

# 电池储能参与燃煤发电机组 AGC 辅助服务 经济分析

钟莹<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的]在“双碳”背景下,电力系统的辅助服务需求也随之增加,但传统火电机组在AGC(Automatic Generation Control)调节方面仍存在许多问题。储能电池系统作为新兴的储能方式,因其具有响应快、精度高的特点,在辅助服务市场潜力很大。[方法]文章以广东地区电池储能参与某燃煤机组AGC调频为例,建立成本-收益模型,研究其参与燃煤机组AGC调频的经济效益,并针对不同的能量配置,从投资回收期、全寿命周期净利润、项目投资净现值三个维度的影响进行分析。[结果]随着能量等级的增加,项目的净利润和净现值随之增加,当能量等级从17.5 MWh变化到30 MWh时,净利润和净现值增速变缓。当能量等级为17.5 MWh时,项目投资回收期最短,当能量等级从17.5 MWh变化至30 MWh时,项目投资回收期有小幅度的增长。[结论]对于火电机组配置储能,当火电机组的容量配置3%~5%容量等级的储能电池,项目的净利润和项目投资回收期能达到比较好的效果,并且当容量配置为3%时的收益最好。

**关键词:** 电池储能; AGC 辅助服务; 容量配置; 影响因素; 能量等级

中图分类号: TK02; F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0064-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Economic Analysis of Battery Energy Storage Participating in AGC Ancillary Service of Coal-Fired Generating Unit

ZHONG Ying<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] In the context of "Dual Carbon", the demands for ancillary services of the electric power system are increasing. However, traditional thermal power units have many problems in AGC control. As a new energy storage mode, the battery energy storage has the great potential for applying in ancillary service market because of its advantages of fast response and high precision. [Method] In this paper, the battery energy storage participating in AGC ancillary service of a coal-fired unit in Guangdong Province was taken as an example. The cost-benefit model was established to study the economic benefits of the AGC frequency control, and three aspects including the investment payback period, the net profit of life cycle and the net present value of project investment were investigated with respect to different energy storage capacity. [Result] The net profit and the net present value of project investment increase with higher energy capacity. The increase rate of the net profit and the net present value of project investment slows down as the energy capacity changes from 17.5 MWh to 30 MWh. The investment payback period is the shortest as the energy capacity is 17.5 MWh. The investment payback period has a small increase as the energy capacity changes from 17.5 MWh to 30 MWh. [Conclusion] For thermal power units with energy storage, when the capacity of thermal power units is configured with 3%~5% energy storage batteries, the net profit and the investment payback period of the Project can achieve a good effect, and the best effect can be achieved when 3% energy storage batteries are configured.

**Key words:** battery energy storage; AGC ancillary service; capacity configuration; influencing factor; energy capacity change

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-02-09 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 国家重点研发计划“高端功能与智能材料”重点专项“高性能高温超导材料磁储能应用”(2021YFB3800200); 中国能建广东院科技项目“超大规模电化学储能电站工程设计关键技术研究”(EV11001W)

## 0 引言

随着社会经济的高速发展,人类对于能源的需求大幅增长,传统能源的储备量已经无法满足能源的消费需求。在“双碳”背景下,可再生能源发电的比重越来越高,风电、光伏发电是新能源发展中较为成熟的典型代表,但由于其存在波动性、预测精度低等特点,对电网的安全性、可靠性和经济性会造成一定的影响<sup>[1]</sup>。我国燃煤机组容量所占的比重逐年下降,但目前发电装机占有量仍超过 50%,燃煤机组不能很好地平抑风电光伏的波动,加速设备损耗程度并导致了极度资源浪费<sup>[2]</sup>。由此,为解决现有的问题,把储能系统引进燃煤发电机组 AGC(Automatic Generation Control)辅助服务中,储能系统具有毫秒级控制速度、快速响应速度、双相调节能力、系统寿命长等特点<sup>[3]</sup>,与传统燃煤电厂相结合,对于减少燃煤机组的调峰调频压力非常有效。而在各类储能系统的类型中,电池储能的应用最为广泛。根据最新研究数据,电池储能针对不同种类传统机组的替代效果分别为水电机组的 1.67 倍,燃气机组的 2.5 倍,燃煤机组的 25 倍<sup>[4]</sup>,因此,研究储能电池参与调频辅助服务的经济性,是储能能否大量应用于 AGC 调频的重要考虑因素<sup>[5]</sup>。国外对于储能参与调频辅助服务的研究较早,在 2011 年美国就出台了储能参与调频辅助服务的补偿机制<sup>[6]</sup>。文献 [7]采用改进的 LCOE(Levelized Cost of Electricity)与 IRR(内部收益率, Internal Rate of Return)模型,对比四种电池储能系统的经济性。文献 [3]提出电池储能接入,RTU(Remote Terminal Unit)的改造方案,并以实际项目为例,对储能电池参与北方某电厂 AGC 补偿收益进行经济性分析。文献 [8]以成本和收益为基础,搭建了电池储能参与一次调频的数学模型,研究得到了电池储能的理想容量配置。文献 [9]分析了锂电池储能系统参与调频的机会成本,并建立电能量市场模型,得出增加申报的调频容量,会导致其在电能量市场中的收益减少,边际成本随之增加。文献 [10]结合各区域辅助服务市场相关数据分析了不同区域参与辅助调频的特点,并对其经济性进行测算。由于火电机组 AGC 调频的补偿机制各个省份区域均有差异,因此,辅助调频服务的市场机制还有待进一步厘清并达到统一,参与调频的储能系统的容量也有待进一

步优化。在容量配置方面,若能量配置过小,会导致系统的吞吐量增加,从而影响电池的衰退速度和寿命。但若能量配置过大,会增加相应建设投资成本,而调频的里程不会一味地增大,因此性价比降低。考虑到我国火电机组装机容量的占比超过 50%,电池储能参与火电机组 AGC 调频具有一定的优势,而 AGC 调频对电池功率、容量配置的要求更高,但是从投资策略角度出发,考虑成本和收益并对容量配置进行描述的研究报道较少,研究 AGC 调频的容量配置很有必要。文章拟搭建相关的成本-收益模型,以南方区域的电厂为例,研究其参与火电机组 AGC 调频的经济效益,并对储能能量配置进行敏感性分析。

## 1 传统发电机组 AGC 调频的问题

频率稳定是电力系统安全可靠运行的重要参数之一,传统的调频主要为一次调频和二次调频,一次调频是依据电网中机组有功功率出力的变化,控制机组有功功率的增减,以减少频率偏差,是由发电机调速器进行的,为静态调频。二次调频即为 AGC 调频,通过调整机组的有功功率,使输出功率与负荷变动相匹配,从而使得发电机组频率能够重新回到正常范围之内,是由调频器来进行。AGC 调频通常由水电、燃煤、燃气机组提供,但是一般的发电机组的负荷存在调节延迟、调节反向和偏差的问题,燃煤机组受爬坡速率的限制,不能精确地跟踪调频指令。锅炉的燃烧具有热惯性,且响应时间过长,通常在分钟级别<sup>[11]</sup>。并且,燃煤机组含有旋转机械器件,在新能源大规模并网后,燃煤机组承担的调频任务加重,会加速设备的损耗,并增加燃料消耗、废弃物排放等问题<sup>[12]</sup>,机组运行的经济性大幅度下降。

## 2 电池储能参与电厂 AGC 调频的原理

电化学储能是指储能介质通过电化学反应,将电能转换成化学能储存起来,并在需要的时候可以转换化学能将电能释放出来的技术。电池储能系统主要由电池储能单元、储能变流器(Power Conversion System, PCS)和主控单元组成。其中电池储能单元还包括与之配套的照明、消防、防雷接地等辅助设施。PCS 是电网连接的功率接口设备,承担控制电池和厂用电源之间的能量双向流动的功能。电池组

的功率响应均在毫秒级别,主要依靠 PCS 系统。电池储能因其具有有功功率快速响应的特点,在频率波动初期能提供一定的有功功率补偿,使得系统能在最短时间内减少频率的偏移<sup>[13]</sup>。主控单元是计算中心,接收、计算和下发调度 AGC 命令。在 AGC 模式下,机组原有的 RTU 设备同时向机组和储能系统的控制器发送指令。储能系统结合指令的目标负荷与实时负荷之差,控制自身的出力大小,并反馈到机组 RTU,直到机组出力与指令相匹配。

### 3 电池储能参与 AGC 调频后的经济分析

本文采用常规的成本-收益模型作为本项目经济评价的方法。储能的收益分为两部分,储能收益和储能系统全寿命周期成本。收益主要来自于电池储能参与 AGC 调频的调频补偿。全寿命周期成本是指从投资和运营成本<sup>[14]</sup>两个部分去分析储能电池的参与 AGC 调频后的成本。

#### 3.1 成本模型

储能系统全寿命周期的成本是指在全寿命周期内发生的全部费用,包含建设投资、设备维护、应用、研发等相关费用<sup>[15]</sup>。其表达式为:

$$C_{\text{all}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}} + C_{\text{rep}} + C_{\text{los}} \quad (1)$$

式中:

$C_{\text{inv}}$  ——项目建设总投资(万元);

$C_{\text{ope}}$  ——运维成本(万元);

$C_{\text{rep}}$  ——更换电池成本(万元);

$C_{\text{los}}$  ——储能调频系统运行损耗(万元)。

项目建设总成本包含电池及相关辅助设备的购置费用、安装和调试、设备基础等费用。运维成本是指机组运行期间每天运行的费用,主要包含人员工资、设备的检修费以及主要设备的运维费用。由于储能装置的寿命有一定的年限,电池的老化会引起其容量、内阻等参数的衰退进而影响整个设备的运行效率,在项目的寿命期需要将电池进行更换,即为电池的更换成本。电池储能系统运行损耗主要包含储能系统充放电的损耗和辅助用电损耗。其中充放电损耗包含充放电损耗、变压器损耗、双向功率变换设备损耗、主功率交直流电缆回路损耗等。

#### 3.2 收益模型

对于南方区域,国家能源局南方能源监管局在 2022 年 6 月发布了《南方区域电力并网运行管理实

施细则》《南方区域电力辅助服务管理实施细则》<sup>[16]</sup>(以下简称“两个细则”),两个细则明确了并网主体,第一次将独立储能电站作为主体纳入南方区域“两个细则”管理。二次调频辅助服务市场的补偿费用分为调频里程补偿和 AGC 容量补偿<sup>[17]</sup>。因此,本文的收益模型从调频里程和 AGC 容量补偿两个维度计算,其计算公式如下:

$$\text{调频收益} = R_{\text{月度调频里程补偿}} + R_{\text{月度AGC容量收益}} \quad (2)$$

其中,月度调频里程补偿计算公式如下:

$$R_{\text{月度调频里程补偿}} = \sum_{i=1}^n (D_i \times Q_i \times K_i) \quad (3)$$

式中:

$n$  ——每月广东调频市场总的交易周期数;

$D_i$  ——该发电单元在第  $i$  个交易周期的调频里程(MW);

$Q_i$  ——第  $i$  个交易周期的里程结算价格(元/MW);

$K_i$  ——第  $i$  个交易周期的综合调频性能指标的均值(综合性能参数指标)。

月度 AGC 容量收益的计算公式如下:

$$R_{\text{月度AGC容量收益}} = \sum_{j=1}^m (C_j \times T_j \times s) \quad (4)$$

式中:

$m$  ——每月总调度时段数;

$C_j$  ——该发电单元在第  $j$  个调度时段的 AGC 容量(MW);

$T_j$  ——该发电单元在第  $j$  个调度时段的参与调频的服务时长(h);

$s$  ——AGC 容量补偿标准(元/MWh)(广东省的补偿标准为 12 元/MWh)。

## 4 案例分析及能量配置敏感性分析

### 4.1 案例分析

以广东某  $2 \times 300$  MW 级国产亚临界参数热电联产机组为例,准备增加配置 25 MW/25 MWh 磷酸铁锂化学电池储能站,以下将对储能的成本及收益进行评价。经计算,储能站工程的建设投资为 6 250 万元,运维成本按 70 万元/a 计算(供货商提供的运维费用,单位容量年运维成本单价为 1.8 万元/MWh~4.3 万元/MWh<sup>[18]</sup>)。运营期内更换 1 次化学电池电芯,费用考虑 5 年后价格降低至单价按 0.5 元/Wh 计

列,考虑 5% 残值。考虑上述储能系统充放电的损耗内容,计算储能系统充放电能量效率为 88%(主要考虑电池充放电能量效率、升压变压器损耗、双向功率变换装置效率、交直流电缆回路损耗等)。而参考国内同类项目实际运行数据,储能参与调频时系统运行负荷率为 50%,即 12.5 MW,以储能系统年运行 125 d 计算,则储能系统年运行平均充放电损耗为:

$$12.5 \text{ MW} \times 12 \text{ h} \times 125 \times (1 - 88\%) = 2\,250 \text{ MWh/a} \quad (5)$$

参考同类项目辅助用电损耗数据,年辅助用电损耗电量为 1 200 MWh,因此项目的储能调频系统运行损耗费为:

$$C_{\text{los}} = (2\,250 \text{ MWh} + 1\,200 \text{ MWh}) \times 655 \text{ 元/MWh} = 226 \text{ 万元} \quad (6)$$

根据广东省内调频辅助服务市场试运行情况,目前规定的报价上下限分别为 15 元/MW 和 5.5 元/MW,考虑目前市场的出清价格,文中收益计算第一年按 10 元/MW,考虑到里程结算价格随着市场波动可能会有一定程度的下降,按前 5 年每年下降 1 元/MW,后 5 年维持不变进行计算,该项目的收益表如表 1 所示。

表 1 项目收益情况表  
Tab. 1 Project benefit

年份	里程结算价格 元/MW	年调频里程 收益/万元	年容量补偿 收入/万元	年总调频收益/ 万元
1	10	3 350	206	3 556
2	9	2 795	206	3 002
3	8	2 374	206	2 581
4	7	2 016	206	2 222
5	6	1 691	206	1 897
6	6	1 664	206	1 870
7	6	1 643	206	1 849
8	6	1 626	206	1 832
9	6	1 613	206	1 819
10	6	1 602	206	1 808

该项目的财务评价的基本参数表如表 2 所示。

该项目的收益情况如表 3 所示。

#### 4.2 能量配置敏感性分析

由上述储能系统的成本-收益模型可知,其全生命周期内的收益会跟随其初始配置容量的变化而变化,考虑到储能政策波动较大会增大投资的不确定

表 2 项目财务评价的主要计算参数

Tab. 2 Main calculation parameters for financial evaluation of the project

项目	数值	备注
贷款比例/%	80	—
贷款年限/a	10	—
长期贷款利率/%	4.3	等额本金
固定资产折旧年限/a	8	—
增值税率/%	13	—
企业所得税率/%	25	—

表 3 项目的主要收益指标

Tab. 3 Main benefit indicators of the project

名称	数值
项目投资内部收益率(所得税后)/%	16.08
净现值/万元	2 831.12
投资回收期/a	4.9
项目资本金内部收益率/%	43.9
净现值/万元	2 976.63
投资回收期/a	2.4

性,因此较短的回收周期显得尤为重要。本节拟对不同的能量配置对投资回收期、全生命周期净利润、项目投资净现值三个维度进行敏感性分析。

由图 1、图 2 可知,当能量等级从 7.5 MWh 变化到 30 MWh,全生命周期的投资净现值和投资净利润随之增加,且增加幅度接近线性增长。当能量等级从 7.5 MWh 变化到 17.5 MWh 时,净利润和净现值呈现快速增长,增长率达到 154% 和 125%。说明储能的加入,可以大幅提升机组的调频性能并提高项目的收益。而当能量等级从 17.5 MWh 变化到 30 MWh 时,净利润和净现值增速变缓,这是由于随着能量等

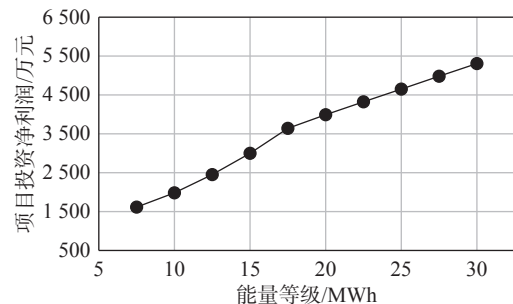


图 1 项目投资净利润与能量配置的关系

Fig. 1 Relationship between net profit of project investment and energy configuration

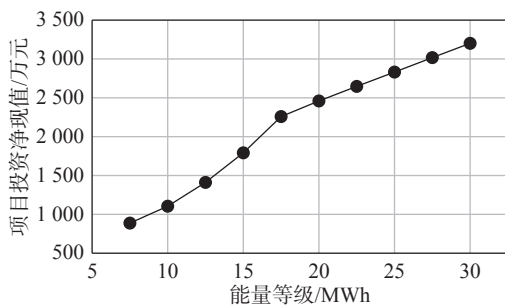


图 2 项目投资净现值与能量配置的关系

Fig. 2 Relationship between net present value of project investment and energy configuration

级的不断增加,综合调频性能指标的增速会逐渐放缓,趋于稳定状态。

但是一味地靠增加能量等级而提高净利润并不是最优的办法,因为项目的建设投资也会随之不断增加,当项目建设投资增加的幅度高于净利润提高的幅度时,项目的收益反而会降低,因此需引入项目投资回收期这一指标。从图 3 可以看到随着能量等级的增加项目投资回收期呈现先减少后增加的趋势,当能量等级从 7.5 MWh 变化至 17.5 MWh 时,项目投资回收期呈现快速降低的趋势,当能量等级为 17.5 MWh 时,项目投资回收期最短,为 4.73 a。当能量等级从 17.5 MWh 变化至 30 MWh 时,项目投资回收期有小幅度的增长,但均低于低能量等级所对应的回收期。这是由于在能量等级增加的后期,综合调频性能指标增速变缓,而项目的建设投资不断增加导致。由此得出对于火电机组配置储能,当容量等级的变化区间为 17.5 MWh 至 30 MWh,即按照火电机组的容量配置 3%~5% 容量等级的储能电池,项目的净利润和项目投资回收期能达到比较好的效果,并且当容量配置为 3% 时的收益最好。在项目的总

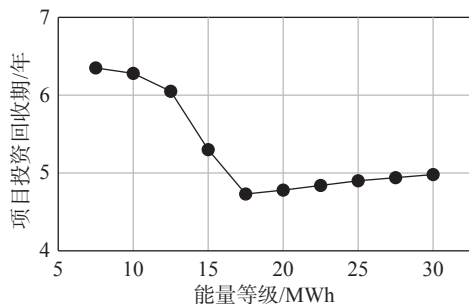


图 3 项目投资回收期与能量配置的关系

Fig. 3 Relationship between project investment payback period and energy configuration

成本费用中,年折旧成本占总成本的 50%~60%(常规燃煤、燃气机组中年折旧成本大约占总成本的 10%),而项目折旧成本的主要来源为储能电池,随着电池行业的不断发展,电池成本的不断下降,储能的收益也能得到进一步提升。

## 5 结论

在双碳背景下,为降低新能源的弃风限电发生频率,将电池储能加入到传统燃煤机组的 AGC 调频中以解决机组难以承受频繁调频压力且运行效率大幅下降的问题<sup>[19-20]</sup>。文章首先分析了传统发电机组 AGC 调频中存在响应时间慢、难以承担繁重的调频任务而导致机组运行经济性下降的问题,随后简要阐述了电池储能参与机组 AGC 调频的原理。最后基于广东地区的调频服务市场,建立了储能参与传统机组 AGC 调频的成本-收益模型,以广东某 2×300 MW 级国产亚临界参数热电联产机组为例,计算了电池储能系统参与 AGC 调频,计算的收益结果如下:项目投资内部收益率(所得税后)为 16.08%,净现值为 2 831.12 万元,投资回收期为 4.9 a。并针对不同的能量配置,从投资回收期、全寿命周期净利润、项目投资净现值 3 个维度进行敏感性分析,可以得出,随着能量等级的增加,项目的净利润和净现值随之增加,当能量等级从 7.5 MWh 变化到 17.5 MWh 时,净利润和净现值呈现快速增长,增长率达到了 154% 和 125%。而能量等级从 17.5 MWh 变化到 30 MWh 时,净利润和净现值增速变缓,这是由于随着能量等级的不断增加,综合调频性能指标的增速会逐渐放缓,趋于稳定状态。随着能量等级的增加项目投资回收期呈现先减少后增加的趋势,当能量等级为 17.5 MWh 时,项目投资回收期最短,为 4.73 a。当能量等级从 17.5 MWh 变化至 30 MWh 时,项目投资回收期有小幅度的增长,但回收期相对较短。对于火电机组配置储能,当容量等级的变化区间为 17.5 MWh 至 30 MWh,即按照火电机组的容量配置 3%~5% 容量等级的储能电池,项目的净利润和项目投资回收期能达到比较好的效果,并且当容量配置为 3% 时的收益最好。这对于后续储能参与 AGC 调频的容量优化提供了参考。

电池储能参与 AGC 调频的收益的进一步提高

主要来自电池成本的进一步降低以及调频补偿收入的提高。对于未来,建设南方区域统一的调频服务市场,实现南方区域五省的统一调频控制,提高机组的调频性能,进一步优化市场的调频资源配置,由市场协同出清,调频的收益可以得到更好地提升。

#### 参考文献:

- [1] 关前锋, 王玉, 董剑敏. 电池储能电站电网侧经济效益及运行效益分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 103-107. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.013.  
GUAN Q F, WANG Y, DONG J M. Analysis of economic and operational benefits of grid-side battery energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 103-107. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.013.
- [2] 邹兰青. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰多角度经济性分析 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263335.  
ZOU L Q. Multi-angle economic analysis for deep peak regulation of thermal unit with large scale wind power connected power system [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263335.
- [3] 张立, 牟法海, 周中锋, 等. 电池储能参与发电厂 AGC 调频技术与经济分析 [J]. *电工技术*, 2018(8): 76-78. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2018.08.031.  
ZHANG L, MOU F H, ZHOU Z F, et al. Technology and economic analysis of AGC FM in power plant by battery energy storage [J]. *Electric engineering*, 2018(8): 76-78. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2018.08.031.
- [4] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 9-13. DOI: 10.7500/AEPS201209268.  
CHEN D Y, ZHANG L Z, WANG S, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of United States and its enlightenment [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(1): 9-13. DOI: 10.7500/AEPS201209268.
- [5] 曹裕灵. 储能系统在辅助调频中应用研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2021. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.002153.  
CAO Y L. Application research of feeder automation self-healing system [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.002153.
- [6] Federal Energy Regulatory Commission. Frequency regulation compensation in the organized wholesale power markets [R]. Washington, DC, USA: Federal Energy Regulatory Commission, 2011.
- [7] 袁家海, 李玥瑶. 大工业用户侧电池储能系统的经济性 [J]. *华北电力大学学报(社会科学版)*, 2021(3): 39-49. DOI: 10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.03.006.  
YUAN J H, LI Y Y. Economy of battery energy storage system for large industrial user-side [J]. *Journal of North China electric power university (social sciences)*, 2021(3): 39-49. DOI: 10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2021.03.006.
- [8] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2007, 22(3): 1259-1266. DOI: 10.1109/TPWRS.2007.901459.
- [9] 时雨, 张忠, 杨晶莹, 等. 储能电池系统提供 AGC 调频的机会成本建模与市场策略 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(7): 2366-2373. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0581.  
SHI Y, ZHANG Z, YANG J Y, et al. Opportunity cost modelling and market strategy of energy storage participating in the AGC market [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(7): 2366-2373. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0581.
- [10] 李明, 焦丰顺, 任畅翔, 等. 新一轮电改下电力辅助服务市场机制及储能参与辅助服务的经济性研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 132-138. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.022.  
LI M, JIAO F S, REN C X, et al. China's power auxiliary service market mechanism and the economics of energy storage systems participating in auxiliary services [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 132-138. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.022.
- [11] 赵嵩. 电池储能 AGC 控制性能评价标准的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.000898.  
ZHAO S. Research on evaluation standard of battery energy storage AGC control performance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.000898.
- [12] 李庆成. 电池储能辅助火电机组调频研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2020.001127.  
LI Q C. Research on frequency modulation of thermal power unit assisted by battery energy storage [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2020.001127.
- [13] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(1): 174-181. DOI: 10.7500/AEPS20210409002.  
WANG K F, XIE L R, QIAO Y, et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(1): 174-181. DOI: 10.7500/AEPS20210409002.

- [14] 赵淑敏, 陈俊. 基于全寿命周期成本的光伏+储能投资效益分析 [J]. *电工技术*, 2022(16): 42-45. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.012.
- ZHAO S M, CHEN J. Benefit analysis of photovoltaic + energy storage investment based on life cycle cost [J]. *Electric engineering*, 2022(16): 42-45. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.012.
- [15] SUNDARARAGAVAN S, BAKER E. Evaluating energy storage technologies for wind power integration [J]. *Solar energy*, 2012, 86(9): 2707-2717. DOI: 10.1016/j.solener.2012.06.013.
- [16] 国家能源局南方监管局.《南方区域电力并网运行管理实施细则》《南方区域电力辅助服务管理实施细则》[EB/OL]. (2022-06-13) [2023-03-08] <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=4028811c80b7744a01815cbdb9a4006e>.  
South China Energy Regulatory Office of National Energy Administration. "Southern regional power grid operation management implementation rules" "Southern regional power auxiliary service management implementation rules" [EB/OL]. (2022-06-13) [2023-03-08]. <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=4028811c80b7744a01815cbdb9a4006e>.
- [17] 印佳敏, 郑赟, 杨劲. 储能火电联合调频的容量优化配置研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(4): 11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002.
- YIN J M, ZHENG Y, YANG J. Research on capacity optimization of generator-storage combined frequency regulation system [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(4): 11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002.
- [18] 朱寰, 刘国静, 张兴, 等. 天然气发电与电池储能调峰政策及经济性对比 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(6): 2392-2402. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0263.
- ZHU H, LIU G J, ZHANG X, et al. Policy and economic comparison of natural gas power generation and battery energy storage in peak regulation [J]. *Energy storage science and technology*, 2021, 10(6): 2392-2402. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0263.
- [19] 党少佳, 赵松, 霍红岩, 等. 电池储能参与火电机组一次调频设

计与应用 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(3): 36-42. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0037.

DANG S J, ZHAO S, HUO H Y, et al. Design and application of battery energy storage in primary frequency modulation of thermal power units [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(3): 36-42. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0037.

- [20] 邵建林, 郑明辉, 郭焱昊, 等. 双碳目标下燃煤热电联产机组储能技术应用分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 102-110. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.012.

SHAO J L, ZHENG M H, GUO C H, et al. Application analysis of energy storage technology for coal-fired combined heat and power generation under carbon peak and neutrality goal [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 102-110. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.012.

#### 作者简介:



钟莹

钟莹 (通信作者)

1990-, 女, 动力工程及工程热物理专业硕士, 工程师, 研究方向为工程技术经济 (e-mail) [zhongying@gedi.com.cn](mailto:zhongying@gedi.com.cn)。

#### 项目简介:

**项目名称** 超大规模电化学储能电站工程设计关键技术研究(EV11001W)  
**承担单位** 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司  
**项目概述** 项目主要针对超大规模电化学储能电站工程设计关键技术进行研究, 包含电能质量专题研究、储能系统主接线和布置方式研究、储能系统冷却方案研究、效率和收益问题, 最终形成成果支撑设计。  
**主要创新点** 在储能项目效率和收益问题上, 目前大部分的研究只在基建环节做比选和评价, 投决也仅对系统理想状态假设的运营模式进行经济分析, 几乎没有把全寿命周期的效率和初期配置规模、运营中衰减状态、电池更替措施等作为重点。本课题拟通过各阶段信息获取、趋近真实的场景测算, 以及最终对运行数据的监测和反校验, 提出合理的设计方案和评价指标, 更深入支撑项目投决、保障投资者利益诉求, 从而提升设计软实力。

(编辑 赵琪)