

混合储能辅助火电机组调频技术研究

范乐¹, 范旭刚², 兀鹏越³, 张小洁¹, 刘晓莎¹, 于欣¹

(1. 陕西工业职业技术大学, 陕西 咸阳 712000; 2. 华能陇东能源有限责任公司正宁电厂, 甘肃 庆阳 745306; 3. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054)

摘要: 传统火电机组在自动发电控制运行中存在功率调节速度慢、控制精度不足、响应滞后, 难以准确、快速跟踪电网调度调频指令, 并易出现调节延迟、调节偏差及调节反向等问题。本文为此提出一种火电机组与储能系统协同运行的联合调频技术方案, 通过引入由超级电容与磷酸铁锂电池构成的混合储能系统, 对火电机组调频过程进行辅助支撑。在此基础上, 设计了一种基于系统频率偏差与功率指令分层协调的控制策略, 以某火电厂2×660 MW超临界燃煤发电机组为研究对象, 构建火储联合调频模型并开展仿真与工程应用验证。结果表明, 采用所提出的火储联合调频策略后, 机组综合出力能够快速、准确地跟踪自动发电控制(AGC)调频指令, 联合出力与AGC指令之间的跟踪相关系数提高至0.99以上, 调频过程中的超调和滞后现象显著减弱, 系统运行稳定性明显增强; 同时, 机组综合调频性能指标 k_p 由原有的0.8提升至1.63, 调频综合性能得到显著改善。研究表明所提出的联合调频技术能够有效弥补传统火电机组调频能力不足的问题, 对提升火电机组调频性能及电力系统安全稳定运行具有一定的工程应用价值。

关键词: 电力系统; 混合储能; 调频; 超级电容; 磷酸铁锂电池

中图分类号: TM91

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0079-09

Hybrid Energy Storage Assisted Frequency Regulation for the Thermal Power Plants

FAN Le¹, FAN Xugang², WU Pengyue³, ZHANG Xiaojie¹, LIU Xiaosha¹, YU Xin¹

(1. Shaanxi Polytechnic University, Xianyang 712000, Shaanxi China;

2. Zhengning Power Plant, Huaneng Longdong Energy Co. Ltd., Qingyang 745306, Gansu China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the problems of slow power regulation speed, insufficient control accuracy, and delayed response of conventional thermal power units in automatic generation control operation, which makes it difficult to accurately and rapidly track grid frequency regulation commands and may lead to regulation delay, regulation deviation, and reverse regulation, a coordinated frequency regulation scheme combining thermal power units and energy storage systems is proposed in this paper. A hybrid energy storage system composed of supercapacitors and lithium iron phosphate batteries is introduced to provide auxiliary support for the frequency regulation process of

收稿日期: 2025-05-09

修回日期: 2025-10-09

接受日期: 2025-10-28

基金项目: 陕西工业职业技术大学科研基金资助项目(2025YKYB-006, 2025YKYB-005); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ22-H12)

作者简介: 范乐(1993-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为火电储能调频应用技术

通信作者: 兀鹏越(1976-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为火电储能调频应用技术, E-mail: wupengyue@tpri.com.cn

引用格式: 范乐, 范旭刚, 兀鹏越, 等. 混合储能辅助火电机组调频技术研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 79-87.

Fan L, Fan X G, Wu P Y, et al. Hybrid energy storage assisted frequency regulation for the thermal power plants[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 79-87.

thermal power units. On this basis, a hierarchical coordinated control strategy based on system frequency deviation and power command is designed. Taking a thermal power plant with two 660 MW supercritical coal fired generating units as the research object, a combined thermal power and energy storage frequency regulation model is established, and simulation analysis and engineering application verification are carried out. The results show that, after applying the proposed coordinated frequency regulation strategy, the integrated output of the units can track AGC frequency regulation commands rapidly and accurately. The tracking correlation coefficient between the combined output and the AGC commands is increased to above 0.99, while overshoot and response lag during the frequency regulation process are significantly reduced, and the operational stability of the system is markedly enhanced. Meanwhile, the comprehensive frequency regulation performance index k_p is improved from 0.8 to 1.63, indicating a substantial enhancement in overall frequency regulation performance. The study demonstrates that the proposed coordinated frequency regulation technology can effectively compensate for the insufficient frequency regulation capability of conventional thermal power units and has practical engineering value for improving the frequency regulation performance of thermal power units and ensuring the safe and stable operation of power systems.

Key words: power system; hybrid energy storage; frequency modulation; super-capacitor; lithium iron phosphate battery

0 引言

在现代电力系统中,火电机组仍承担着重要的调频任务^[1],其装机容量占全国总装机容量的60%以上,在电网频率支撑与调节中发挥着基础性作用。然而,随着电网规模的持续扩大以及新能源发电的大规模接入,火电机组在调频运行中的技术局限性日益显现^[2]。一方面,火电机组动态响应特性较差,难以及时适应电网频率的快速波动,尤其在高比例间歇性新能源接入条件下,频率波动的复杂性和不确定性显著增强,机组调频性能不足将对电网频率稳定性产生不利影响^[3-6]。另一方面,受锅炉燃烧稳定性及汽轮机调节阀非线性特性的制约,火电机组在调频过程中难以实现对电网频率变化的精准跟踪,难以满足电网对调频精度和响应质量的要求。此外,频繁参与调频运行将使汽轮机转子、锅炉受热面等关键部件长期承受较大的机械应力和热应力,导致设备磨损加剧、使用寿命缩短,并显著增加机组运行和维护成本。同时,调频过程中频繁的负荷调节会引起机组煤耗率上升,运行经济性下降,并伴随污染物排放增加及潜在安全风险,进一步制约了火电机组调频运行的可持续性。基于上述问题,开发新型调频辅助技术以提升电网整体调频能力,已成为保障电力系统安全稳定运行的重要研究方向。

先进的大规模储能系统具有调节灵活性高、可在额定功率范围内实现任意功率点精确控制,并具备毫秒级快速响应及充放电功率精准调节能力等特

点,因此在电网调频应用中相较于传统火电机组表现出显著优势^[7-9]。围绕储能参与火电机组调频运行,国内学者开展了大量研究。李波等^[10]提出了电池储能与火电机组联合调频的应用设计方案,有效提升了电厂机组的整体调频效益;牟春华团队^[11]系统分析了储能装置并网对燃煤机组电气参数的扰动特性,并从经济性角度对不同储能介质的选型方案进行了对比研究;黄策等^[12]提出了基于超级电容的火储联合调频技术,为该技术的工程应用提供了理论依据和技术支撑,但其研究主要关注超级电容接入厂用电系统后在高厂变容量配置、继电保护与控制策略、电气性能校核及电能质量等方面的影响,且由于仅采用超级电容储能系统,在持续高功率输出能力方面仍存在一定局限性。此外,殷悦课题组^[13]将模糊控制理论与混合储能技术相结合,构建了基于动态性能指标评估的协同控制系统,工程应用结果表明,该技术方案可使火电机组一次调频综合性能指标提升34%以上。

在电力系统调频过程中,传统发电机组与新型储能系统在输出能力与动态响应特性方面呈现出明显的互补关系。传统火电机组具备较宽的功率调节范围和持续输出能力,但受系统热惯性及控制环节限制,其响应速度相对较慢;相比之下,新型储能系统调节容量相对有限,却能够实现快速、精准的功率响应,在短时间尺度内具备显著优势。基于能量密度、循环寿命、响应时间及运行安全性等关键性能指标的综合分析可知,磷酸铁锂电池凭借较高的能量

密度、良好的循环性能及经济性,已成为当前大规模储能应用的主流技术路线,而超级电容在短时高功率输出及高频充放电工况下表现出更为优越的动态特性。基于上述特性互补优势,本文提出采用超级电容与磷酸铁锂电池构成的混合储能系统辅助火电机组参与电网调频,并在此基础上构建了一种基于频率偏差与功率指令分层协调的控制策略,并将其应用于某火电厂2×660 MW燃煤发电机组。

1 混合储能辅助火电机组调频技术

1.1 储能辅助火电机组一次调频技术原理

储能辅助火电机组一次调频的技术原理如图1所示,当电网频率偏差超出一次调频死区区间(50±0.033) Hz时,火电机组与储能系统同时调整出力。当 $f>50.033$ Hz时,火电机组通过汽轮机调节阀减少出力 ΔP_g :

$$\Delta P_g = -K_g \cdot \Delta f,$$
 (1)

式中: K_g 为火电机组调差系数,通常取4%~5%。

储能系统切换至充电模式吸收过剩功率:

$$\Delta P_{ess} = -K_e \cdot \Delta f,$$
 (2)

式中: K_e 为储能系统的功率分配比例系数。

当 $f<49.967$ Hz时,火电机组通过增加燃煤量上调出力:

$$\Delta P_g = K_g \cdot \Delta f.$$
 (3)

储能系统切换至放电模式补充功率缺额:

$$\Delta P_{ess} = K_e \cdot \Delta f.$$
 (4)

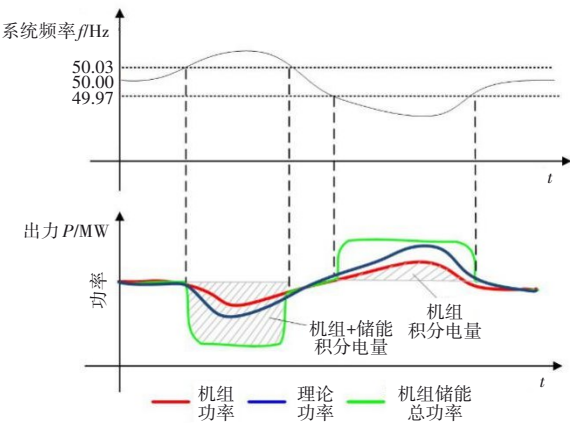


图1 储能辅助火电机组一次调频技术原理

Fig.1 The technical principle of energy storage assisting thermal power units in primary frequency regulation

通过上述协调控制使系统频率恢复至一次调频范围,从而实现一次调频^[14]。

1.2 基于频率偏差-功率指令分层协调的控制策略

目前,国内大部分储能调频项目采用安全性较高的磷酸铁锂电池(LFP),然而该技术存在循环衰减率较高及热失控风险等固有缺陷。相比之下,超级电容凭借超长寿命、安全系数高等特点在调频方向展现出技术优势。但如果采用超级电容完全替代锂电池,对于大指令或连续增减出力的指令储能响应效果将变差。基于上述分析,本文提出一种由超级电容与磷酸铁锂电池构成的混合储能系统辅助火电机组参与调频的控制方案,并设计了基于频率偏差与功率指令分层协调的控制策略。

1.2.1 混合储能系统整体控制方式

在火电机组参与自动发电控制运行过程中,储能控制单元实时获取机组有功出力、AGC调频指令、储能系统运行状态及关键安全参数,对系统运行工况进行综合评估。在此基础上,控制系统动态确定储能系统的调节方式与调节幅度,使其在满足调频需求的同时保持在安全运行区间内。混合储能系统的整体控制框架如图2所示。

当机组处于AGC自动运行模式时,控制系统持续监测机组实际出力与AGC指令之间的偏差,并通过储能系统对该偏差进行动态补偿;当机组退出AGC运行或参与一次调频过程时,储能系统保持静

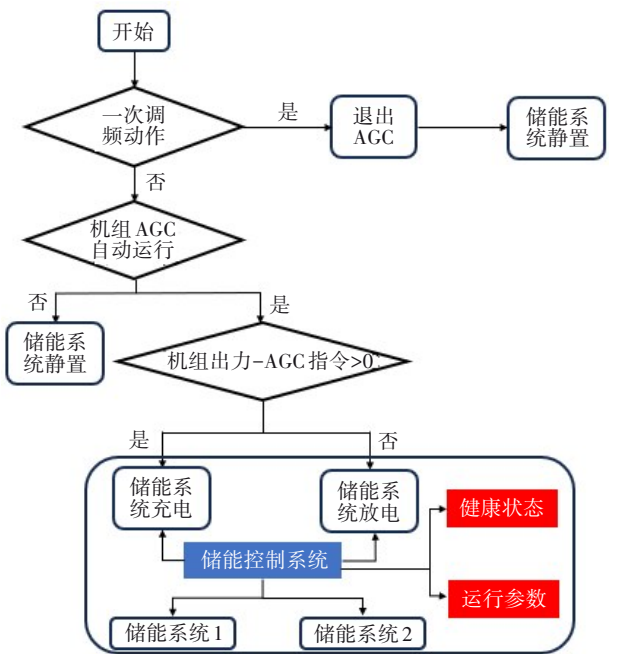


图2 混合储能系统整体控制方式

Fig.2 The overall control strategy of hybrid energy storage system

置状态,以避免不必要的频繁动作。在AGC运行状态下,若机组出力低于指令值,储能系统进入放电模式补偿功率缺额;若机组出力高于指令值,则转入充电模式吸收多余功率,从而实现对机组调频偏差的实时修正。

在确定储能系统出力需求后,控制系统将目标功率合理分配至不同储能单元,并通过功率变换装置实现对各储能单元充放电功率的精确控制。同时,系统对储能单元的荷电状态、功率边界及关键运行参数进行实时监测与自适应调节,以防止储能电芯在调频过程中出现超限运行,保障系统运行的安全性与可靠性。

1.2.2 混合储能系统内部控制方式

在低功率、短时调频指令工况下,系统优先采用超级电容独立响应调频需求。依托其毫秒级动态响应特性,超级电容能够在短时间尺度内完成能量的快速释放与吸收,无需磷酸铁锂电池参与即可满足调频要求,从而有效减少电池的充放电次数,降低循环损耗,延长混合储能系统的整体使用寿命^[15]。

当调频指令功率较大或持续时间较长时,系统切换至超级电容与磷酸铁锂电池协同工作的混合储能模式。在该模式下,超级电容首先以较高功率输出,快速响应调频指令初期的功率变化,抑制火电机组因功率突变引起的动态响应滞后;随后,磷酸铁锂电池根据持续功率需求提供稳定的能量支撑,其较高的能量密度可有效弥补超级电容能量储备不足的问题。通过上述协调控制机制,混合储能系统在保证毫秒级快速响应能力的同时,实现了不同功率等级和持续时间调频指令下的优化匹配。

2 火电储能联合调频工程案例

2.1 储能容量选择

本文研究对象为某火电厂2×660 MW超临界燃煤发电机组,发电机额定电压为20 kV。计划在该电厂内建设储能系统,并与7、8号机组开展火电储能联合调频业务。通过对该电厂8号机组2023年11月某日AGC指令数据的统计分析,AGC指令大小主要集中在0~20 MW区间内,单个调频指令持续时间为1~2 min,连续增减指令次数不超过3次。根据行业运行数据,通常按机组额定容量的3%功率配置储能可满足90%以上的调频指令^[16]。则总储能容量为:

$$P_{\text{ess}}=660\text{ MW}\times3\%\approx20\text{ MW}。$$
 (5)

因此该电厂建设20 MW储能系统,并分为两组10 MW分别接入高厂变低压侧母线,正常运行模式下通过开关互切操作。对该电厂两台660 MW机组的AGC指令数据分析表明,机组的AGC指令均值约为10 MW,如图3(a)与图3(b)所示。其中,10 MW以下的指令占比超62%,因此配置10 MW的超级电容可满足机组绝大多数的调频需求。在调频指令响应过程中,采取超级电容优先响应的策略:对于小于10 MW的调频指令,全部调频里程由超级电容响应;对于大于10 MW的调频指令,在超级电容以额定功率响应的基础上,由磷酸铁锂电池提供辅助功率支撑,功率分配公式为:

$$\begin{cases} P_{\text{SC}}=P_{\text{AGC}}, P_{\text{Li}}=0, & P_{\text{AGC}}\leq10\text{ MW}, \\ P_{\text{SC}}=10\text{ MW}, P_{\text{Li}}=P_{\text{AGC}}-10\text{ MW}, & P_{\text{AGC}}>10\text{ MW}。 \end{cases}$$
 (6)

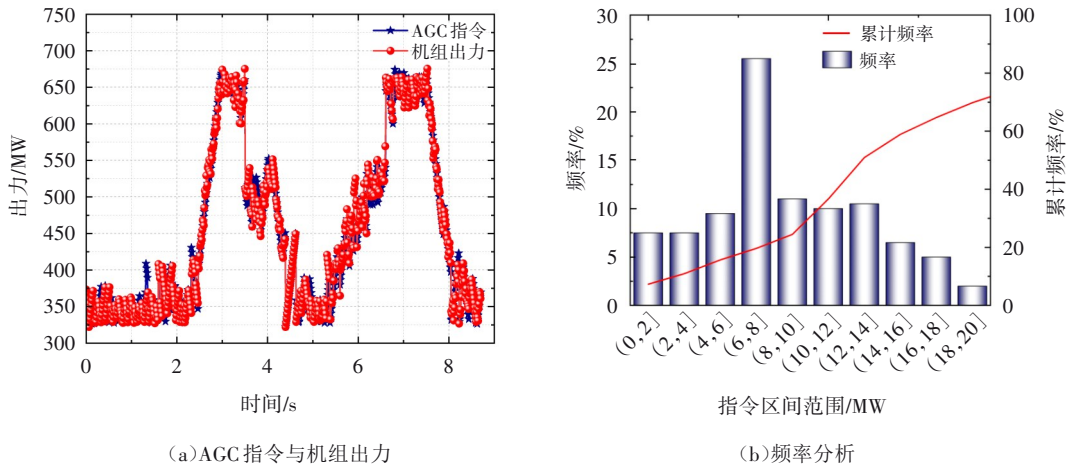


图3 8号机组2023年12月某日AGC指令及分析图

Fig.3 AGC command and analysis chart of unit 8 on a certain day in December 2023

式(6)中, P_{AGC} 为机组 AGC 指令, P_{Li} 为磷酸铁锂电池输出功率, P_{SC} 为超级电容输出功率。考虑到该电厂单个 AGC 调频指令的持续时间约为 2 min, 且连续增减指令次数不超过 3 次, 配置超级电容的时长为:

$$T_{SC} = n_{\max} \times t_{\text{cmd}} = 3 \times 2 \text{ min} = 6 \text{ min}, \quad (7)$$

其中: $n_{\max}$ 代表最大连续指令次数, t_{cmd} 代表单个指令最长持续时间。考虑安全裕度, T_{SC} 取 10 min。则超级电容配置容量为:

$$E_{SC} = P_{SC} \times T_{SC} = 10 \text{ MW} \times 10 \text{ min} = 1.67 \text{ MWh}. \quad (8)$$

超级电容时长 10 min > 最小需求 6 min, 裕度系数:

$$\gamma_{SC} = \frac{T_{SC}}{T_{SC, \min}} = \frac{10}{6} \approx 1.67. \quad (9)$$

满足《电力系统配置储能分析计算导则》中“安全裕度 ≥ 1.2 ”的要求, 确保连续指令下无能量耗尽风险。

基于超出 10 MW 指令的能量需求, 磷酸铁锂电池需支撑超级电容之外的持续功率:

$$E_{Li} \geq \max(P_{Li} \times t_{\text{cmd}} \times n_{\max}). \quad (10)$$

磷酸铁锂电池最大辅助功率:

$$P_{Li, \max} = P_{AGC, \max} - P_{SC} = 10 \text{ MW}. \quad (11)$$

将其代入公式(10):

$$E_{Li} \geq 10 \text{ MW} \times \frac{2}{60} \text{ h} \times 3 = 1 \text{ MWh}. \quad (12)$$

考虑长期响应需求取 10 MWh, 即磷酸铁锂电池配置容量为 10 MW/10 MWh。因此, 混合储能系统配置方案为 10 MW/10 min 超级电容+10 MW/10 MWh 磷酸铁锂电池。

2.2 火电机组控制系统设计

本文设计的火电机组控制架构如图 4 所示。在混合储能系统接入前, 电网调度通过通信方式将功率遥调指令发送至电厂远动测控终端(RTU), RTU 通过电缆与机组集散控制系统(DCS)建立数据通信链路, 对汽轮发电机组负荷进行控制, 通过调节机组出力实现对电网频率和联络线功率的调节。在机组接入储能系统后, 对 RTU 下发的机组功率指令信号及反送 RTU 的功率反馈信号进行协调处理, 调度 AGC 将功率遥调报文发送至电厂 RTU, RTU 将 AGC 负荷指令并行传输至机组 DCS 和储能控制系统, 同时将机组当前运行状态信息同步传输至储能控制系统; 储能控制系统通过采集电网 AGC 运行状态、目

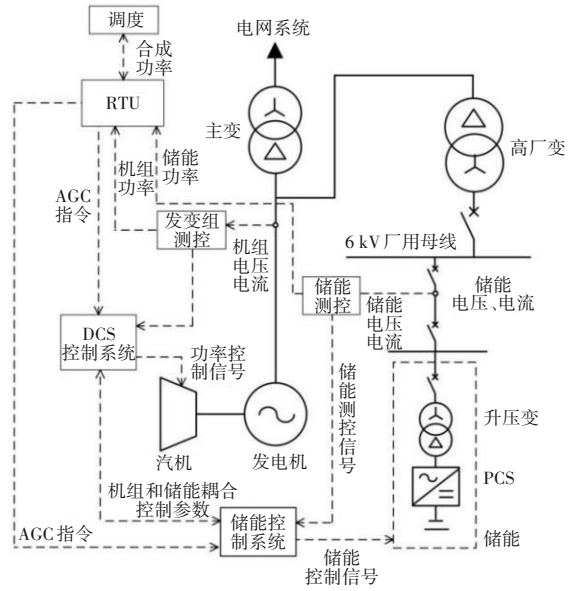


图4 AGC调频的控制原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the control principle of AGC frequency modulation

标功率指令及机组实时出力, 动态计算储能系统所需的补偿功率, 控制储能单元充放电, 并通过测控装置将储能系统出力叠加至机组出力上, 实现火电机组与储能系统的联合调频控制。

2.3 混合储能系统接入的电气一次方案

混合储能系统运行方式较为灵活, 其接入的电气一次方案如图 5 所示。10 MW/10 min 超级电容与 10 MW/10 MWh 磷酸铁锂电池分别作为储能子系统 1 和储能子系统 2, 可接入 7 号机、8 号机高厂变 6 kV 侧母线, 分别为两台 660 MW 机组提供调频辅助; 同时, 储能系统亦可作为一个整体接入, 为 7 号或 8 号机组单独提供调频支撑。在储能系统内部出现异常运行工况时, 仅需切断高压断路器即可实现快速隔离, 不会对发电机端及厂用辅助设备的正常运行产生影响。

2.4 混合储能系统接入的电气二次方案

电网调度对发电机组一次调频能力的评估主要通过同步相量测量装置(PMU)将实时运行数据上传至电力系统广域监测系统(WAMS)来实现^[17]。混合储能辅助火电机组一次调频的电气原理如图 6 所示, 储能系统在保持机组原有一次调频响应特性不变的前提下, 实时监测电网频率信号、调频量、一次调频动作标志及机组出力等关键参数。储能控制单元通过计算一次调频目标值与机组实际出力之间的偏差, 动态调节储能系统的充放电功率, 并由 PMU 将储能系统输出功率与机组出力进行矢量叠加后传

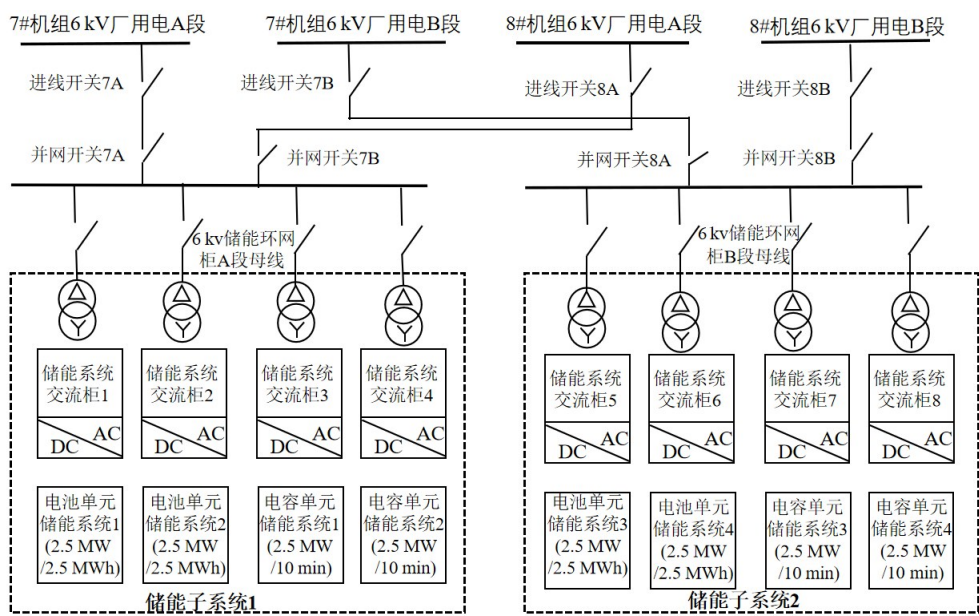


图5 混合储能系统电气一次接入方案

Fig.5 The electrical primary connection diagram of hybrid energy storage system

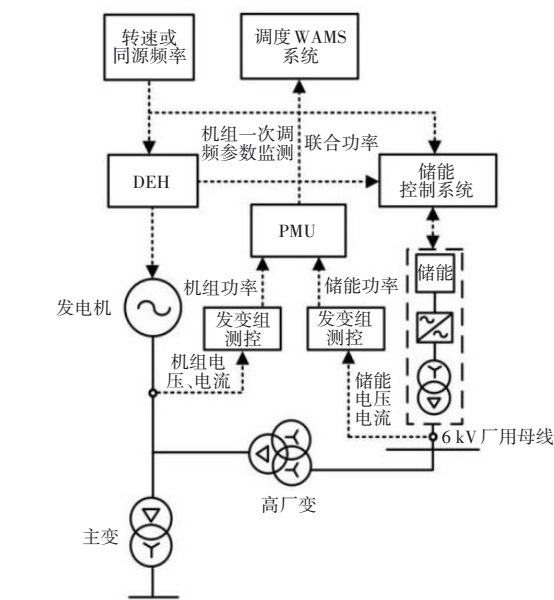


图6 储能辅助火电机组一次调频原理

Fig.6 The principle of primary frequency regulation for thermal power units assisted by energy storage

送至电网 WAMS 系统,用于电网侧对一次调频参数的测量与考核。

当机组调频过程中降低负荷时,储能系统工作于充电模式,发电厂 6 kV 厂用电系统经干式变压器将电压由 6 kV 降至 0.69 kV,再经换流器整流后对储能系统进行充电;反之,当机组调频增加负荷时,储能系统工作于放电模式,其输出的直流电经换流器逆变为 50 Hz 交流电后,再通过干式变压器升压并

注入发电厂 6 kV 厂用电系统,实现电能释放。由于超级电容与磷酸铁锂电池构成的混合储能系统具备毫秒级全功率响应能力,可有效支撑火力燃煤电厂的一次调频快速调节需求。

3 混合储能辅助火电机组一次调频运行效果

3.1 运行情况

本文以该电厂 8 号机组为研究对象,对比分析了储能系统接入机组前后对 AGC 指令的动态响应特性,结果如图 7 所示。数据分析表明,混合储能系统接入后,机组的 AGC 动态调节性能显著优于单一火电机组运行工况,系统功率输出曲线与 AGC 指令曲线具有较高一致性,其跟踪相关系数大于 0.99,且未出现相位滞后、功率偏差及响应延迟等典型问题。AGC 跟踪性能统计结果见表 1,其中储能系统可在 70 ms 内实现全功率响应,响应时间较火电机组提升 99.6%,调节精度提高 75%。

表1 AGC跟踪性能对比			
Tab.1 Comparison of AGC tracking performance			
指标	火电机组	火储系统	提升幅度
响应时间/s	18	0.07	99.6%
调节误差/%	3.2	0.8	75%

3.2 调频性能

根据该电厂 2023 年调频运行数据,按照《陕西电力调频辅助服务市场交易实施细则》中的计算方

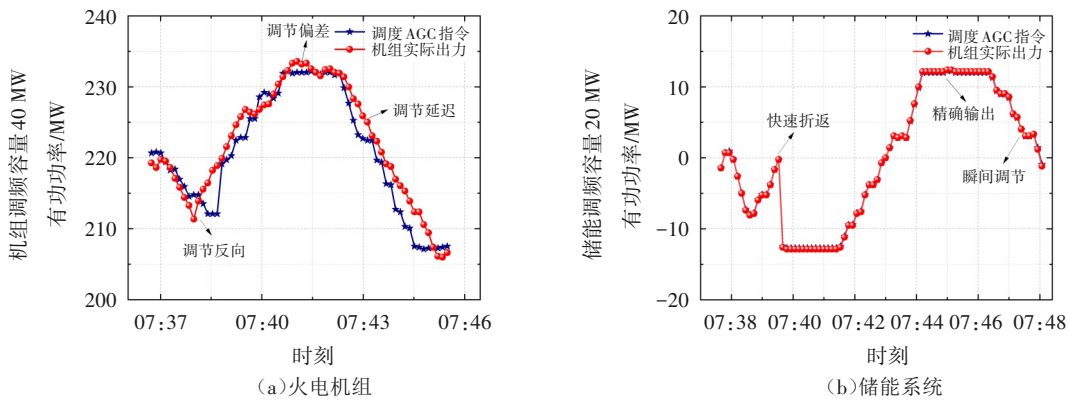


图7 火电机组和储能系统跟踪电网 AGC 指令的响应过程

Fig.7 Thermal power units and energy storage system track the response process of AGC instructions from the power grid

法,电厂7、8号机组的综合爬坡性能指标约为0.8。接入20 MW混合储能系统后,储能系统对电网AGC指令的响应过程如图7(b)所示。由图可见,调节速率 k_1 由0.81 MW/min提升至2.83 MW/min,响应时间 k_2 由18 s缩短至0.07 s,调节精度 k_3 由1.25%提升至0.82%。AGC综合性能指标的计算公式如式(13)所示,其结果较《并网电源一次调频技术规定及试验导则》^[18]规定值提升147%,表明机组综合调频性能得到明显改善。

$$k_p = 0.25 \times (2 \times k_1 + k_2 + k_3) = 1.63。 \quad (13)$$

3.3 寿命估算

根据以下边界条件估算本文提出的10 MW/10 min+10 MW/10 MWh磷酸铁锂电池中的电池使用寿命。根据该电厂2023年运行数据,8号机组全年AGC运行时间为8545 h,平均每小时调节里程约为290 MW,对应全年调节里程为2 478 050 MW;结合陕西电网调频运行特点,单个调频指令的持续时间约为2 min。磷酸铁锂电池的循环寿命取3000次,满充满放过程视为一次完整循环。采用超级电容优先响应的混合储能控制策略,当调频指令幅值小于10 MW时,调频里程全部由超级电容承担;当调频指令幅值大于10 MW时,保守估计超级电容可承担其中50%的调频里程,其余部分由磷酸铁锂电池完成。

在上述条件下,首先计算机组年AGC调频电量,其计算公式如式(14)所示。由此得到年AGC调频电量为82 601.67 MWh。考虑储能系统与火电机组同时响应AGC指令,且二者各承担50%的调频电量,则储能系统年充放电量为41 300.83 MWh。进一步根据机组调频指令幅值区间的统计结果,计算不同调频区间内的调频里程占比,相关统计结果如表2所示。

$$2\,478\,050\text{ MW/a} \times 2\text{ min} = 82\,601.67\text{ MWh/a}。 \quad (14)$$

表2 调频指令分析表

Tab.2 Frequency modulation command analysis table

调频指令区间/MW	调频指令频率	调频指令平均值/MW
(20,30]	0.05	25
(18,20]	0.02	19
(16,18]	0.05	17
(14,16]	0.07	15
(12,14]	0.11	13
(10,12]	0.10	11
(8,10]	0.11	9
(6,8]	0.26	7
(4,6]	0.09	5
(2,4]	0.07	3
[0,2]	0.07	1

在此基础上,对不同储能配置方案下的电池使用寿命进行对比分析。若储能系统采用20 MW/20 MWh磷酸铁锂电池方案,则在上述调频工况下,其年充放电电量及对应使用寿命可按式(15)计算,电池理论使用寿命约为2.9 a。

$$3000 \times 2 \times 20\text{ MWh} / (41\,300.83\text{ MWh/a}) = 2.9\text{ a}。 \quad (15)$$

若储能系统采用10 MW/10 min超级电容与10 MW/10 MWh磷酸铁锂电池组成的混合储能方案,则在既定控制策略下,超级电容承担的年充放电电量可由式(16)计算得到,相应地,磷酸铁锂电池的年充放电电量由式(17)确定。进一步根据储能系统参数,超级电容与磷酸铁锂电池的理论使用寿命分别按式(18)和式(19)计算。

$$41\,300.83\text{ MWh/a} \times [0.07 + 0.07 + 0.09 + 0.26 + 0.11 + 50\% \times (0.1 + 0.11 + 0.07 + 0.05 + 0.02 + 0.05)] = 33\,040.67\text{ MWh/a}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &41\,300.83\text{ MWh/a} - 33\,040.67\text{ MWh/a} \\ &= 8\,260.16\text{ MWh/a}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$10^4 \times 2 \times 1.67\text{ MWh}/(33\,040.67\text{ MWh/a}) = 10.11\text{ a}, \quad (18)$$

$$3000 \times 2 \times 10\text{ MWh}/(8\,260.16\text{ MWh/a}) = 7.26\text{ a}. \quad (19)$$

计算结果表明,采用混合储能方案后,磷酸铁锂电池的年等效充放电电量显著降低,其理论使用寿命可提升至7.26 a。相比单一磷酸铁锂电池储能方案,混合储能调频策略能够有效降低电池循环负荷,从而显著延长电池使用寿命。

4 结论

本文围绕超级电容与磷酸铁锂电池构成的混合储能系统辅助火电机组调频的技术方案及控制策略开展研究,以某火电厂2×660 MW超临界燃煤发电机组为研究对象,通过理论建模、控制策略设计及现场运行验证,得到如下结论:

1)提出了一种基于频率偏差与功率指令分层协调的联合调频控制策略,构建了由超级电容优先响应低功率、短时调频指令,磷酸铁锂电池承担高功率、持续调频指令的协同运行机制,实现了不同功率等级调频指令下的合理分工与优化匹配。现场试验结果表明,该控制策略可将系统动态响应时间由18 s缩短至0.07 s,调节误差由3.2%降低至0.8%。

2)混合储能系统的接入能够显著提升火电机组的调频性能。在未接入储能系统时,火电机组的综合调频性能指标 k_p 约为0.8;接入混合储能系统后,机组综合调频性能指标 k_p 提升至1.63,表明该技术方案在提升火电机组调频能力方面具有明显效果。

3)混合储能调频策略能够降低磷酸铁锂电池的等效充放电次数和充放电深度,从而有效延长电池使用寿命。与20 MW/20 MWh磷酸铁锂电池独立接入方案相比,其理论使用寿命仅为2.9 a;采用10 MW/10 min超级电容与10 MW/10 MWh磷酸铁锂电池组成的混合储能系统后,超级电容和磷酸铁锂电池的理论使用寿命分别达到10.11 a和7.26 a。

参考文献:

[1] 李祥涛,陈磊,郝玲,等. 基于两个细则的火储联合一次调频控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4163-4171.
Li X T, Chen L, Hao L, et al. A joint primary frequency modulation control strategy for fire storage based on two

detailed rules[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4163-4171.
[2] 杨思. 风电并网的电压支撑规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
Yang S. Research on voltage support mechanism for grid-connected wind power [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
[3] 郝玲,陈磊,黄怡涵,等. 新型电力系统下燃煤火电机组一次调频面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 14-29.
Hao L, Chen L, Huang Y H, et al. Challenges and prospects of primary frequency regulation of coal-fired thermal power units for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 14-29.
[4] 张永军,陈波. 火电机组一次调频性能分析及优化[J]. 浙江电力, 2010, 29(9): 31-35.
Zhang Y J, Chen B. Performance analysis and optimization of primary frequency modulation for thermal power unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(9): 31-35.
[5] 丁冬,杨水丽,李建林,等. 辅助火电机组参与电网调频的BESS容量配置[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4): 302-307.
Ding D, Yang S L, Li J L, et al. Capacity configuration of battery energy storage as an alternative to thermal power units for frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4): 302-307.
[6] Attya A B T, Hartkopf T. Utilising stored wind energy by hydro-pumped storage to provide frequency support at high levels of wind energy penetration [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1485-1497.
[7] 赵熙临,李品,付波. 基于频率响应特性的储能辅助电网调频方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 41-49.
Zhao X L, Li P, Fu B. Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 41-49.
[8] 王松岑,来小康,程时杰. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.
Wang S C, Lai X K, Cheng S J. Application prospect analysis of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
[9] 何叶,杨晓东,吴红斌,等. 面向新型配电系统灵活性提升的智能软开关与储能系统协调规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 142-150.
He Y, Yang X D, Wu H B, et al. Coordinated planning of

- soft open point and energy storage system for flexibility enhancement of new distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 142–150.
- [10] 李波. 电池储能与火电机组联合调频工程设计案例分析[J]. 电气时代, 2025(2): 140–143.
- Li B. Case study on joint frequency modulation engineering design of battery energy storage and thermal power unit [J]. Electric Age, 2025(2): 140–143.
- [11] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29–34.
- Mu C H, Wu P Y, Sun G H, et al. Combined automatic generation control frequency regulation technology and its application for thermal power units with energy storage systems [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29–34.
- [12] 黄策, 燕云飞, 沈迎, 等. 超容储能辅助火电机组调频的电气问题研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 103–108.
- Huang C, Yan Y F, Shen Y, et al. Research on electrical problems of frequency modulation of thermal power unit assisted by supercapacitor energy storage [J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 103–108.
- [13] 殷悦, 孙钢虎, 兀鹏越, 等. 混合储能调频工程经济性提升策略研究及应用[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 81–89.
- Yin Y, Sun G H, Wu P Y, et al. Research and application of economic improvement strategy for hybrid energy storage frequency modulation project [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 81–89.
- [14] 代本谦, 兀鹏越, 王海波, 等. 飞轮储能辅助火电一次调频技术与应用[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 81–88.
- Dai B Q, Wu P Y, Wang H B, et al. Primary frequency modulation technology of flywheel energy storage assisted thermal power plant [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 81–88.
- [15] 秦强强, 张骄, 李宇杰, 等. 基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分段控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊2): 760–769.
- Qin Q Q, Zhang J, Li Y J, et al. Time-phased control strategy for urban rail ground hybrid energy storage system based on train operation status [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 760–769.
- [16] Q/GDW 12194–2021 电力系统配置储能分析计算导则[S].
- Q/GDW 12194–2021 Guidelines for Analysis and Calculation of Energy Storage Configuration in Power Systems [S].
- [17] Phadke A G, Bi T S. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 619–629.
- [18] GB/T 40595—2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则[S].
- GB/T 40595–2021 Technical specification and test guidelines for primary frequency regulation of grid-connected power sources [S].

(编辑 许军策)