

# 广东地区 2×600 MW 级燃煤机组磷酸铁锂电池储能 辅助调频经济性研究

王帆<sup>✉</sup>, 李宾斯, 夏同令, 彭敏, 汪少勇

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 针对广东省燃煤电厂联合储能 AGC 调频项目经济效益情况问题, 通过建立典型工程案例的方法进行展示。[方法] 文章归纳总结了最新版本南方区域调频辅助市场收益结算规则, 计算出广东省内典型 2×600 MW 燃煤机组采用磷酸铁锂电池储能的调频性能指标, 然后建立收益模型, 对成本、里程、出清价格、运行时间等关键参数等进行了估算或假定, 最后在采用合同能源管理模式, 从投资方角度测算其经济性并分析了在不同总投资、投运年份及收益分成情况下的财务指标变动情况。[结果] 结果表明在已有测算的情况, 除了第一种分成方案外, 其他场景下的资本金内部收益率均超过 7%。[结论] 在广东地区四年内磷酸铁锂电池储能的调频项目具有较好的投资回报, 此后随着总投资的降低和分成的提升, 依然可以吸引投资方参与此类型项目。

**关键词:** 储能; 燃煤电站; 联合调频; 经济性; 磷酸铁锂电池

中图分类号: TM7; TM712

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0071-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Economic Research on Energy Storage Auxiliary Frequency Regulation of Lithium Iron Phosphate Battery for 2 × 600 MW Coal-fired Unit in Guangdong

WANG Fan<sup>✉</sup>, LI Binsi, XIA Tongling, PENG Min, WANG Shaoyong

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

**Abstract:** [Introduction] In view of the economic benefits of AGC frequency regulation project of combined energy storage in Guangdong coal-fired power plant, the method of establishing typical engineering cases is demonstrated. [Method] This article summarized the latest version of frequency regulation auxiliary market revenue settlement rules in the southern region and calculated the frequency regulation performance index of typical 2 × 600 MW coal-fired units using lithium iron phosphate battery energy storage in Guangdong Province, then established a revenue model, estimated or assumed the key parameters such as cost, mileage, clearing price, running time, etc. Finally, under the contract energy management mode, it calculated its economy from the perspective of investors and analyzed the changes of financial index under different total investment, operation year and revenue sharing. [Result] The results show that in the measured case, except for the first sharing scheme, the internal rate of return of capital in other scenarios all exceeds 7%. [Conclusion] The frequency regulation project of lithium iron phosphate battery energy storage in Guangdong has a good return on investment within four years. After that, investors can still be attracted to participate in this project with the decrease of total investment and the increase of share.

**Key words:** energy storage; coal-fired power plant; combined frequency regulation; economy; lithium iron phosphate battery

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/>).

## 0 引言

近年来, 广东地区的燃煤电厂通过储能联合火电机组参与调频辅助服务(AGC), 提高电厂在调频

辅助市场中的竞争力, 增加电厂运营的经济效益逐渐成为行业共识。磷酸铁锂电池由于技术成熟度最高, 能量密度和功率密度均较好, 综合性价比最高, 目前成为了燃煤电厂联合储能 AGC 采用的主流电

收稿日期: 2021-12-01 修回日期: 2022-05-11

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“面向新型电力系统模块化储能系统研究”(EV10101W)

池技术。

现阶段我国学者针对火电联合电化学储能 AGC 调频的配置、性能、初步经济性开展了研究。

文献 [1] 通过 Matlab 仿真建模,对储能投资进行评估。文献 [2] 通过仿真计算确定联合调频项目中储能最优容量。文献 [3] 证明了储能系统对燃煤机组的轴系扭振模态、电力系统稳定器功能、一次调频等基本无影响。文献 [4] 以广东两台 330 MW 燃煤机组为例,说明联合储能可显著提升机组的调频性能。文献 [5] 用一年多的运行结果,证明南方(以广东起步)调频辅助服务市场在激励机组改善调节性能、优化配置调频资源、提高电网安全稳定水平和促进新技术发展等方面起到了积极的作用。文献 [6] 从国家、区域、省市 3 个层次剖析近年储能参与调频的补偿机制。文献 [7] 探索燃气发电企业如何在辅助服务市场转型。文献 [8] 应用雨流计数法对磷酸铁锂储能电池的使用寿命进行计算。文献 [9-11] 储能参与火电调频辅助服务市场收益性进行了论述。文献 [12] 介绍了目前分布式储能的商业模式。文献 [13-14] 介绍了国外储能参与调频辅助服务市场的制度及经验。文献 [15-16] 介绍了我国储能参与调频辅助服务市场制度。

在项目决策阶段,电厂储能 AGC 的建设方或投资方较为关注增加储能后的项目盈利性。但我国调频辅助市场根据当地的电源禀赋,具有很强的地域性特点,处于动态博弈中,收益和成本的确定比较复杂。现有的文献对火电机组联合调频的经济分析主要采用静态分析法,未考虑资金时间价值。

文章就广东地区 2×600 MW 级燃煤机组联合磷酸铁锂电池储能参与调频辅助服务市场经济性进行研究,选用动态经济指标分析方法。假定 2×600 MW 电厂联合储能规模为 25 MW/25 MWh,采用 1C 电池,项目建设期半年,2022 年投产,运营期为 10 年。

## 1 广东燃煤机组联合储能调频性能指标分析

### 1.1 南方区域调频收益结算规则

2021 年 4 月 1 日,《南方区域调频辅助服务市场交易规则(试行)》(总调市场[2021]3 号,以下简称“3 号规则”)正式执行。广东省先行启动,按南方区

域辅助服务市场新规则进入结算试运行。调频市场补偿费用可分为两种,一是调频里程补偿,二是 AGC 容量补偿。只有当发电单元在调频市场中中标时可获得相应调频里程补偿费用。但只要发电单元提供合格 AGC 服务,均可获得相应 AGC 容量补偿费用。

#### 1) 里程补偿

发电单元在调频市场中中标且提供了调频服务,则可获得相应的调频里程补偿。调频里程补偿按日进行统计,每月进行结算。“3 号规则”中月度调频里程补偿计算公式如下:

$$R_{\text{调频里程补偿},i} = D_i \times Q_i \times \sqrt[m+1]{K_i} (K_i \geq 1) \quad (1)$$

$$R_{\text{调频里程补偿},i} = D_i \times Q_i \times K_i (K_i < 1) \quad (2)$$

$$R_{\text{月度调频里程补偿}} = \sum_i^n R_{\text{调频里程补偿},i} \quad (3)$$

式中:

$R_{\text{调频里程补偿},i}$  —— 为该发电单元第  $i$  个交易周期的调频里程补偿;

$R_{\text{月度调频里程补偿}}$  —— 为该发电单元当月的调频里程补偿;

$n$  —— 代表在每月调频市场里的总交易周期数量;

$D_i$  —— 代表该发电单元在第  $i$  个交易周期中所提供的调频里程量;

$Q_i$  —— 代表在第  $i$  个交易周期的里程进行结算的价格;

$K_i$  —— 代表该发电单元在第  $i$  个交易周期里的综合调频性能指标的平均值;

$m$  —— 为自市场进入结算试运行起自然年数;市场进入结算试运行当年  $m$  取 0。

#### 2) 容量补偿

在电能量现货市场启动前,区域内调频市场发电单元 AGC 容量按照 3.56 元/MWh 补偿,调频市场中标发电单元不再进行容量补偿;现货电能量市场启动后,其调频容量补偿为发电单元留出 AGC 调频容量产生的机会成本。

发电单元以目前出力点为标准,在  $\leq 5$  min 内向上可调容量最大值与向下可调容量最小值之和作为发电单元 AGC 容量。发电单元月度 AGC 容量补偿计算公式如下:

$$R_{\text{月度调频容量补偿}} = \sum_{j=1}^m (C_j \times T_j \times S) \quad (4)$$

式中:

$m$  ——表示每月总调度时段数;

$C_j$  ——表示该发电单元在第  $j$  个调度时段的 AGC 容量;

$T_j$  ——表示该发电单元在第  $j$  个调度时段调频服务时间;调频服务时间;

$S$  ——表示 AGC 容量补偿标准。

### 3) AGC 调频里程

AGC 调频里程就等于发电单元在响应 AGC 控制指令后,最后完成响应时的实际出力值与响应指令时的名义出力值的差,且本差值应为绝对值。在一时间段内的总调频里程就等于此时段内发电单元响应 AGC 指令的所进行的调频里程之和。

## 1.2 综合调节性能指标(预估)

根据“3号规则”,综合调频性能指标用  $k$  值表示,其含义为发电单元相应 AGC 指令的综合性能表现,计算公式为:

$$K = 0.5 \times K_1 + 0.25 \times K_{II} + 0.25 \times K_{III} \quad (5)$$

### 1) 调节速率 $K_1$

$K_1$  指发电单元响应 AGC 控制指令的速率,计算公式如下:

$$K_1 = \frac{\text{发电单元实测速率}}{\text{市场范围内AGC发电单元平均标准调节速率(p.u.)}} \quad (6)$$

燃煤机组的标准调节速率按照额定功率的 1.5%/min 计算,额定功率为 600 MW,因此平均标准调节速率应为 9 MW/min。调频资源分布区内 AGC 发电单元平均标准调节速率(p.u.)按“3号规则”要求, $K_1$  上限为 3,在市场范围内 AGC 发电单元平均标准调节速率每个自然年 1 月 1 日更新一次,本测算取 5 MW/min。按照目前南网调频市场的  $K$  值计算规则,储能接入后对应的  $K_1$  在 1.8 左右。

### 2) 响应时间 $K_{II}$

$K_{II}$  指发电单元响应 AGC 控制指令的时间延迟,计算公式如下:

$$K_{II} = 1 - \left( \frac{\text{发电单元响应延迟时间}}{5\text{min}} \right) \quad (7)$$

由于储能系统具有快速精确出力调节能力,在电网 AGC 调度指令下发时刻,即使存在路径上的各

种延迟,如通讯、采样和控制,也可保证系统总体响应时间控制在 15 s 以内,对响应时间指标  $K_{II}$  不应低于 0.95。

### 3) 调节精度 $K_{III}$

$K_{III}$  指发电单元响应 AGC 控制指令的精准度,计算公式如下:

$$K_{III} = 1 - \left( \frac{\text{发电单元调节误差}}{\text{发电单元调节允许误差}} \right) \quad (8)$$

发电单元允许调节误差为机组额定容量的 1.5%,为 9 MW。储能系统的出力调节远优于对机组额定调节精度的要求,其误差小于其额定功率的 3%,即假设额定功率为 25 MW 的储能装置出力调节误差 < 0.75 MW。储能系统在与燃煤机组联合运行过程中,可以缩小燃煤发电机组的稳态调节误差,从而改善系统联合运行的调节精度。考虑储能系统需要联合火电机组运行,预计可以将调节精度指标  $K_{III}$  稳定在 0.9 左右。

### 4) 综合调频性能指标 $K_{III}$

结合以上对  $K_1$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$  的预测,储能系统接入燃煤机组后,在进行机组控制优化的基础上, $K$  值可以由原来的平均 0.5~0.6 提升到 1.35 左右。

## 2 收益、成本等主要参数说明

### 1) 调频里程估算

根据广东省同级别燃煤机组增加储能调频后的运行数据,在运营期第一、二年日调频里程可按 10 GW 计。但可以预见随着竞争的加剧,后几年里程将逐渐减少。考虑到第三、四年调频里程降低至 9 GW,第五年起各年日调频里程为 8 GW。

### 2) 里程结算价格估算

“3号规则”规定的报价上下限为 15 元/MWh 和 5.5 元/MWh。里程结算价格在储能运营第一年按 12.5 元/MWh,后期考虑里程结算价格可能会有一定程度的下降趋势,按照前 5 年每年下降 0.5 元/MWh,后 5 年维持不变进行计算。

### 3) 机组年化 $K$ 值

本工程计划投产的时间是 2022 年,“3号规则”中规定于 2021 年 4 月 1 日实施,则 2021 年  $m$  取 0,2022 年  $m$  为 1,根据公式(1),则运行第一年的年化  $K$  值为  $\sqrt[3]{K}$ ,第二年为  $\sqrt[3]{K}$ ,以此类推。

### 4) 容量补偿收入

发电单元的 AGC 容量确定规则为本发电单元以当前出力点为标准,在 $\leq 5$  min 范围内向上可调的容量与向下可调的容量之和。本机组调节速率为机组额定容量的 1.5%/min,则 5 min 单向可调容量为单机容量的 7.5%,即为 45 MW,双向为 90 MW,容量补偿标准为 3.56 元/MWh(未中标)。按照现有运行的出清价格及中标概率,每天有 16 h 进入调频模式,则有 8 h 为未中标时间,每日容量补偿收入估计为:

$$90 \text{ MW} \times 8 \text{ h} \times 3.56 \text{ 元/MWh} = 2563 \text{ 元} \quad (9)$$

#### 5) 机组年运行时间

考虑运营期检修与停运时间,机组年运营 300 d。

#### 6) 建设成本估算

有关资料显示近年光伏、风电等新能源磷酸铁锂电池储能建设成本在 1.5 元/Wh 左右。但与新能源侧储能不同,火电 AGC 储能需要增加更多的 PCS 设备、ACG 系统,对开关切换时间要求更短,调频性能更加灵敏,且涉及到电厂侧改造,导致储能价格水平较高。本测算案例假设在广东省内,采用 1C 电池,配置容量为 25 MW/25 MWh,火电 AGC 磷酸铁锂电池储能项目静态投资约 3.12 元/Wh,如表 1 所示。

#### 7) 电耗成本估算

储能调频系统运行损耗包括 2 个组成部分:储能系统充放电损耗和储能系统辅助用电损耗,具体有储能电池充放电损耗、双向功率变换装置损耗、

380 V/6 kV 升压变压器损耗、主功率交直流电缆回路损耗等。

本项目储能电池采用磷酸铁锂电池,电池充放电能量效率取 95%;双向功率变换装置效率大于 97%;380 V/6 kV 升压变压器损耗按 1% 计算,交直流电缆回路损耗按 1% 计算。计算储能系统全回路充放电能量效率如下:

$$\eta = 95\% \times 97\% \times 97\% \times (1-1\%) \times (1-1\%) = 88\% \quad (10)$$

参考国内同类项目实际运行测量数据,储能系统长期运行负荷率 50%,即长期运行平均功率为 12.5 MW,有一半的时间处于调频中标状态。以储能系统年运行 300 d 计算,则储能系统年运行平均充放电损耗为:

$$12.5 \text{ MW} \times 12 \text{ h} \times 300 \times (1-88\%) = 5400 \text{ MWh/a} \quad (11)$$

储能系统辅助用电损耗主要为储能电池和双向功率变换装置冷却用电,还包括控制用电和照明用电等。根据本项目辅助系统设备配置,储能系统辅助用电功率约 800 kW,按 50% 平均运行负荷考虑为 400 kW,年辅助用电损耗电量:

$$400 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 300 = 2880 \text{ MWh/a} \quad (12)$$

则储能系统接入后发电机组年厂用电量增加:

$$5400 \text{ MWh} + 2880 \text{ MWh} = 8280 \text{ MWh} \quad (13)$$

每年消耗电量折算成费用(电价按广东省电厂上网标杆含税电价 475 元/MWh 计算):

$$8280 \text{ MWh} \times 475 \text{ 元/MWh} = 393 \text{ 万元} \quad (14)$$

#### 8) 运维费估算

运维费包括运维人工费、设备维护、检修材料费等,按 100 万元/年估。另外考虑电池充放电次数和寿命,预计在第五年更换一次电池,五年后电池更换费用 0.4 元/Wh。由于更换电池总费用较高,考虑进行资产化处理,按直线法 4 年进行折旧,残值率 5%。

#### 9) 调频考核分摊费

根据广东省部分燃煤机组在调频市场的考核费用数据,按机组容量和发电量粗略计算,每年分摊费用为 720 万元。

### 3 合同能源管理模式介绍

由于市场的调频容量不确定性、储能调频项目投运增加带来的中标不确定性以及政策变动等多重

表 1 储能项目静态投资表

Tab. 1 Static investment statement of energy storage project

序号	工程或费用名称	建筑工程费	设备购置费	安装工程费	其他费用	合计
一	主辅生产工程/万元	455	5566	1095	—	7117
(一)	预制舱基础/万元	188	—	—	—	188
(二)	场区建筑/万元	250	—	—	—	250
(三)	破除修复工程/万元	3	—	—	—	3
(四)	电气系统/万元	—	5565	775	—	6340
(五)	站区照明/万元	—	1	5	—	6
(六)	调试工程/万元	—	—	316	—	316
(七)	临时工程/万元	15	—	—	—	15
二	其他费用/万元	—	—	—	571	571
三	基本预备费/万元	—	—	—	115	115
四	工程静态投资/万元	455	5566	1095	686	7803
—	各项占静态投资/%	5.84	71.33	14.04	8.8	100
—	各项静态单位投资/(元·kW <sup>-1</sup> )	182	2226	438	275	3121

风险因素,目前业内的火电 AGC 储能广泛采用合同能源管理模式,类似 BOOT 模式,投资风险主要由投资方承担。它主要由项目投资、收益分成比例、每月份费用承担比例、运营期限及移交方式等部分组成。电厂通过招标形式确定一家投资方。由投资方承担项目建设投资、土地租金、运维费用、系统耗电费用、税金等成本,电厂提供土地、水源、电源接口。扣除调频补偿分摊费用之后,投资方与电厂方按前一定比例分成,如前5年75:25分成,后5年60:40。此模式下建设和运维风险主要由投资方承担,但ACG的收益也将与投资方分享。

#### 4 经济性分析

如上所述,若采用合同能源管理模式,投资方与电厂方按前5年75:25分成,后5年60:40分成,项目在2022年投入运行,从投资方角度进行项目融资前分析,所得税前项目投资内部收益率(IRR)为9.30%,投资回收期为5.96年;所得税按25%计,所得税后内部收益率为7.45%,投资回收期6.34年;若考虑80%的直接由银行贷款融资,资本金20%,长期贷款利率4.65%,短期贷款利率3.85%计算,项目资本金内部收益率11.39%。

##### 4.1 投资水平对经济指标影响

基础方案的静态投资为3.12元/Wh,对应静态投资8000万元,贷款利息按74.4万元考虑,可抵扣增值税720万。由于预计磷酸铁锂电池价格逐年下降趋势,只考虑总投资降低情形下经济指标变动情况。当其他条件不变,总投资额下降10%、20%、30%、40%、50%时,投资方的资本金内部收益率分别提高到19.90%、32.19%、51.15%、80.15%、124.12%。表2投资水平变动经济指标表。可见项目总的投资水平的变化对储能项目经济性影响较大。

##### 4.2 投运年份对经济指标影响

根据机组年化 $K$ 值计算规则,投运的自然年越后,计算的年化 $K$ 值会越小。其他条件不变,预计在2026年投运时,合同能源管理模式的资本金(20%)内部收益率将降低到8%以下,对于投资方将缺乏收益吸引力。表3为2022年—2027年投运经济指标表。但若储能站建设成本能降低到3元/Wh,则资本金内部收益率依然可保持在11.39%水平。由于储能站设备成本占比70%左右,且储能电芯的成本

表2 投资水平变动经济指标表

Tab. 2 Economic indicators of changes in investment levels

总投资变化率/%	IRR(税前)/%	IRR(税后)/%	资本金IRR/%
0	9.30	7.45	11.39
-10	12.63	10.13	19.90
-20	16.76	13.45	32.13
-30	22.05	17.67	51.15
-40	29.07	23.23	80.15
-50	38.88	30.97	124.12

有下降趋势,则0.2元/Wh的成本降低主要依靠储能设备费用的降低。

表3 2022年—2027年投运经济指标表

Tab. 3 Economic indicators for operation from 2022 to 2027

投运年份/%	IRR(税前)/%	IRR(税后)/%	资本金IRR/%
2022年投运	9.30	7.45	11.39
2023年投运	8.67	6.69	9.79
2024年投运	8.26	6.64	9.07
2025年投运	7.79	6.40	8.42
2026年投运	7.75	6.23	7.93
2026年投运	7.75	6.23	7.93
2027年投运	7.57	6.09	7.55

##### 4.3 分成方案对经济指标影响

在合同能源管理模式下,通过增加投资方的分成比例,也可提高其投资收益。表4是不同分成比例下投运经济指标表。预计随着调频收益逐年降低,投资方的分成比例将有一定上升以保证合同能源管理模式下对投资方的吸引力。

#### 5 结论

文章分析了在新的调频政策下,广东区域典型2×600 MW燃煤机组联合磷酸铁锂电池储能,采用合同能源管理模式时,从投资方角度考虑收益、成本和动态经济效益情况。

在南方区域调频辅助服务市场有效激励下,预计在四年内,即使年化 $k$ 值将逐年下降,区域内的火电调频新能上升,出清的量减少,现有的合同能源管理模型下依然对储能的投资方有吸引力。这主要是一方面储能站建造成本,设备成本降低,一定程度上可抵消收益下降的不利影响,另一方面,由于项目调

表 4 不同分成比例下投运经济指标表

Tab. 4 Economic indicators of operation in different sharing proportion

投资方与电厂方分成比例		IRR (税前)/	IRR (税后)/	资本金 IRR/
前五年	后五年	%	%	%
70 : 30	55 : 45	6.26	5.00	4.70
75 : 25	60 : 40	9.30	7.45	11.39
80 : 20	65 : 45	12.19	9.76	18.14
85 : 15	75 : 25	15.64	12.59	26.06
90 : 10	80 : 20	18.20	14.64	32.70
95 : 15	85 : 15	20.68	16.62	39.57

频总收益水平下降,投资亏损风险提高,储能投资方可以争取到更高的分成比例。

#### 参考文献:

- [1] 孙钢虎,王小辉,陈远志,等. 储能联合发电机组调频经济效益分析 [J]. 电源学报, 2020, 18(4): 151-156. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.4.151.  
SUN G H, WANG X H, CHEN Y Z, et al. Analysis of economic benefits of frequency modulation by energy storage combined generating units [J]. *Journal of power supply*, 2020, 18(4): 151-156. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.4.151.
- [2] 印佳敏,郑赞,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.
- [3] 谢惠藩,王超,刘湃泓,等. 南方电网储能联合火电调频技术应用 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 172-179. DOI: 10.7500/AEPS20200206004.  
XIE H F, WANG C, LIU P H, et al. Application of joint frequency regulation technology of energy storage and thermal power in China southern power grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(4): 172-179. DOI: 10.7500/AEPS20200206004.
- [4] 毛庆汉. 储能联合火电机组参与调频辅助服务市场的工程应用 [J]. 电气技术, 2021, 22(7): 103-108. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2021.07.019.  
MAO Q H. Engineering application of battery energy storage system coordinated with thermal power unit in regulating ancillary service market [J]. *Electrical engineering*, 2021, 22(7): 103-108. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2021.07.019.
- [5] 董超,郝文焕,董锴,等. 南方(以广东起步)调频辅助服务市场机制设计与运营实践 [J]. 广东电力, 2020, 33(6): 12-19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.006.002.  
DONG C, HAO W H, DONG K, et al. Mechanism design and operation practice of frequency regulation auxiliary service market in southern China (starting from Guangdong) [J]. *Guangdong electric power*, 2020, 33(6): 12-19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2020.006.002.
- [6] 张志,邵尹池,伦涛,等. 电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 71-77,84. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.05.010.  
ZHANG Z, SHAO Y C, LUN T, et al. Review on the policies and compensation mechanism of BESS participation in the auxiliary service of frequency and peak modulation [J]. *Electric power engineering technology*, 2020, 39(5): 71-77,84. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.05.010.
- [7] 闫海波,蒋韬. 广东天然气发电企业的转型之路 [J]. 燃气轮机技术, 2020, 33(3): 14-18,25. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2020.03.003.  
YAN H B, JIANG T. The transformation of Guangdong natural gas power generation enterprises [J]. *Gas turbine technology*, 2020, 33(3): 14-18,25. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2020.03.003.
- [8] 于洋. 考虑风电跟踪计划出力及辅助火电 AGC 调频的储能容量配置研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2020.000116.  
YU Y. Research on energy storage capacity allocation considering wind power tracking plan output and auxiliary thermal power AGC frequency modulation [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020. DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2020.000116.
- [9] 王琦. 储能火电联合调频的容量配置及收益预测研究 [J]. 现代信息科技, 2019, 3(16): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4706.2019.16.016.  
WANG Q. Research on capacity allocation and revenue prediction of joint frequency modulation for energy storage and thermal power [J]. *Modern information technology*, 2019, 3(16): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4706.2019.16.016.
- [10] 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.
- [11] 陈亮辉. 火电厂储能调频的应用前景综述 [J]. 科技与创新, 2021(1): 109-110,113. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2021.01.040.  
CHEN L H. Review on application prospect of energy storage frequency modulation in thermal power plant [J]. *Science and technology & innovation*, 2021(1): 109-110,113. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2021.01.040.
- [12] 李德智,田世明,王伟福,等. 分布式储能的商业模式研究和经济性分析 [J]. 供用电, 2019, 36(4): 86-91. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2019.04.013.  
LI D Z, TIAN S M, WANG W F, et al. Business model research and economic analysis of distributed energy storage [J].

- Distribution & utilization, 2019, 36(4): 86-91. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2019.04.013.
- [13] 张鸿宇, 王宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示 [J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 766-773. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0370.
- ZHANG H Y, WANG Y. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China [J]. Energy storage science and technology, 2021, 10(2): 766-773. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0370.
- [14] 杨超, 孙谊嫒, 王勇, 等. 国外典型调频辅助服务市场综述与启示 [J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 96-100. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2021.05.019.
- YANG C, SUN Y Q, WANG Y, et al. Review and enlightenment of foreign typical frequency regulation auxiliary service market [J]. Power demand side management, 2021, 23(5): 96-100. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2021.05.019.
- [15] 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.
- [16] 陈浩, 贾燕冰, 郑晋, 等. 规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3606-3617. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0045.
- CHEN H, JIA Y B, ZHENG J, et al. Research on Market

mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage [J]. Power system technology, 2019, 6(3): 132-138. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0045.

#### 作者简介:



王帆

王帆(第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 工程师, 建造管理理学硕士, 主要从事新能源技术经济分析与研究工作(e-mail)wangfan@gedi.com.cn。

#### 李宾斯

1981-, 女, 高级工程师, 经济学硕士, 主要从事电力建设工程技术经济工作(e-mail)libinsi@gedi.com.cn。

#### 夏同令

1982-, 男, 高级工程师, 管理学硕士, 主要从事电力建设工程技术经济工作(e-mail)xiatongling@gedi.com.cn。

#### 彭敏

1995-, 女, 工程师, 环境科学与工程专业硕士, 主要研究方向为电力系统中水工艺及给排水消防系统(e-mail)pm951509@163.com。

#### 汪少勇

1971-, 男, 正高级工程师, 电气工程学士, 主要从事电力建设工程电气设计工作(e-mail)wangshaoyong@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)