

电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究

张志¹, 邵尹池^{2,3}, 伦涛¹, 周济¹

(1. 国家电网有限公司,北京 100031;2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司),北京 100045;
3. 风光储并网运行技术国家电网公司重点实验室,北京 100045)

摘要:近年来,储能参与电网调峰调频辅助服务的政策层出不穷,有必要对其进行梳理与分析。文中首先结合电化学储能调峰调频性能与电化学储能系统(BESS)运行案例,从国家、区域、省市3个层面剖析了近年来BESS参与调峰调频辅助服务的政策,并归纳了典型省份对BESS参与调峰调频辅助服务的准入要求、交易价格与交易模式。然后,分别从美欧储能参与调频补偿方式以及我国主要的调频补偿方法2个方面探究了BESS参与调频的补偿机制。以青海省为例,梳理了BESS参与调峰的主要方式与补偿机制。最后,简要分析了现阶段BESS参与调峰调频辅助服务的问题,从完善差异化补偿、优化储能调频调控方案、探索共享储能运营模式、完善准入及评价标准等方面对BESS参与调峰调频辅助服务提出建议。

关键词:电化学储能系统(BESS);调峰;调频;辅助服务;补偿机制

中图分类号:TM911

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0071-07

0 引言

随着新能源装机比例持续增高,电力系统常规电源调峰调频能力下降,对新能源的消纳与电网安全运行造成制约^[1-2]。在此情况下,性能优越的储能为电力辅助服务开拓了新的出路。随着储能度电成本的不断降低,储能电站在调峰调频方面的应用效果被逐步验证和认可^[3-4]。

储能参与电力辅助服务在国外开展的较早,美国联邦能源监管委员会(FERC)于2011年颁布755号法案,提出储能调频里程的概念,将调频效果纳入补偿机制。随后,德国、英国等国家也陆续颁布储能参与电力辅助服务市场的行动方案^[5-6]。在国内,国家部委、地方政府、电网企业纷纷出台政策鼓励储能参与电网辅助服务。2016年6月,国家能源局正式出台《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》,打开了储能参与辅助服务市场的大门。该通知确认了储能在辅助服务市场的地位,但未明确结算机制,储能价值难以衡量。

近年来,国内电源侧、电网侧多个储能项目陆续投运,其参与调峰调频的机制成为研究热点。2017年,华北能监局将调频服务申报价格限定为0~12元/MW^[7],使建立储能调频市场具有重要现实意义。文献^[8-9]结合美国各州调频市场定价

机制,分析了调频里程定价、市场组织等主要环节及适用情况,对我国各阶段的调频市场建设提出建议。文献^[10]总结西方国家的辅助服务市场发展历程,从提高储能参与的角度对我国辅助服务市场机制设计提出建议。

文中结合电化学储能系统(battery energy storage system,BESS)调峰调频性能,从国家、区域、省市3个层面梳理了近年来储能参与辅助服务的政策和案例,比较了各地储能参与调峰调频的政策要点和交易差异,探究了储能参与调峰调频的补偿机制,并分析存在的问题,对储能参与调峰调频服务提出建议。

1 BESS 调峰调频实践概述

BESS具有响应速度快,调节范围大,指令跟踪精确等特点,参与辅助服务具有天然的性能优势,同时其克服了传统机组不能快速切换爬坡方向、易反调的缺陷。4种主要类型BESS的关键技术指标如表1所示。

表1 主要BESS关键技术指标
Table 1 Key technical indexes of BESS

类型	存储容量 /MW	支撑响应时间	能量转换效率/%
锂电池	1~20	1 min~8 h	90~95
液流电池	1~10	1 min~12 h	65~70
钠硫电池	1~10	1 min~1 h	90
铅酸电池	1~20	1 min~10 h	70

收稿日期:2020-03-19;修回日期:2020-04-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900500)

国内已有多座 BESS 电站参与电源侧、电网侧、用户侧调峰调频。在电源侧,原北京石景山热电厂 2 MW 锂电池储能系统是我国第一个提供调频辅助服务的兆瓦级储能系统^[11];国家风光储输示范工程磷酸铁锂储能系统兆瓦级响应时间仅需数十毫秒,支撑时间可达 30 min,具有稳定的调峰调频性能^[12];山西同达电厂配置 9 MW/4.5 MW·h 储能系统,投运后调频性指标 K_p 值由 2.98 提升至 5 以上,半年回收成本约 32%,体现出储能调频的经济性。在电网侧,2018 年投运的江苏镇江 101 MW/202 MW·h 储能电站在夏季高峰时期采用“两充两放”模式参与早晚高峰调节,发挥了良好的调峰作用^[13]。在用户侧,无锡新加坡工业园储能电站高峰时段可具备 20 MW 的调节能力,既缓解了电网调峰压力,又保证了储能用户的合理收益。

2 BESS 参与电力辅助服务政策

截至 2020 年 6 月,全国已有超过 20 个地区出台了针对电力辅助服务市场运营规则的政策,其中十余省市对 BESS 参与调峰调频的准入要求、方式作了明确规定,相关的重要政策发布时间表如图 1 所示。

2.1 国家层面

2016 年 6 月,国家能源局正式出台《关于促进

电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》,旨在解决“三北”地区电力系统调峰问题,减少弃风、弃光量^[14]。2017 年 9 月,国家发改委等五部委联合发布《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》,将 10 年储能技术产业发展规划为 2 个阶段^[15]:第一阶段实现储能由研发示范向商业化初期过渡,第二阶段实现商业化初期向规模化发展转变。2017 年 11 月,国家能源局发布《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》,提出全面推进电力辅助服务补偿(市场)工作的三阶段目标^[16],指出要“按需扩大电力辅助服务提供主体,鼓励储能设备、需求侧资源参与电力辅助服务,允许第三方参与提供电力辅助服务”。

2.2 区域层面

在国家政策的指导下,各区域均迅速开展了相关试点工作^[17-19]。2017 年 12 月,南方能监局发布《南方区域电化学储能电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则(试行)》,将地市级及以上电力调度直调的容量为 2 MW/0.5 h 及以上的储能电站纳入辅助服务管理对象,并重点规定了储能电站的考核方案及补偿标准,将储能参与调峰的补偿暂定为 0.5 元/(kW·h)^[17]。2018 年 8 月和 12 月,华北能监局先后发布《京津唐电网调频辅助服务市场运营规则(试行)》《华北电力调峰辅助服务市场运营规

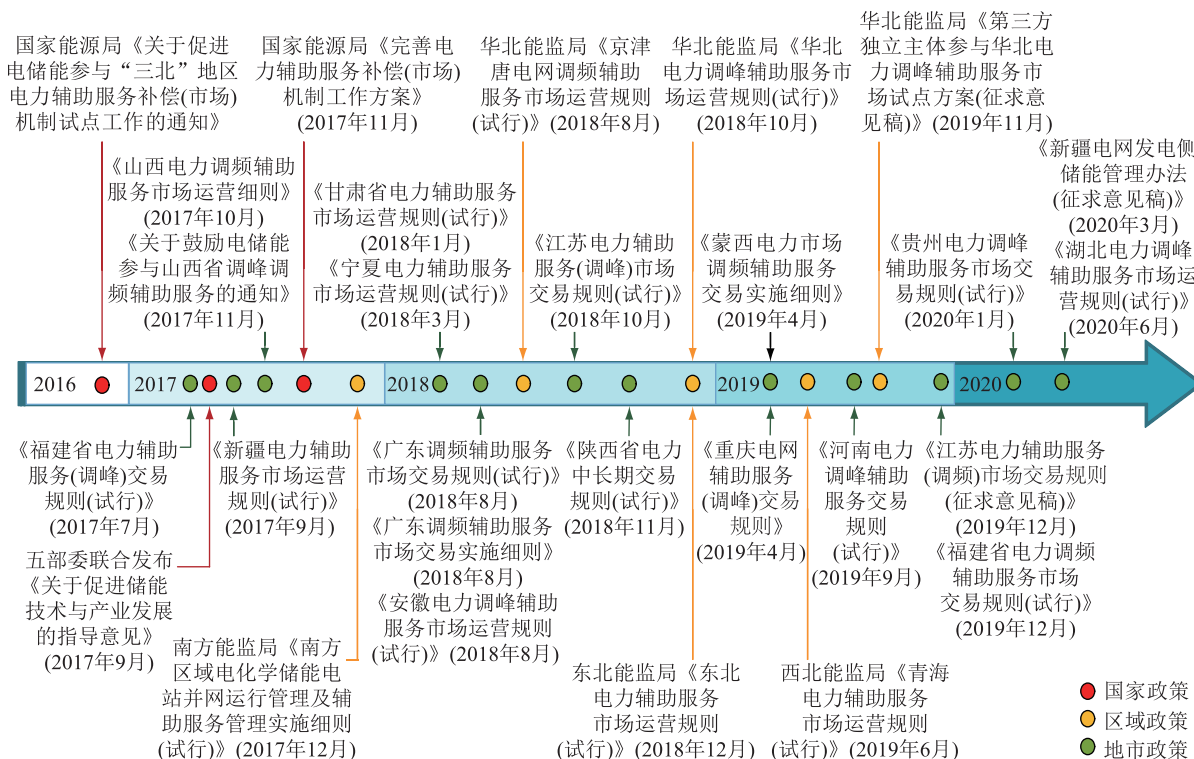


图 1 与 BESS 参与辅助服务相关的政策发布时间表

Fig.1 Time chart of electrical auxiliary service policies related to BESS

则(试行)》,其中规定储能参与调频服务的申报价格范围暂定为不高于 12 元/MW。随后,东北能监局也发布了《东北电力辅助服务市场运营规则(试行)》。

2019 年 11 月,华北能监局出台《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务试点市场规则(试行)》,明确发电侧储能可独立参与或由所属发电企业代理参与调峰辅助服务。对于独立参与的储能,规定调节容量不小于 2.5 MW·h,最大充放电功率不小于 5 MW^[18]。受益于政策支持,国网华北分部建立源网荷储协调调控平台^[20],实现了储能独立参与调峰辅助服务。目前,已有国网电动汽车公司代理的 4 家储能参与华北调峰,向电网提供兆瓦级的新能源消纳空间。

2.3 省市层面

2.3.1 BESS 参与调频

山西、广东、福建、江苏^[21-24]等地明确了 BESS 参与调频服务的规定,其准入要求与交易价格归纳如表 2 所示。

表 2 典型地区 BESS 参与调频服务政策
Table 2 Policies for BESS participating in frequency modulation in typical areas

地区	准入要求	交易价格
山西	独立参与:容量不小于 15 MW/0.25 h,持续充放电 15 min;以上联合参与:机组额定容量 3%或 9 MW 及以上,持续充放电 15 min 以上	初期申报价格为 12~20 元/MW,后调整至 5~10 元/MW
广东	容量不小于 2 MW/0.5 h	调频里程补偿报价 6~15 元/MW;容量补偿按照是否参与现货能量市场另算
福建	容量不小于 10 MW	调频里程报价上限 12 元/MW;容量补偿:240 元/MW(华东网调),960 元/MW(省市调度)
江苏	容量不小于 10 MW/2 h	BESS 若申报参与市场,则参照市场最高成交价出清

其中,广东、福建率先采用容量补偿与里程补偿结合的结算方式。里程补偿在报价范围内由市场出清决定;容量补偿按照定额补偿的方式,由调频容量、服务时长与补偿单价共同决定。对于同时参与广东调频市场与现货能量市场的 BESS 可享受容量补偿,福建省的容量补偿单价则因 BESS 受调度管辖范围不同而有所差别。

2.3.2 储能参与调峰

已有十余省份出台了储能参与调峰服务的规定,绝大多数省份对调峰的容量要求为不小于 10 MW/40 MW·h(个别地区为 10 MW/20 MW·h),而

交易模式和交易价格各不相同,有的省份存在 2 种及以上的交易模式,如表 3 所示。

表 3 典型地区 BESS 参与调峰服务政策
Table 3 Policies for BESS participating in peak modulation in typical areas

交易模式	代表省份	交易价格
火储联合深度调峰	广东、福建、河南、安徽、山西、甘肃、宁夏、新疆、贵州、重庆等多地	采用“阶梯式”报价方式,限定报价上限
电网调用调峰	山西	0.4 元/(kW·h)
	广东	0.5 元/(kW·h)
	新疆	发电侧 0.55 元/(kW·h)
调峰竞价交易	青海	0.7 元/(kW·h)
	甘肃	0.1~0.2 元/(kW·h)
与新能源企业双边协商交易	青海	未明确规定
	宁夏	0.1~0.2 元/(kW·h)
启停调峰	江苏	BESS 不参与报价

由表 3 可知,现阶段 BESS 参与调峰的方式大致有:(1) 与火电机组联合深度调峰,该方式最为常见,几乎已发文省份均有涉及;(2) 电网调用调峰,BESS 接受调度指令进行充电获得调峰补偿,其中青海的调峰补偿暂定为 0.7 元/(kW·h)^[25],新疆规定发电侧的调峰补偿为 0.55 元/(kW·h)^[26];(3) 调峰竞价交易,BESS 根据市场需求通过交易平台完成报价及出清,以甘肃^[27]、青海为代表;(4) 与风电场、太阳能电站开展双边交易,协商确定交易价格、交易时段等内容,由电力调度机构进行安全校核后确认,以宁夏^[28]为代表;(5) 启停调峰,以江苏为代表,BESS 不参与报价,基础充电量、补偿系数由相关部门核定。

3 BESS 参与调峰调频补偿机制

3.1 国内外 BESS 调频补偿机制概述

3.1.1 美欧 BESS 调频补偿机制

美国电力市场调频原本为单一制的容量补偿,发电机组和 BESS 提供相同调频容量获得相同补偿,无法体现 BESS 的调频性能优势,不利于市场发展。因此,FERC 于 2011 年将调频补偿机制由单一制变为考虑调频性能指标的两部制补偿,增加了调频里程补偿,其补偿公式可以描述为:

$$R_c = CP_c A_c \quad (1)$$

$$R_m = MP_m A_m \quad (2)$$

式中: R_c, R_m 分别为调频容量收益和里程收益; C, M 分别为调频容量和调频里程,其中调频里程为 BESS 实际提供的上下调节量; P_c, P_m 分别为容量单价和

里程单价; A_c, A_m 为性能指标, 主要表征其跟踪自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 信号的能力, 如果在容量收益或里程收益中考核调频性能, 则 A_c 与 A_m 为考核指标计算实际值, 否则取 1。由式(1)和式(2)可知, 引入两部制补偿后, 调频里程和调频性能对收益影响很大, 若调频性能指标恶劣, 则原本固定的容量收益也会降低, 调频性能好的机组有更大可能中标, 从而促进调频资源的优化配置。

在 FERC 的指导下, 美国主要区域电力市场均制定了调频补偿方案, 以宾夕法尼亚-新泽西-马利兰州 (PJM)、加州 (CAISO)、新英格兰 (ISO-NE) 为例, 调频里程和调频性能指标的对比简述见表 4。

表 4 美国主要电力市场调频补偿机制

Table 4 Frequency modulation compensation schemes among major electricity markets in USA

区域	调频里程	调频性能指标
PJM	指令里程	在容量收益和里程收益中均体现, 为精确度、相关性和延迟系数的加权平均
CAISO	基于实际里程修正	仅在里程收益中体现, 考虑精度, 向上调频和向下调频分开计算
ISO-NE	实际里程	仅在容量收益中体现, 与储能无响应的时长占总时长的比例有关

除美国外, 欧洲各国也针对 BESS 参与调频采取了更加积极的举措。欧洲频率控制储备市场 (FCR) 已实现多国互连, 2019 年 7 月, 其竞价方式由每周拍卖改为每日拍卖, 为 BESS 参与创造更大灵活性, 对提供秒级调频服务的 BESS, 将竞拍价格放宽到 6~10 欧元/(MW·h), 促进了 BESS 在整个欧洲电力市场的发展。

3.1.2 我国 BESS 调频补偿机制

现阶段 BESS 参与 AGC 调频的价格补偿机制与常规发电机组一致, 大体上可分为以调节容量为基数的日补偿机制和容量补偿与里程补偿相结合的交易周期补偿机制。

(1) 以调节容量为基数的日补偿机制, 以京津唐电网、山西电网为代表。《京津唐电网调频辅助服务市场运营规则(试行)》规定, 以机组为单位进行综合调频, 每次综合调频性能指标为:

$$K_{p,i,j} = K_{1,i,j} K_{2,i,j} K_{3,i,j} \quad (3)$$

式中: $K_{1,i,j}, K_{2,i,j}, K_{3,i,j}$ 分别为衡量机组 i 第 j 次实际调节速率指标、精度指标和响应速度指标。3 个指标的最大值均为 2。以日为周期, 根据机组调用次数, 可计算机组的综合调频性能指标平均值 K_{pd} , 进一步可计算日调频服务费用 C_{tp} :

$$C_{tp} = D(\ln K_{pd} + 1) B_{AGC} \quad (4)$$

式中: D 为调节深度, 是当日 AGC 调频量的总和;

B_{AGC} 为出清边际价格。

《山西电力调频辅助服务市场运营细则》计算综合调频性能指标方法类似, 不同之处在于山西电网依据供应商 i 的历史调频性能将 K_{pd} 进行归一化处理, 得到历史调频性能指标 $\lambda(K_{pd,i})$, 再将各供应商的申报价格除以历史调频性能指标, 得到其真实排序价格 C_i :

$$C_i = \frac{C_{i,R}}{\lambda(K_{pd,i})} \quad (5)$$

式中: $C_{i,R}$ 为供应商 i 的申报价格。最后根据 C_i 进行出清得到边际价格 B_{AGC} , 即可计算补偿费用。

(2) 容量补偿与里程补偿相结合的交易周期补偿机制, 以广东、福建为代表。《广东调频辅助服务市场交易规则》中规定, 调频市场补偿费用分为调频里程补偿和容量补偿。只有在广东调频市场中标发电单元可获得相应调频里程补偿费用, 所有提供合格 AGC 服务的发电单元均可获得相应容量补偿费用。

对于调频里程补偿, 按日统计, 按月进行结算, 其月度调频里程补偿 R_{lc} 计算公式为:

$$R_{lc} = \sum_{i=1}^n D_i Q_i K_i \quad (6)$$

式中: n 为交易周期数; D_i 为发电单元第 i 个交易周期提供的调频里程; Q_i 为第 i 个交易周期的里程结算价格; K_i 为第 i 个交易周期的综合调频性能指标。

对于容量补偿, 所有提供合格 AGC 调频的发电单元均可获得容量补偿费用。发电单元 AGC 容量为其在当前出力点 5 min 内向上可调容量与向下可调容量之和。容量补偿计算公式如下:

$$R_{cl} = \sum_{j=1}^m C_j T_j s \quad (7)$$

式中: m 为每月总调度时段数; C_j 为该发电单元在第 j 个调度时段的发电单元 AGC 容量; T_j 为该发电单元在第 j 个调度时段的调频服务时长; s 为 AGC 容量补偿标准。

3.2 BESS 调峰补偿机制概述

结合 2.3.2 节, BESS 参与调峰辅助服务的方式大致分为深度调峰、启停调峰、双边交易、竞价交易、电网调用等。由于各地 BESS 参与调峰的方式不同, 各种方式的补偿价格与当地调峰需求侧重点及政策密切相关, 无法一概而论。在众多省份中, 青海建立了较为完整的 BESS 调峰交易机制, 其辅助服务市场运营规则规定, 调峰交易市场采用优先双边协商交易, 再市场竞价, 余量单边出清的模式, 其调峰机制如图 2 所示。

由于青海面临新能源消纳压力, 因此鼓励 BESS

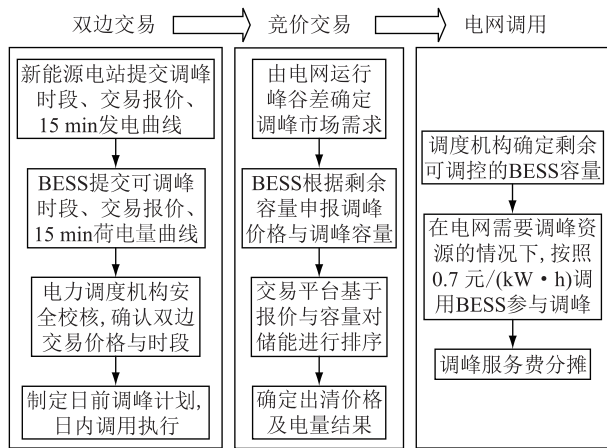


图2 青海省 BESS 参与调峰机制

Fig.2 Mechanism for BESS participating in peak modulation in Qinghai province

优先与新能源电站开展双边协商交易,即 BESS 在获得峰谷价差收入的同时,还可通过与存在弃风、弃光(通常与低谷电价时段有重叠)的电站开展双边合作获得额外补偿,风电、光伏减少弃风、弃光,实现双赢。双边交易补偿价格与消纳压力紧密相关,青海尚未明确规定,而东北、宁夏则规定补偿价格为 0.1~0.2 元/(kW·h)。对双边交易未成交或交易后仍有余量的 BESS 进一步开展市场竞价,首先根据电网峰谷运行情况计算调峰市场需求,BESS 根据市场需求在辅助服务平台提交包含交易时段、交易价格、交易电量等内容的交易意向,由电网调度机构进行安全校核后,通过市场化竞价出清。如果双边交易或竞价交易后 BESS 仍有剩余充电能力,在电网需要调峰资源的情况下,调度机构可按照 0.7 元/(kW·h)的调峰价格调用 BESS,对应的调峰服务费用由火电厂、水电厂、风电场、光伏电站共同分摊。

需要指出的是,在多数省份,目前 BESS 参与调峰并没有双边交易或竞价交易的规则,仍然以深度调峰为主。部分省份规定了 BESS 响应电网调用时调峰补偿价格,青海、新疆等消纳压力较大地区的调峰补偿标准已超过 BESS 自身度电成本(锂离子电池储能系统度电成本已降至约 0.5 元/(kW·h)),调峰收益可观。但同时,电网调峰的季节性特征使 BESS 利用小时数难以保障,多数地区由于补偿费用较低,BESS 参与调峰仍面临收益风险。

4 BESS 参与调峰调频辅助服务的建议

基于上述 BESS 参与调峰调频辅助服务的论述,简要分析现阶段 BESS 参与调峰调频辅助服务的问题,并提出如下建议:

(1) 完善 BESS 参与调峰调频差异化补偿机

制。对调频而言,现有的综合调频性能指标 K_p 源于传统火电厂调频,难以体现 BESS 的调频性能优势。经风光储工程测试,BESS 可在 1 s 内完成兆瓦级功率的高精度响应,因此调节速率 K_1 、调节精度 K_2 与响应速度 K_3 值均可达到上限值,BESS 难以得到差异化补偿。建议广泛推行两部制补偿机制,将调频里程和调频性能纳入补偿计算范围,科学确定里程补偿定价,现里程补偿属于政府统一定价,未来可参考 PJM 市场,设置里程调用率进行调整,待调频市场参与者逐渐丰富后,可参考 CAISO 市场的区别定价方式。同时,建议优化 BESS 调频性能指标计算方法,目前已有学者开展了 BESS 调频差异化补偿研究,针对计算指标趋同问题,整定调频指标评价方法^[11],区分 BESS 和常规电源之间的性能差异。

对调峰而言,目前多数省份的调峰补偿低于 BESS 度电成本和当地峰谷价差,新能源电站及第三方投资意愿、用户侧储能主动参与电网调峰的意愿均不足。因担忧大规模新能源并网后系统调峰资源不足,已有省份将配置储能作为新能源电站优先开发的重要条件,进一步增加了新能源电站的发电成本。建议适当放宽 BESS 与新能源企业双边交易的报价范围,提高电网调用调峰的补偿标准。

(2) 探索“共享储能”参与辅助服务的运营模式。由于各地调峰补贴政策不同,目前尚未形成区域级的调峰资源调配机制。随着新能源装机容量的持续攀升,区域级的调峰容量需求逐步增大。从经济性角度考虑,扩大调峰资源的配置范围必然会降低区域调峰总社会成本。受限于容量和成本,单个 BESS 作为调峰资源难以和其他灵活性资源竞争,但如果实现分散接入 BESS 的聚合调控,快速交易,则其调峰潜能将在区域级得到进一步释放。目前已有省份提出共享储能的理念,采用区块链技术,利用其智能合约和共识机制,完成多个 BESS 参与交易的智能研判、快速匹配。青海省针对市场化交易和电网调度建立了共享储能区块链平台,实现了新能源电厂和 BESS 的快速撮合交易,可针对性地缓解系统调峰压力和新能源消纳压力。经测算,该平台参与辅助服务应用未来可增加 23.5 亿元直接收益。此外,共享储能一定程度上能够缓解被广泛质疑的强制新能源发电企业配置储能的尴尬,符合新能源企业和电网的利益。

(3) 优化 BESS 参与调频的调控方案。目前 BESS 与常规调频电源采用完全相同的调度控制方式,交易标的未考虑调频里程,相同的调频容量对

应相同的补偿收益。未来辅助服务市场将呈现常规电源和规模化 BESS“多站融合”的运行模式, BESS 与常规电源之间、多个 BESS 之间存在调频资源优化调用问题。通过设置不同的控制信号, 实现 BESS 与常规调频电源的调控解耦。已有学者提出一种规模化 BESS 参与调频的调度策略, 在现有 AGC 调度体系中增加“储能调频辅助服务控制器”的思路^[29-32], 在调度层实现常规机组和 BESS 电站的功率解耦, BESS 之间根据供应商性能差异开展竞价交易, 发挥 BESS 在调频服务中的性能优势。

(4) 完善 BESS 参与辅助服务准入及评价标准。目前, 多数地区对 BESS 参与调峰调频的准入要求主要体现在容量和功率, 不同类型的 BESS 其运行特性与安全性不同。一些新能源电站为了尽早并网, 不得不以低成本为代价配置 BESS, 其中不乏电池或变流器以次充好的现象, 存在潜在风险。建议通过对已有 BESS 检测、运行、检修标准规程的研究, 完善 BESS 参与调峰调频的准入标准及评价标准, 保证参与调峰调频的 BESS 性能与安全要求。

5 结语

随着电力改革的深入, BESS 参与电力辅助服务的步伐也在加快。文中梳理了近年来 BESS 参与调峰调频辅助服务的政策要点, 并就 BESS 参与调峰调频辅助服务提出了建议。各地政策多数尚处于试行阶段, 还需多方面评估 BESS 参与调峰调频的特性, 进一步完善其政策支撑与补偿机制, 推动 BESS 在电网辅助服务中发挥更大的作用。

参考文献:

[1] 国家能源局. 2017 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[R]. 国家能源局官方网站, 2018.
National Energy Administration. National monitoring and evaluation report on renewable energy development in 2017[R]. Official Website of the National Energy Administration, 2018.

[2] EFTEKHARNEJAD SARA, VITAL VIJAY, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.

[3] 邵忠卫, 李国良, 刘文伟. 火电联合储能调频技术的研究与应用[J]. 山西电力, 2017(6): 62-66.
SHAO Zhongwei, LI Guoliang, LIU Wenwei. Research and application of thermal power combined energy storage frequency modulation technology[J]. Shanxi Electric Power, 2017(6): 62-66.

[4] 葛俊, 宋鹏, 刘汉民, 等. 新能源场站虚拟同步发电机技术研究及示范应用[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 39-47.
GE Jun, SONG Peng, LIU Hanmin, et al. New energy station virtual synchronous generator technology research and demonstra-

tion application[J]. Global Energy Internet, 2018, 1(1): 39-47.

[5] TSUCHIYA H. Sustainable energy strategy primarily involving renewable resources in Japan[M]//Sustainability through innovation in product life cycle design. Singapore: Springer Singapore, 2017.

[6] 朱继忠, 叶秋子, 邹金, 等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 1-9, 86.
ZHU Jizhong, YE Qiuzi, ZOU Jin. Short-term operation service mechanism of ancillary service in the UK electricity market and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 1-9, 86.

[7] 华北能监局. 京津唐电网调频辅助服务市场运营规则(试行)[Z]. 2018.
North China Energy Regulatory Bureau. Market operation rules for frequency modulation auxiliary service of Beijing-Tianjin-Tang power grid(trial)[Z]. 2018.

[8] 陈达鹏, 荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-9.
CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-9.

[9] 陈中飞, 荆朝霞, 陈达鹏, 等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 1-10.

[10] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2915-2922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2915-2922.

[11] 任晓朦. 考虑储能设备的 AGC 竞价市场研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
REN Xiaomeng. Research on AGC auction market considering energy storage devices[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[12] 巩宇, 王阳, 李智, 等. 光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 149-156.
GONG Yu, WANG Yang, LI Zhi, et al. Engineering application effect analysis and optimization of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 149-156.

[13] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(21): 1-9.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(21): 1-9.

[14] 国家能源局. 关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服

- 务补偿(市场)机制试点工作的通知[Z]. 2016.
National Energy Administration. Notice on promoting electric energy storage to participate in the pilot work of compensation (market) mechanism for electric power auxiliary services in "Sanbei" areas[Z]. 2016.
- [15] 国家发改委. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见[Z]. 2017.
National Development and Reform Commission. Guidance on promoting the development of energy storage technology and industry[Z]. 2017.
- [16] 国家能源局. 完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案[Z]. 2017.
National Energy Administration. Work plan of the compensation mechanism for auxiliary power services[Z]. 2017.
- [17] 南方能监局. 南方区域电化学储能电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则(试行)[Z]. 2017.
Southern Energy Regulatory Bureau. Implementation rules for operation management and auxiliary service management of electrochemical energy storage power stations in the southern region(trial)[Z]. 2017.
- [18] 华北能监局. 第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务试点市场规则(试行)[Z]. 2019.
North China Energy Regulatory Bureau. Rules for the pilot project of the third independent entities participating in the north China electricity peak modulation auxiliary service (trial) [Z]. 2019.
- [19] 东北能监局. 东北电力辅助服务市场运营规则(试行)[Z]. 2018.
Northeast China Energy Regulatory Bureau. Northeast electric power auxiliary service market operation rules(trial)[Z]. 2018.
- [20] 沙立成, 郇凯翔, 刘辉. 北京电网源网荷储协调调度控制模式研究[J]. 农村电气化, 2019(8):18-20.
SHA Licheng, HUAN Kaixiang, LIU Hui. Research related to network source load store coordination dispatching control mode in Beijing power network[J]. Rural Electrification, 2019 (8):18-20.
- [21] 山西能监办. 关于鼓励电储能参与山西省调峰调频辅助服务的通知[Z]. 2017.
Shanxi Energy Regulatory Bureau. Notice on encouraging electric energy storage to participate in the auxiliary services of peak and frequency modulation in Shanxi[Z]. 2017.
- [22] 南方能监局. 广东调频辅助服务市场交易规则(试行)[Z]. 2018.
Southern Energy Regulatory Bureau. Trading rules of Guangdong FM auxiliary service market(trial)[Z]. 2018.
- [23] 福建能监办. 福建省电力调频辅助服务市场交易规则(试行)(2019年修订版)[Z]. 2019.
Fujian Energy Regulatory Bureau. Trading rules of Fujian FM auxiliary service market(trial) (2019 revised)[Z]. 2019.
- [24] 江苏能监办. 江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则[Z]. 2019.
Jiangsu Energy Regulatory Bureau. Trading rules of Jiangsu FM auxiliary service market(trial)[Z]. 2019.
- [25] 西北能监局. 青海电力辅助服务市场运营规则(试行)[Z]. 2019.
Northwest Energy Regulatory Bureau. Operation rules of Qinghai electricity auxiliary service market(trial)[Z]. 2019.
- [26] 新疆能监办. 新疆电网发电侧储能管理办法[Z]. 2020.
Xinjiang Energy Regulatory Bureau. Rules of grid-side energy storage management in Xinjiang grid[Z]. 2020.
- [27] 甘肃能监办. 甘肃省电力辅助服务市场运营规则(试行)[Z]. 2018.
Gansu Energy Regulatory Bureau. Operation rules of Gansu electricity auxiliary service market(trial)[Z]. 2019.
- [28] 西北能监局. 宁夏电力辅助服务市场运营规则(试行)[Z]. 2018.
Northwest Energy Regulatory Bureau. Operation rules of Ningxia electricity auxiliary service market(trial)[Z]. 2018.
- [29] 屠聪为, 曹军, 于东立, 等. 基于空调负荷的虚拟储能参与调频的控制策略[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1):16-21.
TU Congwei, CAO Jun, YU Dongli, et al. Control strategy of virtual energy storage system participating in frequency modulation based on air conditioning loads[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):16-21.
- [30] 曹敏, 徐杰彦, 巨健, 等. 用户侧储能设备参与电网辅助服务的技术经济性分析[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1):52-55.
CAO Min, XU Jieyan, JU Jian, et al. Technical and economic analysis of user side energy storage equipment participating in power grid ancillary services[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):52-55.
- [31] 潘福荣, 张建赟, 周子旺, 等. 用户侧电池储能系统的成本效益及投资风险分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(5):43-49.
PAN Furong, ZHANG Jianyun, ZHOU Ziwan, et al. Cost-benefit and investment risk analysis of user-side battery energy storage system[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5):43-49.
- [32] 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.
CHEN Hao, JIA Yanbing, ZHENG Jin, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3606-3617.

作者简介:



张志

张志(1992),男,硕士,工程师,从事电网调度运行与控制研究(E-mail:hangzhi@sgcc.com.cn);

邵尹池(1991),男,硕士,工程师,从事分布式光伏及储能并网与运行研究;

伦涛(1977),男,硕士,高级工程师,从事电网调度运行与控制研究。

(下转第84页)