,张小章,等.飞轮储能技术研究五十年评述[J].储能科学与技术,2018,7(5):765-782.

[7] 涂伟超,李文艳,张强,等.飞轮储能在电力系统的工程应用[J].储能科学与技术,2020,9(3):869-877.

[8] 李树胜,王佳良,李光军,等. MW 级飞轮阵列在风光储能基地示范应用[J].储能科学与技术,2022,11(2):583-592.

[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):2597-2606.

[10] 何林轩,李文艳.飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J].储能科学与技术,2021,10(5):1679-1686.

[11] 罗耀东,田立军,王垚,等.飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(9):71-82.

[12] 陈玉龙,武鑫,滕伟,等.用于风电功率平抑的飞轮储能阵列功率协调控制策略[J].储能科学与技术,2022,11(2):600-608.

[13] 刘颖明,徐中民,王晓东.考虑飞轮储能的风电场有功功率平滑控制[J].储能科学与技术,2015,4(2):194-197.

[14] 梁恺,彭晓涛,秦世耀,等.基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2628-2641.

[8] 邵宜祥, 纪历, 袁越, 等. 可变速抽水蓄能机组在抽水工况下的自启动方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 125-130.

[9] 王欣竹, 韩民晓, TESHAGER B G. 双馈式可变速抽水蓄能机组无功特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2918-2925.

[10] JOSEPH A, CHELLIAH T R. Analysis of doubly fed asynchronous machine operating at condenser mode subjected to power converter faults [C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), December 14 - 17, 2016, Trivandrum, India. IEEE, 2017: 1-6.

[11] 陈亚红, 邓长虹, 武荷月, 等. 发电工况可变速抽蓄机组模式切换过程多阶段柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5258-5274.

[12] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 942-957.

[13] 李俊辉. 可变速抽水蓄能机组发电工况一次调频特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[14] ZOU J, ZHU J Z, XIE P P, et al. Regulating short-time wind power fluctuation by variable speed pumped storage unit [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Augsut 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2020: 1-5.

[15] 罗远翔, 李鑫明, 潘超, 等. 含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 76-85.

[16] 丁理杰, 史华勃, 陈刚, 等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备, 2021, 44(3): 166-171.

[17] 龚国仙, 吕静亮, 姜新建, 等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1878-1884.

[18] 朱珠, 潘文霞, 刘铜锤, 等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 463-474.

作者简介:

杨桂兴(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

郭小龙(1983), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;

常喜强(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

亢朋朋(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定运行与控制。

(收稿日期: 2024-10-23)

(上接第 31 页)

[15] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

[16] YU J L, FANG J Y, TANG Y. Inertia emulation by flywheel energy storage system for improved frequency regulation [C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 10-13, 2018, Singapore. IEEE, 2018: 1-8.

[17] 高翔. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[18] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.

[19] 吴天宇. 基于模糊控制理论的两区域互联电网 AGC 的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.

[20] 田云峰, 郭嘉阳, 刘永奇, 等. 用于电网稳定性计算的再热凝汽式汽轮机数学模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 39-44.

[21] LUO Y D, TIAN L J, WANG X, et al. A new coordinated control strategy of flywheel energy storage system participating in primary frequency regulation of power grid [C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I & CPS Asia), July 13 - 15, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020: 536-544.

[22] 丰云鹤. 储能电池参与电力系统一次调频控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

[23] 马智慧. 考虑调频死区的储能参与电网一次调频控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

[24] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020.

[25] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

[26] 隋云任. 飞轮储能辅助 600 MW 燃煤机组调频技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

作者简介:

赵 康(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于飞轮储能提升电网频率稳定性。

(收稿日期: 2024-08-16)