

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.06.003

用于火储联合调频的多元混合储能系统应用及经济性分析

邹杰, 周占平, 邵国栋

(中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司, 山东 济南 250001)

摘要:受汽电转换特性的影响,传统火电机组有功调节精度低,响应速率慢。通过合理配置储能系统联合火电机组调频,可减少机组因调频引起的机械损伤,更好地满足以新能源为主体的新型电力系统的调频需求。对新型电力系统的调频需求进行分析,研究由锂离子电池储能系统与飞轮储能系统组成的多元混合储能系统的特点,利用锂离子电池容量大、调频里程长和飞轮储能系统响应速度更快、调节功率大、寿命长的特点,通过合理的接线设计和智能协调控制策略,实现两种储能技术的优势互补。通过案例分析,介绍储能系统容量配置原则、储能系统接线型式及控制策略,并进行收益计算及技术经济性分析,验证了多元混合储能系统的技术方案及经济性是可行的。

关键词:辅助服务;飞轮储能;多元混合储能;联合调频;经济性分析

中图分类号:TM611.1

文献标识码:A

文章编号:1007-9904(2024)06-0020-07

Application and Economic Analysis of Multi-element Hybrid Energy Storage System Joint With Thermal Power Units for Frequency Regulation

ZOU Jie, ZHOU Zhanping, SHAO Guodong

(Power China SEPCO1 Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract: Due to the influence of steam to electricity conversion characteristics, traditional thermal power units have low accuracy in active power regulation and slow response rates. By properly configuring the energy storage system in conjunction with frequency regulation of thermal power units, mechanical damage caused by frequency regulation can be reduced, better meeting the frequency regulation needs of new power systems dominated by new energy. An analysis was conducted on the frequency regulation requirements of the new power system, and the characteristics of a multi-component hybrid energy storage system composed of lithium-ion battery energy storage system and flywheel energy storage system were studied. By utilizing the characteristics of large capacity of lithium-ion batteries, long frequency regulation mileage, faster response speed, large regulation power, and long service life of flywheel energy storage system, the advantages of the two energy storage technologies were complemented through reasonable wiring design and intelligent coordinated control strategy. Through case analysis, the principles of capacity configuration, wiring types, and control strategies of energy storage systems were introduced, and the benefits calculation and technical and economic analysis were carried out to verify the feasibility of the technical scheme and economic efficiency of the multi element hybrid energy storage system.

Keywords: auxiliary service; flywheel energy storage; multi-element hybrid energy storage; joint frequency regulation; economic analysis

0 引言

以风能、太阳能为代表的可再生能源被认为是实现能源行业可持续发展的最有效途径之一,构建以新能源为主体的新型电力系统是实现碳中和、碳达峰的主要举措^[1]。新型电力系统面临的两个主要

问题是新能源消纳受限以及电力系统安全稳定运行风险增大。目前具有机械转动惯量的火电机组发电量占比呈下降趋势,电网可用的调频资源逐渐减少,电网频率控制的结构困境日趋明显^[2]。可再生能源发电的间歇性和波动性也要求电力系统内其他组成部分必须具备一定的应变和响应能力,电网的暂态频率稳定对于电力系统的安全运行意义重大。

数据显示,2022年我国火电发电量占比降低为

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021ME118)。

Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2021ME118)。

69.8%^[3],作为电力系统“压舱石”的火电机组的调频能力是电网公司考核的重要指标,制约着电网的安全稳定运行^[4]。国家及各地能源局陆续发布电力辅助服务管理办法文件^[5],对各类型机组的包括调频、调峰、转动惯量在内的有功平衡服务进一步明确了相关规定。根据各区域调频辅助服务需求,对火电机组进行灵活性改造,合理配置储能系统,可以弥补火电机组独立调频的不足,是提高火电机组调频性能的重要方式^[6-7]。

在单一能量型储能参与电力系统调频方面,文献[8]以锂电池储能戴维南等效模型为基础,建立考虑容量衰减和电流倍率的电池改进模型,提出了一种面向调频的锂电池荷电状态(state of charge, SOC)的估计方法。对长沙某地区同条件下的电池储能系统和火电机组进行对比实验,电池储能系统在不设置调频死区的情况下,调频速率是火电机组的20倍以上;文献[9]对蓄电池储能系统调频辅助服务进行了大量研究,提出了蓄电池储能系统参与电网频率调制的双层自适应调节控制策略。文献[10]提出利用傅里叶变换来合成频率信号,并与常规控制策略进行对比来配置电池储能系统的容量。在单一功率型储能参与电力系统调频方面,文献[11]对压缩空气储能系统的调频间隔设置人工死区,并应用自适应控制算法调整虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的系数,可以减少常规火电机组高比例输出带来的机械磨损,提高系统运行经济性。文献[12]提出了带负荷预测的火电机组耦合飞轮调频模型,火电机组平均调节率降低了2.9%。文献[13]在传统两区域火电机组模型中加入飞轮储能后,频率波动和平线功率分别降低了93.2%和60%,并很大程度地抑制了火电机组的振动。文献[14]对飞轮储能设计了一种转速和电流双闭环的控制策略,并对其充放电和并网进行仿真研究。以上研究均是单一储能辅助火电机组参与调频,对于实际火电机组而言,现行单一储能辅助调频的使用往往受到诸多限制,例如能量密度低、存储能量有限、应用范围小,无法满足快速响应和高功率输出的要求。

电力系统的安全稳定运行需要更多优质的电力调节资源应用于调频辅助服务市场。当前,国内外学者对混合储能参与电力系统调频也有较多的研究。YANG等人构建了一种新型超导磁储能和电

池储能拓扑模型,仿真结果表明,该结构响应速度在5 ms以下,电压抑制效果可达95%以上^[15]。文献[16]建立抽水蓄能-飞轮的混合储能阵列模型,提出了一种抽水蓄能-飞轮混合储能系统的协调控制策略。经过仿真验证,抽水蓄能机组的综合调频性能指标可提高2.29倍以上。文献[17]建立了考虑混合储能动态充放电效率的火力储能容量优化配置模型,该模型给出了充放电功率与不同类型储能效率之间的函数关系。经过仿真验证,所提出的策略可以满足火力发电厂对区域控制误差信号的跟踪需求,并降低储能的规划和运行成本。当前对于多元混合储能系统的研究还仅局限于理论层面,在实际的工程应用中还涉及较少。

相对于单一的储能系统,多元混合储能系统耦合了不同类型的储能技术,可以充分发挥各储能技术的特点,为电力系统提供多样化的储能和输出能力。在实际的工程实践中,多元混合储能系统在提高电力系统的响应速度、优化运行效率、降低能源消耗和提高电能的质量上具有丰富的应用潜力。

文献[18]对多元电化学储能的经济性进行了测算,对规模化多元储能技术在电力系统中的应用提出了总结与展望。文献[19]提出了储能与风电联合参与调频服务的策略,并建立了优化模型,通过仿真表明联合调频可显著提高运行收益。文献[20]研究了氢储能、钠硫电池储能、超级电容构成的多元混合储能在潮汐-风能系统中的容量配置,并构建目标函数分析验证分布式多元储能的优越性。

根据上述研究,由多种储能型式组成的多元储能系统具备经济性和优良的调频性能,在新型电力系统的各种调频应用领域均能发挥其优势作用^[21-23],储能系统联合运行的经济性是新型电力系统可持续健康发展的重要基础,通过多元混合的方案,不断提升技术性能,降低成本,用于调频的多元储能电站将迎来更大规模化的商业化运营。

1 电力系统对火电机组的调频需求

1.1 电力系统调频分析

根据频率变化的周期和幅值大小,火电机组应对电网频率变化的响应分为转动惯量响应、一次调频、自动发电控制(automatic generation control, AGC)三个暂态过程,惯量响应是机组的被动响应,是基于机

组固有机械转动惯量的短时、低能量调频过程;一次调频是机组通过自身控制系统的自动调频反应,通过调整机组有功出力减少输出频率偏差的过程,调频响应时间为10~30 s;AGC即二次调频,一般为分钟级,根据系统调度需求,通过调整机组静态功率特性实现功率调节,典型调频过程如图1所示。

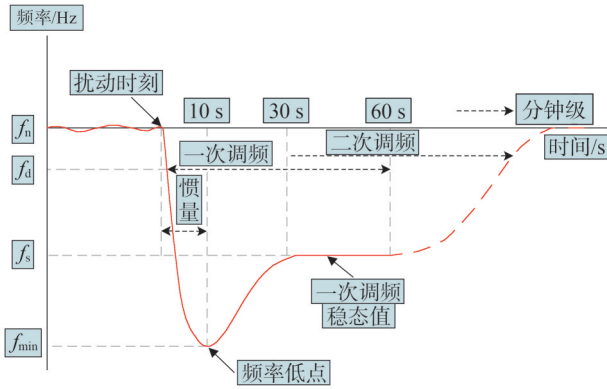


图1 电力系统典型调频过程

Fig.1 Schematic diagram of typical frequency regulation process in power system

各地能源局发布的并网发电厂辅助服务管理实施细则中,对机组的调频能力技术指标做出了明确的要求和考核规定。由各地发布的一系列政策可以看出,为配合新能源发电的快速发展和消纳,电力系统对机组调频能力的要求越来越高,考核政策越来越严格,同时,辅助服务补偿力度逐步增大。火电机组参与一次调频是电网要求的基本义务,但机组在参与一次调频时,采用自动调节汽机进汽门开度的方式进行电功率调节,不仅调频性能低,响应时间长,还可能引起机组机械元件较大磨损,且对锅炉运行安全带来较大影响。当一次调频不能满足稳定电网波动的要求时,电网公司主要通过AGC二次调频实时调节电网中调频电源的有功出力,实现对电网频率的控制。受限于本身特性,火电机组的AGC调频性能与电网的需求值存在一定的差异,例如调节偏差大,调节延迟等。

1.2 调频性能指标计算

各地电网辅助服务实施细则规定的性能指标及收益补偿算法大致相同,本文以山西省政策为例。

根据文献[24]规定,调频性能指标为

$$K_p^{i,j} = K_1^{i,j} K_2^{i,j} K_3^{i,j} \quad (1)$$

式中: $K_p^{i,j}$ 为调频性能指标,衡量AGC调频资源*i*第*j*次调节过程中的调节性能好坏程度; $K_1^{i,j}$ 为调频速率指标,衡量AGC调频资源*i*第*j*次实际调节速率与其应该达到的标准速率相比达到的程度; $K_2^{i,j}$ 为调频容量精度指标,衡量AGC调频资源*i*第*j*次实际调节偏差量与其允许达到的偏差量相比达到的程度; $K_3^{i,j}$ 为响应时间指标,衡量AGC调频资源*i*第*j*次实际响应时间与其标准响应时间相比达到的程度。

辅助服务交易时,根据历史调频性能指标及申报价格确定调频机组的排序价格,并按排序价格确定中标优先次序,当排序价格相同时,优先调用调频性能好的调频资源。

因此,机组调频性能指标 K_p 由机组本身的调节性能决定,对补偿金额有着至关重要的作用。

1.3 机组调频辅助服务补偿计算

除调频性能指标外,机组调频辅助服务补偿还由调频总里程、结算价格两个变量确定。其中调频里程(以MW为单位)是发电单元响应AGC控制指令后结束时的实际出力值与响应指令时的出力值之差的绝对值,以15 min为一个计费周期,调频总里程是在结算时段内发电单元响应AGC控制指令的调整里程之和,由调度发出的AGC指令决定,结算价格按照参与现货市场的实际价格结算,两者均由机组外部因素决定。

根据山西省调频辅助服务收益政策规定,火电联合储能调频项目可参与电网调频辅助服务获取电量收益,增加混合储能系统后电厂增加的收益可分为一次调频服务收益和二次调频服务收益两部分。

根据山西省调频交易实施细则,调频机组进行收益测算时,一次调频服务收益计算如式(2)所示。

$$R_1 = K_{p1} \times P_1 \times C_1 \times h \times D_1 \quad (2)$$

式中: R_1 为年一次调频收益,元; K_{p1} 为一次调频性能指标; P_1 为一次调频里程,MW/次; C_1 为一次调频结算价格,元/MW; h 为每天的一次调频次数,次/天; D_1 为年度参与一次调频的天数,天/年。

调频机组二次调频收益计算如式(3)所示。

$$R_2 = K_{p2} \times C_2 \times P_2 \times D_2 \quad (3)$$

式中: R_2 为年二次调频收益,元; K_{p2} 为二次调频性能指标; C_2 为按照政策折算的二次调频价格,元/MW; P_2 为每天参与二次调频的总里程,MW/天; D_2 为年度参与二次调频的天数,天/年。

2 储能系统配置分析

2.1 储能系统配置原则

火储联合调频的形式使火电厂也可作为优质调频资源加入电网,提高可再生能源的消纳水平,对构建以新能源为主体的新型电力系统有重要意义。

根据电力系统功能要求和特性分析,选择大功率、短时长、高频次的功率型储能系统与火电机组联合参与调频,可适应电网稳定性需求,提高机组辅助服务收益^[22]。目前,根据设备技术成熟度和经济性,可选择的功率型储能技术包括锂离子电化学储能、超级电容储能和磁悬浮飞轮储能。其中,超级电容器可以在短时间内充放电,适合容量小、大功率爆发的应用场合,在混合交通运输中应用潜力大。锂离子电池响应速度快,调频里程长,可兼顾电网调频及调峰需求。根据广东、山西等省份电网锂电池参与电网调频使用经验,锂电池用于一次调频应用场景的100%放电深度(depth of discharge, DOD)等效循环寿命不超过2 000次,锂电池更换周期不超过2年,故锂离子电池储能系统参与冲击性负荷变动的一次调频经济性较差,其更适合参与调频时间较长的二次调频^[23]。磁悬浮飞轮储能属于物理储能,通过高速旋转的飞轮设备实现机电能量的转换,具有响应速度快、充放电功率高、寿命长等优势,与锂离子电池组合,承担一次调频功能,可降低锂离子电池频繁启动的次数,延长锂电池使用寿命。因此,火电联合调频的储能系统可选择锂离子电池和磁悬浮飞轮储能的多元混合储能系统,通过两者的合理配置和智能协同控制策略,实现两种储能技术的优势互补,更好地满足电力系统调频需求。

2.2 多元混合储能的优势

锂离子电池储能与飞轮储能组成混合储能系统的主要优势包括:

1)提高日调频收益。利用飞轮可以毫秒级达到最高倍率充放电的特性,可提高调频性能指标中的调节速率值。飞轮储能可以根据机组出力和AGC目标出力的偏差进行快速功率跟踪,实现对整体出力的精确控制,减小出力的波动,从而提高调节精度值。因此混合储能系统的调频性能指标优于纯锂离子电池储能系统。

2)延长锂离子电池的使用寿命。根据混合储能协同控制策略,将储能系统的目标功率划分为秒级尖峰功率和分钟级基础功率两部分,飞轮储能系统

承担高频次出现的秒级尖峰功率调节任务,锂离子储能系统承担其中出现频次低的分钟级基础功率部分。通过设定合理的协同控制策略,可以减小锂电储能充放电频次,减小尖峰出力时段频繁充放电对锂离子电池的冲击,延长锂离子电池的使用寿命。

3)提高储能系统可靠性及安全性。在混合储能系统中,80%以上的一次调频能量可由飞轮部分独立承担,20%的能量由锂离子储能承担。通过对锂电池系统使用频次及充放电深度的降低,可大幅提高系统的可靠性及安全性,降低系统运营维护工作量。

3 工程实例及经济性分析

3.1 工程机组情况

以山西某2×350 MW机组配置储能参与调频辅助服务的工程为例,分析储能系统容量配置及其经济性。

本工程调频机组位于山西省北部地区,装机容量为2×350 MW,年平均负荷为70%,由于山西省新能源装机容量大,电网频率波动频繁,一次调频需求次数及幅值均处于较高水平,调频压力大,分析山西省网一次调频日数据统计结果,可知一次调频平均单次动作时长3 s左右,最大单次动作时长不超过1 min,且平均时长基本成正态分布,山西省网调度中心一次调频检测数据如表1所示。由于本机组已运行11年,机组机械设备出现磨损,调频性能有所下降,调频月合格率由94.9%降为72%,低于电网公司考核合格率,由于参与AGC调频性能不能满足电网要求,电厂已申请不参加AGC调频辅助服务。

表1 2022年山西省网调度一次调频部分监测数据

Table 1 Shanxi provincial power grid dispatch primary frequency regulation monitoring data in 2022

统计时间	一次调频动作次数	最长持续时间/s	平均调节时长/(s/次)
1月21日	1 676	43.0	3.2
2月8日	1 849	34.1	3.1
2月12日	1 618	21.12	3.0
5月20日	1 333	67.4	2.6
5月23日	773	19.0	2.4

3.2 储能系统容量配置分析

当电厂接收到系统AGC调频指令后,利用机组

的大容量和储能的快速响应性能,火电机组与储能系统联合参与二次调频。目前建成的储能辅助调频系统功率大多按照3%机组额定容量配置,一般约80%左右的指令小于 $3\%P_n$ (P_n 为机组额定功率)。混合储能功率配置为机组容量的3%可满足机组调频需求,厂内火电机组容量为350 MW,选择10 MW 锂离子储能系统可覆盖本机组绝大部分的调频指令,锂离子电池容量为10 MW/5 MWh,充放电倍率为2C。

综合考虑一次、二次调频容量需求,拟配置12 MW/5.5 MWh混合储能系统。由于电网一次调频需求时间短,调频频次高,且飞轮储能调频具备瞬间调节、精确输出、快速折返等性能,其一次调频性能和寿命均优于锂电池调频性能,根据电厂参与一次调频的容量记录,电厂一次调频全部由飞轮储能承担,储能容量为2 MW/0.5 MWh,充放电倍率为4C。

如采用单一储能方案,飞轮系统循环寿命按照100万次计算,锂离子电池系统在频繁短时充放电工况下寿命为2 000次,满充满放工况下寿命为7 000次,按照上述容量配置,飞轮储能全寿命周期内能量吞吐量为50万 MWh,锂离子电池频繁短时充放电全寿命周期内吞吐量为1万 MWh,由此可见,飞轮储能承担部分调频任务后,确保了电池7 000次的循环寿命,电池更换周期可延长到7年,采用混合储能系统后,锂离子电池使用寿命将延长3倍以上。

3.3 多元混合储能系统控制策略

多元混合储能系统分别通过各自的变流升压系统将出口电压升至中压,多个支路汇合后,通过储能配电装置的中压线路分别接入电厂厂用电系统,储能系统接线如图2所示。

此接线方式可以实现两台机组同时参与调频,也可以实现任意一台机组单独参与调频,运行方式较灵活。飞轮储能和锂离子储能支路以电流源方式接入中压储能母线,线路间相互独立,可实现各支路的单独控制,通过出线回路实现功率叠加。各支路的储能功率变流器(power conversion system, PCS)可实现电网锁相和电压跟踪,根据调频控制策略决定功率的目标值,实现两种储能支路的功率分配,可实现单支路的投切操作。当电网调频需求发生时,优先调用飞轮储能,当功率或能量不满足调度要求时,再调用锂离子电池系统,通过调频控制器实现飞轮和锂电池的平稳无扰动切换,充分发挥飞轮储能寿

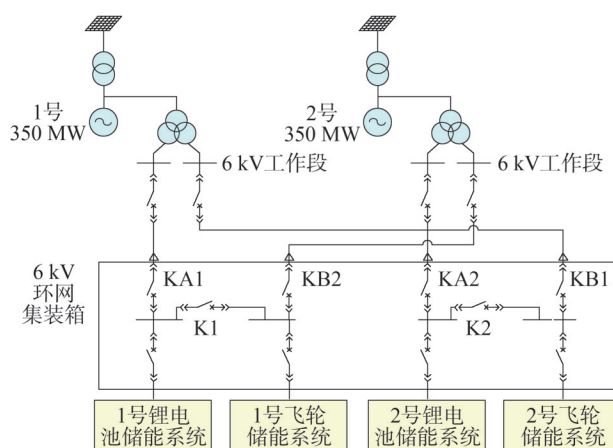


图2 储能系统接线示意图

Fig.2 Schematic diagram of energy storage system

命长的特点,减少锂离子电池的调用次数,延长电池循环寿命。同时,依靠飞轮储能毫秒级响应的优势,降低机组低频震荡风险,提升机组运行的可靠性。

3.4 经济性分析

根据山西省调频辅助服务收益政策规定,本项目属于火电联合储能调频项目,可参与电网调频辅助服务获取电量收益,不考虑无储能系统时的机组容量补偿和费用分摊部分,增加混合储能系统后电厂增加的收益可分为一次调频服务收益和二次调频服务收益两部分。

3.4.1 一次调频

根据2022年5月18日发布的《山西电力一次调频市场交易实施细则(试行)》政策规定,火电机组通过相关能力核定,确定其可向电网提供超过必须具备的一次调频能力以外的能力时,可获得一次调频补偿。

根据式(1),一次调频调节性能 K_p 值由一次调频响应时间指标 K_1 、一次调频相应速率指标 K_2 、一次调频相应精度 K_3 决定。根据计算条件,其中 K_1 要求标准滞后时间不大于1 s, K_2 要求每次调节应在4 s内达到目标值或恢复起始值,由于飞轮储能响应时间为20~30 ms,因此燃煤机组联合飞轮储能后,调频响应速度更快,爬坡能力更强,收益大大优于普通燃煤机组,也优于锂离子电池调频性能。 K_1 、 K_2 、 K_3 最大值分别为2,进而 K 值理论最大值为8,根据目前山西某投运的电厂飞轮储能调频数据,调节性能 K_p 值为6.5,每天一次调频次数折合满容量日平均调频次数300次,每年300天参与一次调频服务。

根据实施细则规定,一次调频服务价格范围为5~10元/MW,按照最低价格5元/MW计算。保守计

算,仅由飞轮储能系统参与一次调频,因此单次调频里程为2MW/次。

按照式(2)计算机组参与一次调频的年收益为585万元。

3.4.2 二次调频

根据文献[25]政策规定,自2022年7月1日起,维持现有调频市场的5个时段不变,缩短中午低谷时段时长,提高部分时段申报价格范围。将申报积极性较低的中午低谷时段由原先的10:00—16:00缩短为12:00—16:00,晚高峰时段时长范围16:00—21:00暂保持不变。将中午低谷时段和晚高峰时段的价格范围,由目前的5~15元/MW调整为10~30元/MW,其余时段保持5~15元/MW不变。价格范围如表2所示。

表2 AGC调频收益价格范围
Table 2 AGC frequency regulation revenue
price range table

单位:元/MW			
序号	时段名称	时间范围	报价范围
1	凌晨时段	00:00—06:00	5~15
2	早高峰时段	06:00—12:00	5~15
3	中午低谷时段	12:00—16:00	10~30
4	晚高峰时段	16:00—21:00	10~30
5	后夜降负荷时段	21:00—24:00	5~15

中午低谷时段和晚高峰时段机组中标价格上限30元/MW,其他时段价格下限5元/MW,基于价格/性能排序综合出清,中标机组申报价格即为该机组中标价格,飞轮+锂电池储能可以最大价格报价,根据表2,其加权价格20.625元/MW。

基于山西电网AGC调频实际指令特性及上述分析,火电机组的调频性能指标大约为3左右,接入储能系统后,储能-火电联合调频机组AGC调节性能指标 K_p 可达5以上,暂取性能指标 K_p 为5。

根据电厂2020年调频考核数据,两台35万机组平均调频里程为1500MW/天,综合考虑一次调频运行时间,AGC调频运行天数取100天。

由于本电厂目前未投入AGC响应功能,接入储能后,电厂AGC调频收益即为新增收益。

按照式(3)计算,接入储能后,电厂参加AGC调频收益增加1546.9万元。

目前,山西省火电联合储能调频项目及独立储能

项目逐渐增多,均可参与电网的调频辅助服务,本项目未来参与电网调频容量或许呈现逐年减少的趋势,因此收益测算时,按照收益每年减少1%进行计算。

4 结束语

由于储能系统的调频性能指标明显优于燃煤机组调频性能,通过合理配置储能系统,可减少机组因调频引起的机械损伤,提高燃煤机组的调频竞争力,进而提高可再生能源的消纳水平,对构建以新能源为主体的新型电力系统有着重要意义。由于电力系统调频的频次高,时长短,现投运的锂离子电池储能系统普遍存在循环寿命低,更换周期短的问题。由锂离子电池储能系统与飞轮储能系统组成的多元混合储能系统,有效结合飞轮储能系统响应速度快、充放电功率高、寿命长及锂离子电池储能系统调节里程长等优势,通过合理的控制策略,大幅提高机组调频性能的同时可降低锂离子电池频繁启动的次数,延长锂电池使用寿命,实现两种储能技术的优势互补,更好地满足系统调频需求。

参考文献

- [1] 刘沅昆,张维静,张艳,等.面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J].智慧电力,2022,50(10):1-8.
LIU Yuankun,ZHANG Weijing,ZHANG Yan,et al.Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J].Smart Power,2022,50(10):1-8.
- [2] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等.国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1729-1752.
FAN Yuqi,DING Tao,SUN Yuge,et al.Review and cogitation for worldwide spot market renewable energy accommodation [J].Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1729-1752.
- [3] 朱法华,徐静馨,王圣,等.中国燃煤电厂大气污染物治理历程及展望[J].电力科技与环保,2023,39(5):371-384.
ZHU Fahua,XU Jingxin,WANG Sheng,et al.The processes and prospects of air pollutant control in coal-fired power plants in china [J].Electric Power Technology and Environmental Protection,2023,39(5):371-384.
- [4] 侯春生,黄皓,黄勇,等.2×300 MW燃煤发电机组一次调频的优化控制[J].节能技术,2023,41(5):439-442.
HOU Chunsheng,HUANG Hao,HUANG Yong,et al.Optimal control of primary frequency modulation of 2×300 MW coal-fired generating units[J].Energy Conservation Technology,2023,41(5):439-442.
- [5] 国家能源局.电力辅助服务管理办法[EB].(2021-12-21).
http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm
- [6] 李欣然,崔曦文,黄际元,等.电池储能电源参与电网一次调频的

- 自适应控制策略[J].电工技术学报,2019,34(18):3897-3908.
- LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18):3897-3908.
- [7] 袁岑颢,戴敏敏,周旭,等.电力市场环境下水电机组调频性能提升研究[J].浙江电力,2022,41(6):84-91.
- YUAN Cenjie, DAI Minmin, ZHOU Xu, et al. Research on frequency modulation performance improvement of thermal power units in the context of power market[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6):84-91.
- [8] 李建林,郭兆东,曾伟,等.面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13):33-42.
- [9] CHEN W, SUN N, MA Z, et al. A Two-layer optimization strategy for battery energy storage systems to achieve primary frequency regulation of power grid[J]. Energies, 2023, 16(6):2811.
- [10] ARRIGO F, BOMPARD E, MERLO M, et al. Assessment of primary frequency control through battery energy storage systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115:105428.
- [11] WEN X K, ZHANG S H, WU P, et al. Study on primary frequency modulation parameter setting of compressed air energy storage [C] // 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). IEEE, 2018:143-146.
- [12] 魏乐,苏少忻,房方,等.基于负荷预测的飞轮-火电系统自动发电控制响应性能优化[J].热力发电,2023,52(5):92-99.
- WEI Le, SU Shaoxin, FANG Fang, et al. Optimization of automatic generation control response performance of flywheel-thermal power system based on load forecasting [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5):92-99.
- [13] DAR S Z N, BARANIYA S. Integration of flywheel energy storage to AGC of two area power system [C] // 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC). IEEE, 2020:1-4.
- [14] 王建设. 大功率飞轮储能系统转子设计与充放电控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
- [15] YANG R H, JIN J X, ZHOU Q, et al. Non-droop-control-based cascaded superconducting magnetic energy storage/battery hybrid energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 54:105309.
- [16] 武鑫,尚文举,马志勇,等.抽水蓄能-飞轮混合储能系统协调控制方法[J].储能科学与技术,2023,12(2):468-476.
- WU Xin, SHANG Wenju, MA Zhiyong, et al. Coordinated control method for pumped and flywheel hybrid energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2):468-476.
- [17] HUANG H, WANG H, CAI Y, et al. Optimal configuration of fire-storage capacity considering dynamic charge-discharge efficiency of hybrid energy storage [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10:950521.
- [18] 刘阳,滕卫军,谷青发,等.规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J].储能科学与技术,2023,12(1):312-318.
- LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1):312-318.
- [19] 匡生,王蓓蓓.考虑储能寿命和参与调频服务的风储联合运行优化策略[J].发电技术,2020,41(1):73-78.
- KUANG Sheng, WANG Beibei. Optimization strategy of wind storage joint operation considering energy storage life and participating in frequency modulation service [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1):73-78.
- [20] 董顺超.分布式发电系统中多元混合储能优化配置研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [21] 李琦,王放放,杨鹏威,等.火电厂灵活性改造背景下储能技术应用现状与发展[J].综合智慧能源,2023,45(3):66-73.
- LI Qi, WANG Fangfang, YANG Pengwei, et al. Application status and development of energy storage technology in the context of flexibility transformation of thermal power plants [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(3):66-73.
- [22] 王鸣阳,刘昌嘉,刘仁和.并网型光伏电站储能功率波动平滑控制研究[J].电网与清洁能源,2022,38(1):115-120.
- WANG Mingyang, LIU Changjia, LIU Renhe. A study on the smooth control of energy storage power fluctuation of grid-connected photovoltaic power station [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1):115-120.
- [23] 李鲁阳,陈龙翔,陈磊,等.用于新能源一次调频的储能经济配置研究[J/OL].中国电力:1-12[2023-12-13].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231117.1545.016.html.
- LI Luyang, CHEN Longxiang, CHEN Lei, et al. Research on economic configuration of energy storage for assisting new energy in primary frequency regulation [J/OL]. China Electric Power: 1-12 [2023-12-13]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231117.1545.016.html.
- [24] 国家能源局山西监管办公室.关于完善山西电力调频辅助服务市场等有关事项的通知[Z].2022-01-14.https://sxb.nea.gov.cn/dtyw/jggg/202401/t20240119_227424.html.
- [25] 国家能源局山西监管办公室.山西能源监管办关于修订电力调频辅助服务市场有关规定条款的通知[Z].2022-08-01.https://sxb.nea.gov.cn/xxgk/zcjd/202401/t20240119_227438.html.

收稿日期:2023-12-13

修回日期:2024-01-30

作者简介:

邹杰(1979),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为火力发电厂及新能源电站电气一次设计;

周占平(1982),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为火力发电厂及新能源电站电气二次设计;

邵国栋(1987),男,高级工程师,从事科研技术工作。

(责任编辑 王学厚)