

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.034

风火储能联合系统一次调频仿真分析

李凌峰¹, 赵红波¹, 王斌¹, 张骏²

(1. 内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司, 内蒙古自治区 乌兰察布 013550;

2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:为解决太阳能、风能等清洁能源大规模并网时造成的电网频率稳定性下降的问题,提出一种由混合储能装置、风电机组及火电机组组成的风火储能联合调频系统。利用 MATLAB/Simulink 对该系统在扰动时的频率变化特性进行模拟仿真,分析得出在 0.03 p.u.MW 的阶跃扰动下,相较于仅含火电机组的调频系统,风火储能联合调频系统的最大频率偏差下降 54.24%。

关键词:一次调频;混合储能;风电机组;频率特性;荷电状态

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0173-05

Simulation Analysis of Primary Frequency Modulation in Wind-fire-storage System

Li Lingfeng¹, Zhao Hongbo¹, Wang Bin¹, Zhang Jun²

(1. Inner Mongolia Huadian Huiteng Xile Wind Power Generation Co., Ltd., Ulanqab 013550, China;

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract:To address the decline in grid frequency stability caused by the large-scale integration of clean energy sources such as solar and wind power, this paper proposes a wind-fire-storage combined frequency modulation system consisting of hybrid energy storage devices, wind turbines, and thermal power units. Using MATLAB/Simulink, the frequency variation characteristics of the system under disturbances are simulated. and the results show that tunder a step disturbance of 0.03 p.u. MW, the maximum frequency deviation of the wind-fire-storage combined frequency regulation system is reduced by 54.24% compared with the frequency regulation system only containing thermal power units.

Keywords:primary frequency modulation; hybrid energy storage; wind turbine; frequency characteristics; state of charge

0 引言

目前火电机组在电网调频方面具有重要的作用。然而,火电机组响应能力较低,无法快速跟踪调频指令。因此,需引入具有快速响应能力的储能系统以改善火电机组对电网频率调节效果^[1],目前已有大量学者对火电厂一次调频网源协调技术的原理进行了深入剖析^[2-4]。国内外研究人员已在探究风储调频问题方面进行了大量研究。许天阳等^[5]提出虚拟同步发电机(VSG)并联频率的协同优化设计方案,解决了虚拟同步发电机系统一次调频中出现的频偏问题。梁恺等^[6]提出根据风机定子功率等控制飞轮储能出力的协同控制策略。李东东等^[7]利用多目标优化算法对风电机组与电池储能联合调频系统死区参数进行了优化。

陈长青等^[8]探究了储能装置安装位置对风储系统的影响。金都等^[9]建立了风电机组耦合飞轮储能的调频模型并提出了改进后的虚拟下垂控制方法。朱颜等^[10]提出了一种用于风储联合调频系统的协同控制策略。曹宇龙^[11]深入探究挖掘风储联合系统调频潜力。郭克等^[12]提出了一种考虑机组旋转备用分类的风电一次调频协同控制算法。卢守炬^[13]提出基于一次调频优化的区域风电场群储能电站协调控制以确保电网频率稳定。张碧溪^[14]针对风电机组参与一次调频场景下传动轴载荷激增与调频性能受限的矛盾,提出风-储联合一次调频控制策略。王祺等^[15]提出一种风电机组虚拟惯量优化控制策略。吴辉^[16]设计了分段综合惯量调控策略,提升电网稳定性与灵活性。张小莲等^[17]提出一种多风电场参与电网

基金项目:中国华电集团有限公司重大科技项目(CHDKJ23-02-292)

第一作者简介:李凌峰(1988—),男,内蒙古自治区乌海人,工程师,硕士,研究方向为风光火储一体化平台开发,hdbdhn@126.com。

一次调频的调频功率协同分配策略。王利锋等^[18]通过算例仿真分析出采用综合虚拟惯量控制方式下风电对于电力系统一次调频能力支撑能力最大。李卫国等^[19]提出基于风机转子转速以及荷电状态的变系数风储联合系统参与一次调频控制策略。季湛洋^[20]提出了一种计及叶片、主轴、发电机、控制等多领域耦合特性的风电机组快速调频动态建模方法。奥博宇等^[21]阐述了一种融合模糊前馈和原始 PID 控制的变桨频率调整策略使变速风电机组参与调频。田春笋等^[22]提出一种基于模糊逻辑控制的风电机组综合控制策略,来解决风电机组转子转速和电网频率解耦导致机组惯性和频率响应能力不足的问题。杨婷婷等^[23]提出一种针对风电场内风机分组运行的持久备用功率再分配策略。褚志杰等^[24]提出了一种混合储能辅助电网调频的综合控制策略,有效改善电网频率偏差。赵熙临等^[25]提出了一种考虑电池储能 SOC 的双目标优化方法,延长其使用寿命。综上所述,现有研究集中于分析仅含单一储能装置的风储调频系统的调频能力,而关于评估包含风电机组、火电机组及多个储能装置的调频系统进行一次调频效果的研究较少。因此,本文将对上述包含多储能装置的风火储调频系统进行建模,着重分析在受到外界扰动时,该系统频率及各储能装置荷电状态的变化。

1 混合储能参与一次调频模型

1.1 飞轮储能模型

为评估飞轮储能装置一次调频能力与效果,将飞轮储能的模型等效为一阶惯性模型,并采用虚拟下垂控制作为该设备参与一次调频的控制方式。其传递函数如下

$$G_f(s) = -\frac{K_f}{1+s \cdot T_f} \quad (1)$$

式中: K_f 为飞轮储能下垂控制系数; T_f 为飞轮储能调速器时间常数; s 为拉普拉斯算子。

1.2 电池储能模型

电池储能装置能够在频率发生波动时通过化学能及电能之间的相互转化从而输入输出功率,维持频率稳定。本文采用一阶惯性模型等效电池储能模型,表达式如下

$$G_b(s) = -\frac{K_b}{1+s \cdot T_b} \quad (2)$$

式中: K_b 为电池储能下垂控制系数; T_b 为电池储能

调速器时间常数。

1.3 风电模型

变速风电机组具有两种控制方式:惯性控制及变桨距控制。惯性控制传递函数为

$$G_\alpha(s) = -\frac{K_{df}s}{1+T_\alpha s} \quad (3)$$

式中: K_{df} 为惯性响应系数; T_α 为惯性响应时间常数。

变桨距控制方式传递函数为

$$G_\beta(s) = -\frac{K_{pf}}{1+T_\beta s} \quad (4)$$

式中: K_{pf} 为一次调频系数; T_β 为变桨距响应时间常数。

通过将上述两种控制方式结合,能够使风电机组兼具惯性响应及一次调频能力,其传递函数为

$$G_w(s) = G_\alpha(s) + G_\beta(s) \quad (5)$$

1.4 发电机负荷模型

发电机负荷模型可由以下传递函数表示

$$G(s) = \frac{1}{2Hs + D} \quad (6)$$

式中: H 为惯性常数; D 为阻尼系数。

1.5 风火储联合调频模型

根据上述模型,本文建立了风火储一次调频响应模型,如图 1 所示。

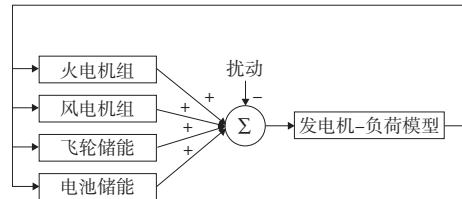


图 1 风火储联合调频模型

2 仿真分析

本文利用 MATLAB/Simulink 软件建立混合储能参与一次调频仿真模型。火电机组额定功率为 600 MW,系统额定频率为 50 Hz,其余参数均采用标幺值。风电场系统容量为 60 MW,电池储能与飞轮储能系统容量分别为 6 MW/6MW·h 与 8 MW/2MW·h。火电机组及飞轮储能调频死区均设置为 0.033 Hz,而电池储能调频死区设置为火电机组的 60%。系统主要参数如表 1 所示。其中, F_{HP} 为高压缸功率比例; F_{IP} 为中压缸功率比

例; F_{LP} 为低压缸功率比例; K_g 为卡尔曼增益常数; T_{ch} 为高压调门蒸汽容积时间常数; T_{rh} 为再热蒸汽容积时间常数; T_{co} 为低压连通管蒸汽容积时间常数; T_g 是调速器时间常数。

表1 模型参数

参数	数值	参数	数值
D	2	K_{pf}	20
F_{HP}	0.325	T_g	0.080
F_{IP}	0.295	T_f	0.020
F_{LP}	0.380	T_{ch}	0.271
H	6	T_{rh}	13
K	6	T_{co}	0.400
K_b	10	T_b	0.100
K_f	16.700	T_α	0.100
K_g	20	T_β	3

2.1 模型验证

为确保仿真的精准性,本文首先采用系统1进行模型验证。在 $t=1\text{ s}$ 时向上述系统施加 0.50 p.u.MW 的扰动,火电机组模型跟随输出功率如图2所示。据观察,火电机组在 $t=41.2\text{ s}$ 时输出功率达到 0.49 p.u.MW ,且在输出功率达到稳定后,与所施加的扰动偏差远小于 0.01 p.u.MW 。因此,本文模型可以用于仿真分析。

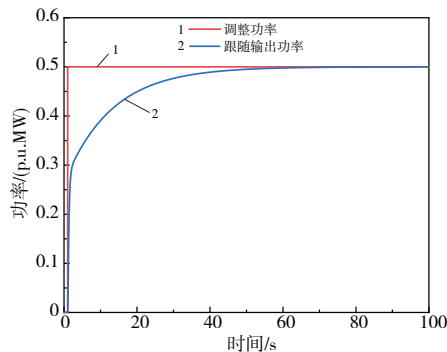


图2 模型验证

2.2 阶跃扰动仿真分析

为评估不同设备辅助火电机组的调频效果本文将对如下系统进行分析:1)无储能系统,即仅有火电机组参与一次调频,简称为系统1;2)风电调频系统,即火电机组耦合风电机组进行调频,将其命名为系统2;3)储能调频系统,即火电机组耦合飞轮储能及电池储能进行调频,将该系统称为系统3;4)混合储能系统,即火电机组同时耦合飞轮储能、电池储能及飞轮储能,该系统命名为系统

4。当 $t=1\text{ s}$ 时,在各系统中加入 0.03 p.u.MW 的阶跃负荷扰动。系统频率变化如图3所示。计算出各系统最大频率偏差 Δf_m 、稳态频率偏差值 Δf_s 、方差 s^2 ,上述参数越小,表明调频效果越好。

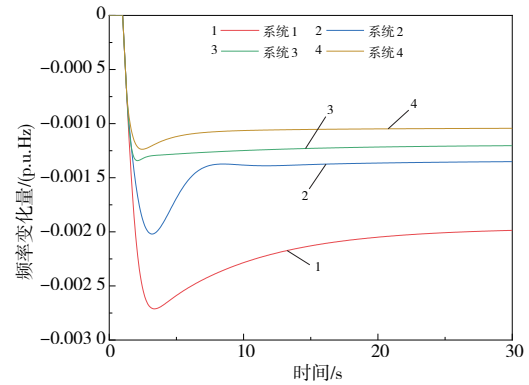


图3 阶跃扰动下系统频率变化图

相较于其余调频系统,系统1的最大频率偏差及稳态频率偏差值最大。相较于系统2,系统3中 Δf_m 与 Δf_s 分别下降了33.66%与11.11%,且最大频率偏差时刻较系统2提前了1.09 s。上述结果表明在阶跃扰动下,相较于风电机组,混合储能对系统频率变化响应更快,调节频率能力更强,有利于维持频率稳定。系统4相较于无储能的系统1,最大频率偏差降低了54.24%,系统4中的方差较系统1、系统2、系统3分别下降了88.35%、70.38%、29.31%。且相较于其余系统,系统4中 Δf_m 与 Δf_s 均为最小。表明该系统对电网频率调节性能最强,有利于电网频率在最短时间内恢复稳定。

2.3 连续扰动仿真分析

为进一步分析各系统一次调频响应能力,评估一次调频效果,在各系统中加入幅值在 $-0.050\text{ p.u.MW} \sim 0.050\text{ p.u.MW}$ 之间的连续扰动。图4描绘了扰动量随时间的变化。

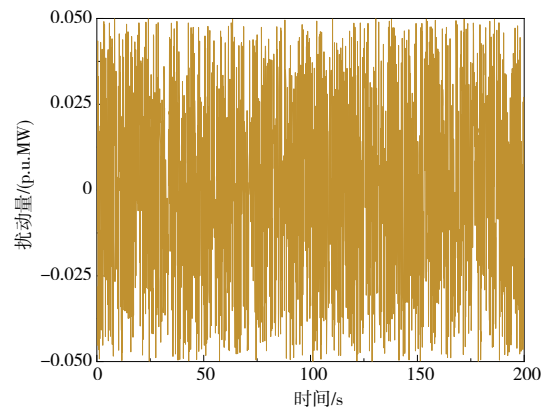


图4 连续扰动

为评估各系统在连续扰动下的调频能力及调频效果,本文给出了不同时刻各系统频率变化量,如图5所示。最大频率偏差的绝对值 $|\Delta f_m|$ 、 Δf_{pv} 及方差 s^2 ,结果如表2所示。值得注意的是,频率偏差峰谷差越小,表明该系统波动性越小。

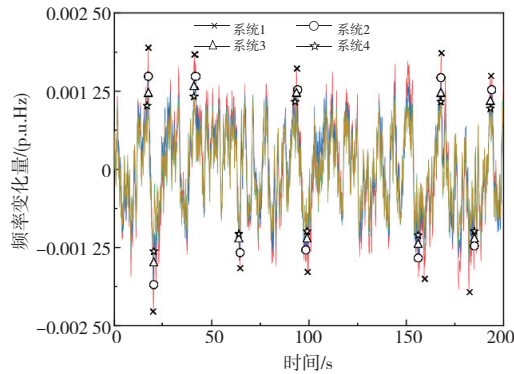


图5 连续扰动下系统频率变化

表2 连续扰动下系统参数

系统	$ \Delta f_m /(p.u.MW)$	$\Delta f_{pv}/(p.u.MW)$	s^2
1	0.002 27	0.004 21	6.10×10^{-7}
2	0.001 83	0.003 33	4.87×10^{-7}
3	0.001 51	0.002 86	3.30×10^{-7}
4	0.001 31	0.002 48	3.20×10^{-7}

当系统中仅有火电机组参与调频时,系统频率随时间变化较大,表明系统调频能力较弱。而当火电机组耦合风电后, Δf_{pv} 及方差分别下降了19.38%与20.16%,表明风电机组参与调频能够有效减小火电机组的调频压力,提升电网频率稳定性。值得注意的是,储能装置对于一次调频具有较大影响,当火电机组耦合储能装置后, $|\Delta f_m|$ 由0.002 27 p.u.MW下降至0.001 51 p.u.MW,最大频率偏差值下降了42.29%,同时方差下降了45.90%。上述结果表明电池储能参与一次调频后,系统调频效果显著提升。此外,系统4的方差仅为 3.20×10^{-7} ,较系统2及系统3分别降低了34.29%及3.03%。据此可得出,相较于其余系统,系统4的一次调频能力最强,效果最好。

图6显示了在连续扰动下,各系统火电机组出力情况。观察可知,相较于其他系统,系统1中火电机组输出功率最大。其主要原因为其他系统中含有储能设备或风电机组,能够对频率偏差信

号进行快速响应,减轻火电机组调频压力。值得注意的是相较于系统3,系统2中的火电机组出力更小,表明相较于风电机组,混合储能装置在系统频率变化时输出功率更大。此外,相较于系统1、系统2、系统3,系统4中火电机组出力峰值分别下降59.81%、45.73%、18.48%。表明同时耦合飞轮储能及电池储能能够减小风电机组波动范围,平缓机组出力,提高机组稳定性。

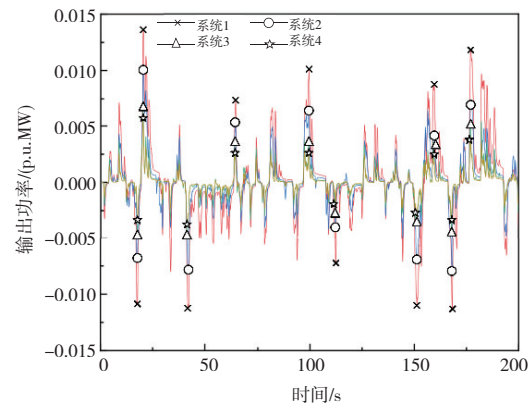
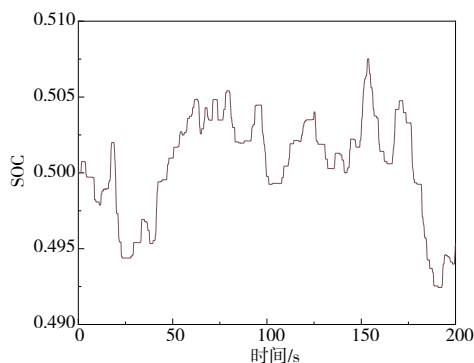


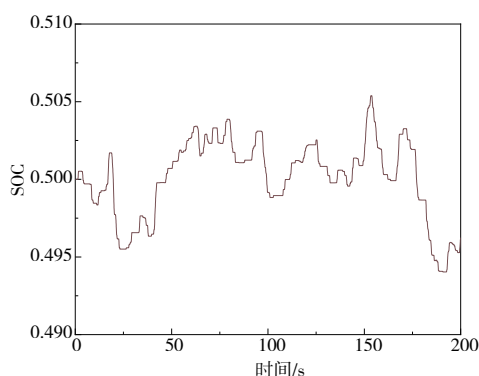
图6 连续扰动下各系统火电机组出力

图7(a)及图7(b)显示了各系统中飞轮储能荷电状态随时间的变化情况。据观察,两个系统中飞轮储能SOC均在0.490~0.510范围内波动。其主要原因为飞轮储能输出功率受到控制模块限制,能够使其保存一定电量以应对后续的频率波动,故飞轮储能能够在保证调频效果的同时维持荷电状态稳定。值得注意的是,相较于系统3,系统4中飞轮储能SOC峰值由0.508下降至0.505,谷值则由0.492上升至0.494,其结果表明系统4中飞轮储能装置荷电量波动量下降,这有助于保护储能设备。

图8(a)及图8(b)则分别描绘了系统3与系统4中电池储能SOC变化曲线。据观察上述系统中电池储能SOC荷电状态变化趋势基本一致,不同之处在于二者波动范围不同。值得注意的是,系统3中电池储能SOC峰值与谷值分别为0.516与0.491,而系统4中峰值则下降至0.503,谷值上升至0.498。上述结果表明系统4中电池储能SOC波动范围略微减小。其主要原因为系统4中还包含飞轮储能,当频率发生变化时,飞轮储能与电池储能能够同时输出功率以稳定频率,即电池储能出力下降。

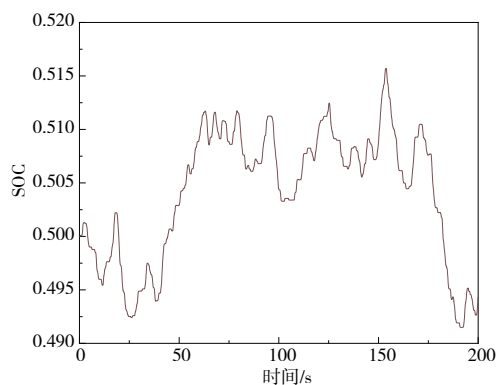


(a) 系统3飞轮储能SOC

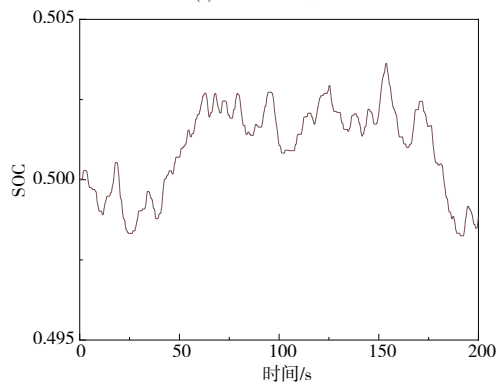


(b) 系统4飞轮储能SOC

图7 飞轮储能装置荷电状态



(a) 系统3电池储能SOC



(b) 系统4电池储能SOC

图8 不同系统电池储能荷电状态

综上所述,系统3、系统4在一次调频过程中,储能设备荷电状态保持良好。值得注意的是系统4中储能设备出力更加均匀,有助于保护储能设备及延长其寿命。

3 结语

本文建立了包含混合储能装置的风火储联合调频模型,并对该模型在受到阶跃扰动及连续扰动时的调频效果进行了评估分析,主要结论如下:

1)相较于传统的火电机组调频,风火储联合调频方法能够降低系统波动量并提升频率恢复速度。当系统分别受到阶跃及连续扰动时,最大频率偏差值分别下降54.24%及42.29%。

2)混合储能装置及风电机组的加入能够有效减小火电机组调频压力。在连续扰动时,相较于系统1,系统4中火电机组出力峰值下降59.81%。

3)风电机组加入有助于减少各储能设备的出力,从而保护储能设备并延长其使用寿命。相较于系统3,系统4中各储能装置SOC波动范围更小。

参考文献:

- [1] 王培君,刘志其,李键基,等. 一次调频系统在电力系统中的作用与未来的发展趋势[J]. 电工技术,2025(增刊1):346-348.
- [2] 单腾,马智鑫. 350MW深度调峰机组一次调频控制策略分析[J]. 电气时代,2025(5):54-57.
- [3] 孟令臣. 火电厂一次调频网源协调技术原理与应用探究[J]. 科技资讯,2025,23(17):69-72.
- [4] 张晓航,王建涛,史永斌,等. 火电机组一次调频小频差优化控制改造研究及应用[J]. 电气技术与经济,2025(7):102-106.
- [5] 许天阳,李峰. 并网下虚拟同步发电机并联频率无差协调控制[J]. 机械制造与自动化,2025,54(5):252-256.
- [6] 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):2628-2640.
- [7] 李东东,陈治廷,徐波,等. 考虑一次调频死区的风储协同调频机理分析及死区参数优化[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(4):38-47.
- [8] 陈长青,李欣然,黄际元. 计及风储拓扑结构的调频和平波抑动研究[J]. 热力发电,2022,51(4):55-61.
- [9] 金都,刘广忱,孙博文,等. 计及风电场的飞轮储能一次调频控制策略[J]. 储能科学与技术,2024,13(6):1911-1920.

(下转第206页)

- 收稿日期:2025-05-06

- [19] 李卫国,梁智豪.基于风机转子转速以及荷电状态的变系数风储联合系统参与一次调频控制策略[J].东北电力大学学报,2025,45(1):83-94.
- [20] 季湛洋,胡阳,孔令行,等.考虑多领域耦合特性的风电机组一次调频动态建模与仿真[J].中国电力,2025,58(4):56-67.
- [21] 奥博宇,陈磊,闵勇,等.提升变桨减载风电机组调频性能的模糊前馈控制[J].中国电机工程学报,2025,45(11):4230-4243.
- [22] 田春笋,王浚怡,蒋小亮,等.基于模糊控制与风速分区的风电机组一次调频控制策略研究[J].可再生能源,2025,43(1):124-133.
- [23] 杨婷婷,徐永强,李浩千,等.一种考虑频率二次跌落的风火联合调频控制策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(21):62-71.
- [24] 褚志杰,韩朋谊,郑立星,等.混合储能参与电网一次调频的综合控制策略研究[J].动力工程学报,2025,45(9):1511-1518,1535.
- [25] 赵熙临,姚业佩,何晶晶,等.考虑风机分组的风储联合辅助调频双目标预测优化方法[J].电网与清洁能源,2021,37(10):59-66.

收稿日期:2024-10-11