

国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示

孙冰莹¹, 杨水丽², 刘宗歧¹, 李婷婷³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192;

3. 华能北京热电有限责任公司, 北京市 100023)

摘要: 储能技术作为人类社会从化石能源时代迈入清洁低碳能源时代的推动技术, 在大规模间歇性新能源并网引发的区域频率稳定性控制问题背景下, 以其灵敏精准的出力特性逐步在电力系统调频领域实现规模化应用。全球有近 20 个国家在建或投运了共 164 项兆瓦级储能调频应用项目, 涉及发电端、输配环节和需求侧。本文通过对兆瓦级储能调频项目概况进行统计分析应用现状, 重点针对选型因素分析不同类型储能与调频相关的参数特点; 从已应用的 4 种储能调频运行模式出发, 分析应用区域现有的与其模式相关的政策与市场需求; 基于国内外调频辅助服务市场现状调研, 分析调频服务不同计量方法、政策规则对储能调频商业化应用的影响。最后, 结合上述研究结果从 3 个角度出发对如何促进中国储能调频商业化应用提出建议。

关键词: 兆瓦级储能; 频率调整; 运行模式; 辅助服务市场

0 引言

为减少碳足迹和保障能源安全, 世界各国着手制定后化石能源时代能源结构转型战略^[1-3], 因而快速发展的电力系统中可再生能源比例逐步提高。随着新能源发电的高比例渗透, 传统发电机组占比减少, 电网面临调频资源减少, 频率特性日益恶化的结构性困境, 调频容量不足的问题凸显^[4-5], 寻求新型调频手段辅佐传统机组提升电网整体调频能力成为研究热点^[6-7]。储能系统具有快速响应、精确跟踪与优异功率—频率特性, 在电网调频领域应用备受业界关注^[8-10]。

调频辅助服务为全球规模化储能示范项目开展最多的三个应用领域之一^[11], 近年迅猛发展。同时储能在电网调频辅助服务领域应用最接近商业化运营^[12-14]。美国、德国、英国及中国等依据各自能源结构特性、市场需求及政策激励机制等, 积极开展与推动储能在调频领域示范应用及研究。兆瓦级储能调频示范工程已由 2014 年的近 50 项发展至当前的 160 余项, 涉及类型由电化学储能、物理储能拓展至相变储能、氢储能, 渗入发电、配电和用电环节。

随着规模化储能调频示范工程广泛开展, 各国

调频市场需求特点、储能选型、储能调频的市场介入形式等决定性因素将衍生的投资方式, 以及示范应用与研究关键技术点, 成为各界关注的焦点。

本文目的在于从若干角度, 梳理国内外规模化储能调频示范项目基本概况、运行模式及影响因素, 对储能调频示范项目处于领先地位的国家进行市场规则调研, 为中国相关项目投资与运作提供决策依据及建议, 促进储能在电网调频领域的商业化应用。

1 国内外兆瓦级储能调频示范工程基本概况

根据容量规模 (rated power) 和服务/应用场景 (service/use case) 对美国能源局 (Department of Energy, DOE) 全球储能项目数据库^[15] 截止到 2016 年 10 月 31 日的统计数据进行了筛选, 所得除抽水蓄能外应用于电力系统调频的兆瓦级储能工程共计 164 项, 其中包括已声明/签约/在建项目。

将上述兆瓦级调频储能分为物理储能、电化学储能、电磁储能、氢储能和相变储能。物理储能包括飞轮储能、压缩空气储能、液态空气储能、重力储能。根据统计可得上述调频储能工程技术类型基本构成情况如图 1 所示。

由图 1(a) 可知, 兆瓦级储能调频工程中, 物理储能项目数少、单项容量大, 电化学储能项目数逾百、单项容量小, 氢储能、相变储能的调频规模应用则显稀少。此外, 综合图 1(a), (b), (c) 可知, 项目

收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-03-18。

上网日期: 2017-04-18。

国家自然科学基金资助项目(51507160); 国家电网公司科技项目“兆瓦级电池储能提供电网调频应用后评估技术”。

数最多的电化学储能中锂离子电池占据全部电化学储能调频项目 73%，物理储能装机容量接近全部兆瓦级调频储能容量 50%，以飞轮储能、压缩空气储能项目数居多。

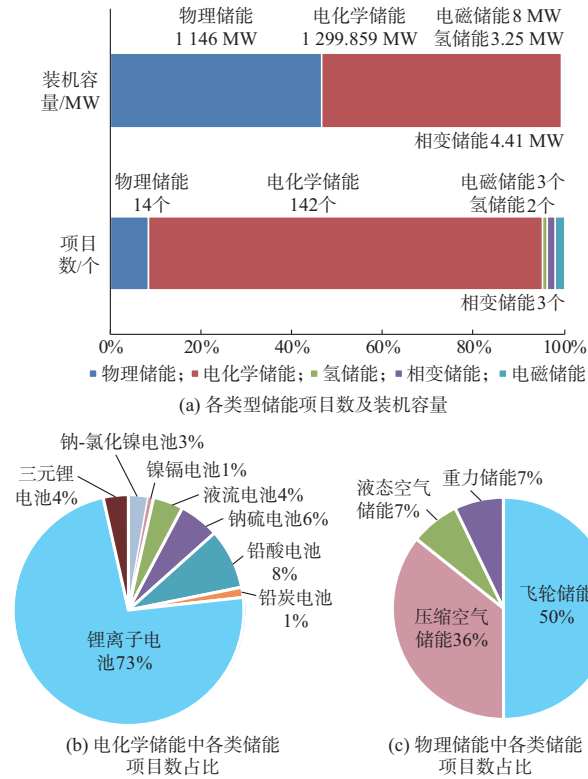


图 1 兆瓦级储能调频工程类型基本构成
Fig.1 Category structure of frequency control-applied megawatt-scale energy storage projects

兆瓦级储能调频项目数及容量在各地区分布情况如附录 A 图 A1 所示。其中美国兆瓦级储能调频项目数和装机容量均以显著优势领跑，意大利、德国、英国近几年有较快发展趋势，韩国和日本相关项目于 2015—2016 年受到重视，中国则每年以平稳速度推进示范应用。

2 国内外兆瓦级储能调频示范工程应用概况

2.1 各技术类型储能调频示范工程

为分析实际调频项目中储能类型结构变化趋势，将前述 164 项工程数据按投运时间统计为 2014 年前、2014 年至 2016 年之间、2016 年后三个时期。同时为了解电化学储能子类结构，将全部储能划分为物理储能、锂系电池储能、非锂系电池储能、超级电容器、相变储能和氢储能，再进行二级结构剖分得到图 2。图中：其他锂离子电池指 DOE 统计资料未给明具体类型的锂离子电池；百分比有舍入误差。

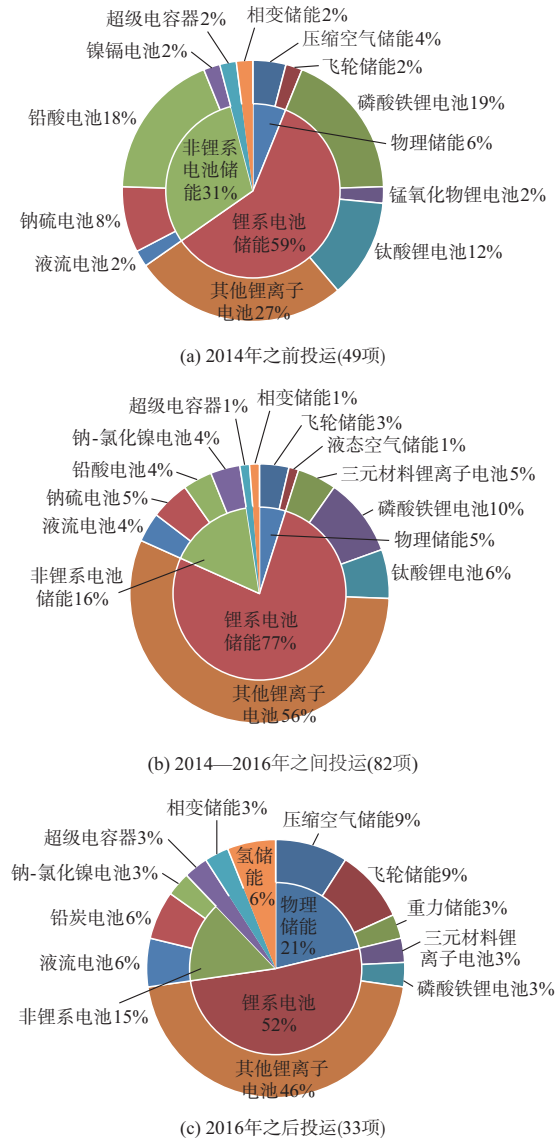


图 2 兆瓦级储能调频工程具体类型结构图
Fig.2 Detail category structure of megawatt-scale energy storage projects applied in frequency control

1) 锂系电池为兆瓦级储能调频应用主流类型，三个时期分别占据全部项目数 59%，77%，52%，其中钛酸锂、磷酸铁锂电池在 2014 年之前占据锂离子电池调频项目半壁，随后三元材料锂电池兴起。

2) 非锂系电池的钠硫、铅酸电池在该类调频用储能中具有前期优势，2014 年之后二者新投项目比重开始减少；同时铅炭电池、钠-氯化镍电池储能涉入调频，未来投运项目比重分别占据 6% 和 3%；近年液流电池比重则有所上升，未来投运项目占 6%。

3) 储能技术类型呈多元趋势。未来重力储能、氢储能等新兴储能技术将在调频服务领域崭露头角。

为探究调频储能类型结构呈上述特点及趋势原因,需分析储能技术特点、调频服务所考虑选型因素。

2.2 兆瓦级储能调频应用选型因素

一次调频为机组调速器及负荷特性自发吸收电网高频低幅负荷波动以减少频率变化,时间尺度为秒级至分钟级,二次调频即自动发电控制(AGC)调频由机组跟踪 AGC 指令以平抑区域控制偏差,时

间尺度为分钟级。因此储能系统提供频率调节服务时,充放时间短且次数多,属于功率型应用,对循环寿命及短时功率吞吐能力要求较高。

其中 AGC 调频要求调频源进行快速功率爬坡以较大出力迅速跟踪 AGC 指令,因此电池类储能需具备高倍率特性。此外,还需考虑储能安全性、功率密度、成本、转换效率等特点。表 1 列出已应用于调频的几类储能上述相关参数及特点^[16-19]。

表 1 调频应用储能的参数及特点
Table 1 Parameters and traits of energy storage in frequency regulation application

储能类型	循环寿命	倍率特性	安全性	功率密度及成本	转换效率
磷酸铁锂电池	2 000~5 000 次	2C	安全性较高	1 500~2 000 W/kg, 1 600 元/(kW·h), 3 200 元/kW	85%~96%
钛酸锂电池	2 000~10 000 次	5C	安全性超高,不易爆不易燃	3 000 W/kg, 9 000 元/kW, 4 500 元/(kW·h)	85%~96%
三元锂离子电池	2 000~10 000 次	1C	安全性较高	1 000 W/kg, 1 100~1 800 元/kW	90%以上
钠硫电池	<2 500 次	0.2C	需高温熔解钠硫,存在隐患	16 W/kg, 1 300 元/kW, 2 300 元/(kW·h)	70%~85%
全钒液流电池	10 000~13 000 次	1.4C	水基性电解液可减少 温升,安全性高	80~120 mA/cm ² , 12 500~15 000 元/kW, 2 500~3 000 元/(kW·h)	70%~75%
铅炭电池	2 000~4 000 次	2C	安全性高	150~500 W/kg, 1 000 元/(kW·h)	75%~90%
飞轮储能	10 000~100 000 次	—	安全性高	180~1 800 W/kg, 22 000~70 000 元/kW	85%~90%
非补燃压缩空气储能	>10 000 次	—	压力裕度足够时安全 系数高,隐患小	0.5~2 W/L, 3 000 元/kW	48%~52%

结合表 1 及资料文献,磷酸铁锂电池技术成熟,但批次稳定性及低温性能缺陷^[20]使得电池组较单体循环寿命有所折扣。钛酸锂电池具有高倍率特性,前景较广。三元锂离子电池可根据需求调制正极材料,一致性好且循环寿命不逊于锂离子电池,在调频领域兴起。钠硫电池倍率特性差,运行时需高温溶解钠硫,安全隐患堪忧,投运放缓。

液流电池虽然成本高昂且自放电率较高^[21],但上万次循环寿命仍吸引项目投运。铅炭电池属电容型改性铅酸电池,即在铅酸电池负极引入高电容活性炭材料,改善循环寿命和功率密度。

飞轮储能充放电次数几乎不受限,现有兆瓦级调频项目少归因于高昂成本。压缩空气储能单位造价与抽水蓄能相近,与其相比,非补燃型压缩空气储能则可实现零碳充放^[22]。

综上所述,具备关键性能优势的锂离子电池未来一段时间仍将是调频用储能首选。此外,随着改性电池如铅炭电池及新型储能的关键材料研发和批量生产,其成本降低,商业化调频应用也将逐步扩大。

3 国内外兆瓦级储能调频运行模式

3.1 国内外兆瓦级储能调频运行模式分类

储能调频渗入发电端、输配环节、需求侧,依运营商需求协同配套电源或独立并网提供调频辅助服务,按运行模式分为以下四类。

1) 辅助传统电源调频

储能系统装设在发电厂以辅助单台或多台火电机组参与 AGC 调频,在调节延时、超调、反调等情况下执行不同充放策略^[23]改善目标机组 AGC 性能。二者动作时机整定配合应避免能量对冲,技术实现取决于依据调节效果及补偿机制设计的指令分配方法和能量管理策略。

2) 依托大规模新能源参与调频

大规模风光并网辅设储能进行波动平抑实现高比例消纳,储能系统通常可多功能切换,包括响应调度指令跟踪^[24]参与调频,以实现能量的就地存储周转,提高能源系统运行效率和可靠性。

3) 输配环节独立并网调频

储能作为独立主体不依托于其他能源,从输配环节特别是配电网独立并网调频,减少调节区域控制偏差时供受区域间联络线损耗并缓解拥塞。该

模式下先行拟定储能并网技术标准、规范拓扑结构尤为重要,各级调度机构需对区域网络功率流及可能的运行方式变化预想决策并及时调整。

4)需求侧分布式储能集群调频

分布式储能集群协调控制以用户-控制中心之间交互信息流为基础,联接多个户用储能集成虚拟储能系统参与频率控制服务,通过家庭能量管理策略^[25]提高运行效率及虚拟集容量储能系统的调频可用率。

3.2 国外兆瓦级储能调频市场需求与运行模式选择

部分国家和地区在上述4种运行模式下兆瓦级储能调频项目分布如图3所示。资料中未指出并网环节的项目未计入其中。

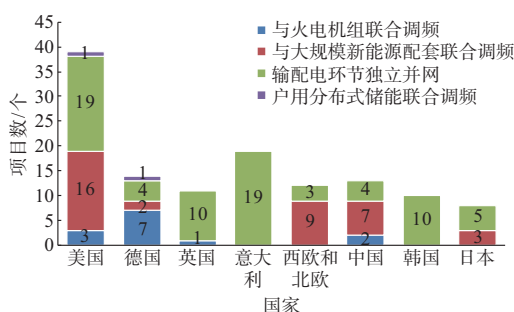


图3 部分国家和地区各运行模式兆瓦级储能调频项目分布

Fig.3 Numbers of megawatt-scale storage projects with distinct regulation modes in several regions

由图3纵向比较,输配环节储能独立并网、依托大规模新能源调频应用地域分布最广,辅助传统电源调频次之。分布式储能集群调频仅美国、德国已投运兆瓦级项目。

横向比较,美国和德国的储能调频运行模式应用全面覆盖且项目较多。国内除分布式储能调频外,其余运行模式均有兆瓦级示范项目。英国、意大利、韩国和日本以储能从输配环节独立并网为重,西欧、北欧则以配套新能源模式为主。

1)美国

为公允地反映不同电源调频性能价值和贡献度,美国联邦能源监管委员会(FERC)755号法规^[26]顶层市场规则设计要求区域市场出台计及效果的AGC辅助服务补偿机制,将考虑性能的里程(MW-Mileage)报价与容量报价结合为两部制报价。调频性能劣势的燃煤机组综合报价经效果评价算法调整后排序价格不具优势,或撤出调频市场投标容量或增资建设高性能机组,致使辅助服务收入减少或固定成本增加。而现有机组加装兆瓦级储能系统辅助调频改善性能,可增加投标竞争力同时节

省建设投资。由上述,AGC市场电源需求结构变化激励发电端储能引入,图3中美国火电机组建设储能以改善AGC性能相关项目建设仅次于德国。

美国摒弃以往不计效果仅考虑容量的AGC服务补偿机制,具备里程优势的电量受限电源如电池储能与具备容量优势的爬坡受限电源如火电之间AGC收益由两部制调衡,激励飞轮、电池储能投资商等以独立个体进入AGC市场,政策不公性壁垒撤除后电量受限储能收益预期增加引发储能市场需求,图3中美国输配环节独立并网储能项目占全部项目50%。

2)德国

德国计划2020和2050年分别将清洁能源占全部发电能源比重提至35%和80%^[27],频率稳定维护与实时能量平衡难度相应增加。其次,德国电力市场平衡单元机制要求发电商严格追踪合同负荷否则支付不平衡罚金。市场环境与技术现状迫使发电商寻求实时电量交易、优化机组减少跟踪偏差,相当数量的储能项目引入发电端,图3所示德国辅助火电机组调频模式下储能项目为全球最多。

随着家庭屋顶光伏推广,德国分布式电源并网补贴减少,供需时段错峰使各户消纳电量仅占耗电量30%^[28]。2013年德国复兴信贷银行实行配套储能补贴,预计2018年户用光伏-储能发电成本价与居民电价持平。需求侧分布式储能项目SWARM^[29]将65户20kW光伏储能联接成虚拟储能系统,参与频率控制,所得收入在居民和运营商之间分配,同时各户光伏消纳电量对家庭耗电量占比提高到60%~80%。

3)英国

与德国能源转型进程相似,英国将分批关停占发电设施20%的老旧火电机组并增加30%~36%新能源电量^[30]。英国与德国调频市场自由化程度不一,但均实行平衡单元机制,对优质调频源的市场需求具有相似之处。

英国把眼光投向输配环节储能电站并网提供频率控制服务,图3中该运行模式下技术论证与试点项目达10项,以测试电网在储能从输配环节并网后的新特性。例如:威伦霍尔变电站接入2MW/1MW·h钛酸锂电池储能,研究配网能量多向注入对功率需求与电能质量的影响,监测储能不同并网方式下的运行状态以建立可靠性评估方法并起草并网标准。

4)其他欧洲国家

图3所示西欧和北欧国家主要为储能依托大规模新能源调频。荷兰、丹麦等欧洲国家风光资源丰

富,同时为响应欧盟委员会《2030年气候与能源政策框架》^[31]增强能源安全性、产业竞争性、可持续性的政策,逐步提高风光渗透率。风光场储能设备切换至跟踪系统调频指令功能,可将电网波动影响由能量时移转换为实时供需平衡的补充。

5) 日本和韩国

根据 DOE 资料统计,日本和韩国兆瓦级储能多从变电站并网独立调频,该运行模式可降低发电设备磨损,就近需求侧平衡供需差异也可减少因调节区域控制偏差所致区域间联络线损耗,缓解线路拥塞。

3.3 国内兆瓦级储能调频运行模式选择

1) 储能辅助传统电源调频。山西京玉电厂改造火电机组控制器后装设 9 MW 锂离子电池储能系统,响应电网 AGC 调度 ACE 模式投入运行,储能供应商与电厂分享 AGC 补偿增量收益。

2) 依托大规模新能源调频。张北风光储输示范基地、国电和风电北镇风电场储能依托大规模风光电源响应调度参与调频运行,已积累较全面的运行数据。

3) 输配环节并网独立调频。深圳宝清储能电站为世界首个 10 kV 无变压器直挂配电网的钛酸锂电池储能系统,调度控制中心通过储能监控系统调节储能站出力以满足系统调频需求。

国内开展除需求侧外各运行模式的兆瓦级储能调频试点及初步商业项目,探究适合国内 AGC 辅助服务需求及符合市场规则的盈利及运行模式,暂未实现商业市场化。未来随着辅助服务市场建设和完善、储能作为独立主体的收益或补偿方式明确、调度机构经验累积,国内储能调频将由试点示范、初级商用逐步扩大商业化规模并扩展运行模式。

3.4 小结

储能作为主体参与商业调频在美国因其市场环境发展而趋于完善且运行模式全面,德国、英国则因其出台的强制性平衡机制助力储能调频在发电端与传统机组相结合。其他欧洲国家则受能源结构变革驱动为在稳定电网运行前提下消纳高比例新能源而引导储能参与调频。国内则开展除需求侧外的三种运行模式下储能调频项目,处于示范性或初级商业阶段。

综上所述,受市场激励、政策导向或技术需求影响,全球各国储能调频市场的商业化进程不一而运行模式多元。储能调频不同运行模式的技术要求、市场或政策环境、典型项目总结如表 2 所示。

表 2 储能调频运行模式特点
Table 2 Features in regulation operating modes of energy storage

储能调频运行模式	技术要求	市场或政策环境	典型示范项目
辅助火电机组	储能与机组间指令分配策略设计及响应周期整定配合	激励性:考虑效果的服务计量	美国 79.2 MVA 热电厂 20 MW/20 MW·h 锂离子电池项目
		强制性:平衡结算机制	德国 STEAG 6 个热电联产燃煤电厂的 15 MW 锂离子电池项目;英国 Kilroot 燃煤电厂 10 MW 锂离子电池项目
依托大规模新能源	大规模风电和光伏场配套储能多种功能的切换与协调控制策略	能源结构转型对新能源消纳及多功能应用要求	荷兰 4 MW/4 MW·h 锂离子电池依托阿姆斯特丹球场光伏电站
输配环节并网	网络中功率多向流动影响研究及并网拓扑等要求	制定储能作为独立主体的调频市场准入与服务计量规则	日本丰前变电站 50 MW/300 MW·h 钠硫电池项目;韩国 Kokam 共计 500 MW 锂离子电池分别从 9 个变电站并网
分布式储能集群控制	分布式用户与集控中心交互通信网建设,用户自我消纳与指令响应协调	储能并网补贴激励,自发电价与电网购价平价	德国 1.3 MW 电池 SWARM 项目;美国 2.01 MW/10.05 MW·h 储热项目

4 储能调频相关市场规则现状

4.1 美国

2012 年美国各独立系统运营商设计满足 FERC 要求的市场规则以量化各调频源性能,引入新的里程市场流程,制定效果评判方法和调频市场“容量+里程”两部制价格,在市场报价、排序、定价、结算环节中调整计量以重构不同性能电源的收益分配。

1) 宾州-新泽西-马里兰电力系统(PJM)

PJM 的效果得分(performance score, PS)加权

考核算法^[32]涵括准确度(accuracy)、时延(delay)、精确度(precision)得分。以 5 分钟为计算区间,首时刻调频源响应数据序列按一定间隔依次推延后与所接收 AGC 指令序列之间相关系数的最大值计为该时刻准确度系数,对应推延时间代入规则算式得时延系数;电源响应曲线与指令所差积分均值为精确度系数。每小时各系数均值计为该小时三项性能得分,加权求和为该小时段 PS。中标机组中里程最高报价为里程定价,边际机组两部总报价与里程价之差即容量定价。历史效果得分 HPS 用于排序时

机组报价调整、出清时两部定价调整和结算时实际容量与里程调整。

2016 上半年度 PJM 辅助服务市场报告^[33] 各类调频源调频占比、调整结算容量如附录 B 图 B1 所示。与 2015 同期相比,2016 上半年燃气机组计划调频占比与结算容量分别下降 1/2 和 1/3;储能电池调频占比与结算容量增长 1 倍,取代燃气机组成为 PJM 最大调频来源;2016 上半年 PJM 总调频费用 42 949 813 美元,较 2015 年同期减少 62.4%。受益于新设计考虑效果得分的调频准入规则与补偿办法,调频市场各主体自由角逐降低市场总容量采购成本,推动市场资源优化配置与结构调整。

2) 加州电力系统(CAISO)

CAISO 基于实时和历史数据对机组进行包括里程计算在内的准确度调整(accuracy adjustment, AA)代数算法^[34]。15 分钟计算区间内,以实时机组响应数据、AGC 指令偏差值与指令和的比值衡算准确度调整系数;由前一计量周的历史数据计算每小时的系统/机组里程倍增系数(mileage multiplier)。边际机组里程报价即里程定价,边际机组容量报价和机会成本确定容量定价。结算时中标机组里程补偿费用由实际里程、准确度、里程增倍数确定。

3) 纽约州电力系统(NYISO)

NYISO 设计效果追踪系统^[35](performance tracking system, PTS),5 分钟间隔记录正负控制偏差、机组服务时长和实际调频容量计算效果指标(performance index, PI),里程和容量定价方法与 CAISO 相同。根据 PI 值调整结算时里程服务费和向机组征收的效果调整费。

4) 中西部电力系统(MISO)

MISO 对 5 分钟间隔内机组期望里程与实际里程进行实时性能准确度测试^[36](performance accuracy test, PAT)确定精确度系数。实际里程/期望里程达到 70% 则测试合格且精确度系数计为 1,连续 4 个间隔未通过测试则计为 0。中标机组中里程最高报价即里程定价,机会成本和边际容量价确定为容量定价。结算时根据精确度系数补偿机组实际里程超出中标调频容量部分的额外里程费。

综合上述,美国引入里程市场后收益补偿激励和性能测试管理,驱动 AGC 市场储能商业规模扩大和运营效率提升。

4.2 德国

德国电力市场的电量平衡机制以虚拟的平衡结算单元为主体,日前、日内现货市场与多级调频辅助服务市场协同合作。调频辅助服务分为一次/二次/

三次调频控制。一次调频由欧洲输电运营商网络 ENTSO-E 统一操作,二次调频由各控制区输电系统运营商(TSO)直接控制^[37]。

平衡结算单元由多个发电商和供电商组成。每小时交付电量前,发电商和供电商将发电计划及需求预测递呈平衡结算单元。参与一次/二次频率控制的机组定期参与投标,提供两部分报价即容量报价和调用容量时的电量报价。TSO 根据机组容量报价递增排列选定机组,由电量报价递增排列决定调用顺序,按报价结算(pay as bid, PAB)。此外,市场要求频率控制服务商的一次、二次调频投标容量分别不小于 1 MW 和 5 MW,规范进入市场的储能主体,而电量受限型储能提供二次调频控制服务的成本和风险也相应增加。

德国平衡结算机制协同 TSO 管控的独立调频市场,由调频市场与电量市场的价格差异拉动发电侧对包括储能在内的多种电源建设投资。市场对电源调节效果不加区分进行补偿以及对投标容量的下限设置,一定程度上影响储能作为独立服务提供商参与调频的积极性。

4.3 英国

英国的频率响应辅助服务包括强制性/固定/需求侧频率响应三种^[38]。与德国相似,英国同样采用平衡结算机制,其电力市场双边交易和实时电量平衡以“关闸”作为分界,关闸前由双边合同完成 98% 的电量交易,强制性和需求侧频率响应即由双边合同完成。固定频率响应服务则在平衡服务市场招投标后,由服务商与电网公司的辅助服务业务部 ASB 签订辅助服务协议。机组动态响应频率变化时,由联营体支付未按计划发电的利润损失补偿和所签订辅助服务合同明确的服务补偿。

英国的传统调频辅助服务市场逐步完善,但储能提供调频服务的独立市场主体地位尚未明确,收益的不确定性难以吸引英国商用调频储能的投资建设,储能参与调频还处于前期验证阶段。

4.4 中国

国内调频辅助服务分为基本服务如一次调频和有偿服务如 AGC,由电网运营商和服务提供商在并网调度协议中协定。对火电机组和水电机组的辅助服务费用支付和结算实施考核补偿制。

2009 年华北区域电网对 AGC 机组调频性能,包括可用率和调节性能,进行月度考核和补偿。调节性能包括调节速率 K_1 ,调节精度 K_2 和响应时间 K_3 。可用率指标 K_A 小于 98% 时按定额确定可用率考核电量,对 K_1, K_2, K_3 则分项单独考核,按月结算总考核电量以征收各机组考核费用并向各发电

商按比例返还。同时根据机组日调节深度与调节性能指标确定补偿,按月结算并由各发电商按比例分摊。机组的辅助服务净收益为返还考核费、发放补偿费与征收考核费、分摊补偿费之差,性能越好的机组辅助服务净收益越高。

2016年 国家能源局下发《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》^[39],确立电储能在辅助服务市场主体地位,鼓励其在发电侧、需求侧参与调频辅助服务,并明确发电侧的电储能调频放电电量按发电厂相关合同电价结算,需求侧执行目录电价。同时要求能源局各区域监管局根据“按效果补偿原则”调整调频辅助服务计量公式。

国内对于独立的电储能装置作为常规可控设备参与 AGC 调频,调度机构还缺乏相当的经验。设计基于调频效果的合理服务计量方法,按实际贡献

补偿,激发优质调频源的积极性,成为推动我国储能调频商业化的前提。

4.5 小结

美国实时 AGC 竞价市场从准入到定价及结算均引入性能指标,对不同调频源的适用性较广。德国调频市场的定期投标竞价未限制电源种类,准入条件对容量受限型储能有所制约,同时补偿机制中效果指标的缺位容易造成储能与传统源的收益分配与实际贡献不对等。英国储能调频则处于前期验证阶段,尚未配套市场规则。国内则已明确储能发电与需求两侧的调频市场主体地位及价格机制的初步规则,但缺少适用于储能的服务计量方法,调度机构则缺乏电储能装置作为独立可控设备参与 AGC 调频的调度经验。

各国储能参与调频市场的服务类型、准入条件、交易方式、服务计量和定价机制等总结如表 3 所示。

表 3 储能调频相关市场规则比较
Table 3 Comparisons of market rules in frequency regulation of energy storage

国家	服务类型	准入条件	交易方式	服务计量	定价机制	商业化程度
美国	AGC	性能得分或测试达标	实时竞价	性能或里程计算+调用容量	传统电源和储能:1) 里程定价;中标机组中里程最高报价(PJM, MISO), 边际里程价(NYISO, CAISO);2) 容量定价: 边际总价-一里程定价(PJM), 边际容量报价+机会成本(MISO, NYISO, CAISO)	成熟
德国	一次/二次频率控制	一次投标容量≥1 MW 二次投标容量≥5 MW	定期竞价	调用容量+电量	传统电源和储能: 容量定价:PAB;电量定价:调用时价格	初期
英国	强制性/固定/需求侧频率响应	暂未获准	辅助服务合同	储能:—	传统电源:利润损失补偿+服务费 储能:—	前期验证
中国	AGC	发电侧与需求侧可引入电储能	并网调度协议	传统电源:考核补偿制 储能:—	传统电源:固定价格 储能:发电侧放电同发电厂电量,执行合同电价;需求侧按目录电价	初期

5 分析与启示

5.1 分析

由国内外兆瓦级储能调频项目与调频市场研究有以下分析。

1) 储能于未来电网调频技术的补充与支撑意义促使全球各国相继扩大项目投入和容量建设。不同类型储能的技术特性与经济性不一,而调频储能选型需要平衡具体服务技术需求与投资主体经济制约,因此服务商对调频用储能呈多元选择,但以成熟度高的锂离子电池为主流技术。

2) 兆瓦级储能调频运行模式的开展受各国能源结构转型战略与政策环境引导。发电侧储能联合火电调频适用于激励和强制型制度,不受初期储能服务计量办法空白的的影响。需求侧分布式储能集成调

频需实时监测数据及协调管理的集控中心承转支撑,涉及自消纳/外响应合理分配与用户信息安全,配套建设和调控监管难度稍大。

3) 储能调频商业化受市场开放程度、补贴与激励及计量定价方式等影响。电储能跟踪精准快速而容量有限,尤其对于独立储能运营商,仅靠服务容量或电量价格补偿力度较小且难以反映实际调节贡献,服务计量方法也需对应不同电源的调节质量与经济特性增强适用性。

5.2 启示

引导中国储能产业在调频领域健康发展,实现较高的商业化运营需协调各方力量。根据上述分析提出对中国储能调频商业应用初期的启示。

1) 政策制定者:根据国内外示范项目制定发电

侧与需求侧调频用储能的并网标准,同时给予服务商技术路线自主选择权;设计效果评价指标或方法时,可在调节速率和精度等指标外引入基于各调频源执行指令的有效性度量如实际里程;设计服务计量方法时,可兼顾不同电源的调节性能与成本差异,在参调容量/电量与实际效果指标之间加权制衡;统筹发电侧需求侧和未来可能的输配电侧并网电储能,为暂未推行的运行模式留取政策空间裕度。

2)市场参与者:储能运营商需综合考虑应用场景的频率调节需求及投资回报年限预期选择储能类型,在计量与获益方式暂未明确的市场环境下可先考虑储能-火电联合调频运行模式,依据现有补偿/考核机制与发电商实现互利共赢;电网运营商在规程允许前提下为储能供应商开放试验接入端口并提供协助,对用户侧储能调频模式下电网网络拓扑设计、线路敷设及节点计量等开展试验。

3)调度机构:综合服务质量、区域频率调节需求及运行成本对不同种类和不同侧电源调度次序和分配策略进行优化;对储能独立个体调度时机和区域调节功率分配可能性进行前期探索;需求侧分布式光伏-储能模式调度可引入用户自发电/自用电预测技术及超前控制对分布式储能荷电状态协调管理;对于暂未开放的输配电侧,依托前期试点项目研究储能就地平衡供需特性和对局部电网的稳定性影响。

6 结语

本文从兆瓦级储能调频应用项目的基本概况和类型构成出发,对调频用储能选型的技术需求进行分析,研究与调频应用相关的储能性能参数;根据应用工程对储能调频运行模式进行分类,分析比较部分国家相应运行模式的相关政策与市场需求;最后,分析国内外调频市场与储能相关的市场准入、服务计量、定价机制等规则,结合国内现状,从政策制定、市场主体、调度机构角度,为如何促进中国储能调频商业化应用提出建议。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] TSUCHIYA H. Sustainable energy strategy primarily involving renewable resources in Japan[M]. MATSUMOTO M, MASUI K, FUKUSHIGE S, et al. Sustainability through innovation in product life cycle design. Singapore: Springer Singapore, 2017: 565-582.

[2] PARK N B, KANG Y H, YUN C Y, et al. Survey on R&D demand of new and renewable energy resource maps in Korea

[J]. *New & Renewable Energy*, 2016, 12(S2):1-10.

[3] GONZÁLEZ P D R. Ten years of renewable electricity policies in Spain: an analysis of successive feed-in tariff reforms[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(8): 2917-2929.

[4] California Energy Storage Alliance. Energy storage—a cheaper, faster, & cleaner alternative to conventional frequency regulation[R]. California: Strategies for Clean Energy, 2011.

[5] 丁立,乔颖,鲁宗相,等.高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J].*电力系统自动化*, 2014, 38(14): 1-8. DOI:10.7500/AEPS20130810001.

DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(14): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20130810001.

[6] SHARMA S, HUANG S H, SARMA N D R. System inertial frequency response estimation and impact of renewable resources in ERCOT interconnection[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011: 1-6.

[7] WANG Y, SILVA V, LOPEZ-BOTET-ZULUETA M. Impact of high penetration of variable renewable generation on frequency dynamics in the continental Europe interconnected system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2015, 10(1): 10-16.

[8] 陈天宇,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.

CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, 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.

[9] 黄际元,李欣然,曹一家,等.面向电网调频应用的电池储能电源仿真模型[J].*电力系统自动化*, 2015, 39(18): 20-24. DOI: 10.7500/AEPS20141012002.

HUANG Jiyuan, LI Xinran, CAO Yijia, et al. Battery energy storage power supply simulation model for power grid frequency regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(18): 20-24. DOI: 10.7500/AEPS20141012002.

[10] 李建林,杨水丽,高凯.大规模储能系统辅助常规机组调频技术分析[J].*电力建设*, 2015, 36(5): 105-110.

LI Jianlin, YANG Shuili, GAO Kai. Frequency modulation technology for conventional units assisted by large scale energy storage system[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(5): 105-110.

[11] 胡娟,杨水丽,侯朝勇,等.规模化储能技术典型示范应用的现状分析与启示[J].*电网技术*, 2015, 39(4): 879-885.

HU Juan, YANG Shuili, HOU Chaoyong, et al. Present condition analysis on typical demonstration application of large-scale energy storage technology and its enlightenment [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 879-885.

[12] CHEN Y, LEONARD R, KEYSER M, et al. Development of performance-based two-part regulating reserve compensation on MISO energy and ancillary service market[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2015, 30(1): 142-155.

[13] HAUCAP J, HEIMESHOF U, JOVANOVIC D. Competition in Germany's minute reserve power market: an econometric analysis[J]. *The Energy Journal*, 2014, 35(2): 1-

- 62.
- [14] 任晓蒙.考虑储能设备的 AGC 竞价市场研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [15] DOE global energy storage database projects[EB/OL]. [2016-10-31]. <http://www.energystorageexchange.org/projects>.
- [16] 中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书 2016[EB/OL]. [2017-02-09]. <http://www.cbea.com/u/cms/www/201607/05104116j3gt.pdf>.
- [17] ADREES A, SONG J, MILANOVIC J V. The influence of different storage technologies on large power system frequency response [C]// IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, May 22-25, 2016, Hefei, China: 5p.
- [18] BEARDSALL J C, GOULD C A, AL-TAI M. Energy storage systems: a review of the technology and its application in power systems [C]// 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 1-4, 2015, Stoke on Trent, UK: 1-6.
- [19] 王伟东,仇卫华,丁倩倩,等.锂离子电池三元材料-工艺技术及生产应用[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [20] LIAN B, SIMS A, YU D, et al. Optimizing LiFePO₄ battery energy storage systems for frequency response in the UK system[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 385-394.
- [21] 张华民,王晓丽.全钒液流电池储能进展与应用[J].高科技与产业化,2016(4):63-67.
ZHANG Huamin, WANG Xiaoli. Progress and application of vanadium redox flow battery [J]. High-Technology and Industrialization, 2016(4): 63-67.
- [22] 薛小代,梅生伟,林其友,等.面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J].电网技术,2016,40(1):164-171.
XUE Xiaodai, MEI Shengwei, LIN Qiyu, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164-171.
- [23] 牛阳,张峰,张辉,等.提升火电机组 AGC 性能的混合储能优化控制与容量规划[J].电力系统自动化,2016,40(10):38-45. DOI:10.7500/AEPS20150724003.
NIU Yang, ZHANG Feng, ZHANG Hui, et al. Optimal control strategy and capacity planning of hybrid energy storage system for improving AGC performance of thermal power units [J].Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 38-45. DOI: 10.7500/AEPS20150724003.
- [24] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等.基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):30-36.DOI:10.7500/AEPS20140920009.
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-36. DOI: 10.7500/AEPS20140920009.
- [25] 王守相,孙智卿,刘喆.面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):108-113.DOI:10.7500/AEPS20140625016.
WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, LIU Zhe. Co-scheduling strategy of home energy for smart power utilization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 108-113. DOI: 10.7500/AEPS20140625016.
- [26] FERC Order 755[EB/OL]. [2016-10-31]. <http://www.ferc.gov/whats-new/commmeet/2011/102011/E-28.pdf>.
- [27] HÄSELER S. Procuring flexibility to support Germany's renewables: policy options [J]. Zeitschrift für Energiewirtschaft, 2014, 38(3): 151-162.
- [28] 王婷.德国——商业化的电能市场[J].商业文化,2015(33):68-71.
WANG Ting. Commercialized electric energy market of Germany[J]. Business Culture, 2015(33): 68-71.
- [29] STEBER D, BAZAN P, GERMAN R. SWARM—strategies for providing frequency containment reserve power with a distributed battery storage system [C]// 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), April 4-8, 2016, Leuven, Belgium.
- [30] National Grid. Electricity ten year statement[EB/OL]. [2016-11-31]. <http://www2.nationalgrid.com/UK/Industry-information/Future-of-Energy/Electricity-ten-year-statement/>.
- [31] EU Action. A 2030 framework for climate and energy policy [EB/OL]. [2013-01-06]. http://ec.europa.eu/environment/efe/themes/climate-action/2030-framework-climate-and-energy-policy_en.
- [32] PJM. Performance, mileage and the mileage ratio[EB/OL]. [2015-11-11]. <http://www.pjm.com/~media/committees-groups/task-forces/rmistf/20151111/20151111-item-05-performance-based-regulation-concepts.ashx>.
- [33] PJM. Ancillary service markets report[EB/OL]. [2016-08-11]. http://www.monitoringanalytics.com/reports/PJM_State_of_the_Market/2016/2016q2-som-pjm-sec10.pdf.
- [34] CAISO. Addendum draft final proposal-pay for performance regulation[EB/OL]. [2012-02-22]. http://www.caiso.com/Documents/Addendum-DraftFinalProposal-Pay_PerformanceRegulation.pdf.
- [35] NYISO. Performance tracking system[EB/OL]. [2012-05-19]. http://www.nyiso.com/public/webdocs/markets_operations/services/market_training/workshops_courses/ARCHIVE/Copy_of_ancillary31.pdf.
- [36] MISO. Frequency regulation compensation-market subcommittee [EB/OL]. [2012-12-04]. <https://www.misoenergy.org/Library/Repository/Meeting%20Material/Stakeholder/MSC/2012/20121204/20121204%20MSC%20Item%2005a%20Regulation%20Mileage.pdf>.
- [37] NABE C, NEUHOFF K. Intraday and real time activity of TSOs: Germany [J]. Econstor Research Reports, 2015, 11(3): A151-A152.
- [38] BELHOMME R, TROTIGNON M, CANTENOT J, et al. Overview of the electricity system market and service layers in France, UK and Germany[C]// 2016 International Conference on the European Energy Market, June 6-9, 2016, Porto, Portugal: 1-5.

(下转第 38 页 continued on page 38)

[39] 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[EB/OL].[2016-06-17].http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto92/201606/t20160617_2267.htm.

孙冰莹(1993—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:大规模储能应用技术。E-mail: sunby2015@163.com
杨水丽(1979—),女,硕士,工程师,主要研究方向:电能

存储与转换技术,大规模储能调频应用。E-mail: yangsl@epri.sgcc.com.cn

刘宗歧(1963—),男,博士,教授,主要研究方向:新能源发电与智能电网技术。E-mail: lzq@ncepu.edu.cn

(编辑 代长振)

Analysis on Present Application of Megawatt-scale Energy Storage in Frequency Regulation and Its Enlightenment

SUN Bingying¹, YANG Shuli², LIU Zongqi¹, LI Tingting³

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Huaneng Beijing Thermal Power Co. Ltd., Beijing 100023, China)

Abstract: As impetus to society from fossil fuel to low-carbon energy era, energy storage with swiftness and accuracy applies itself in frequency regulation in power system under the issue on frequency stability caused by large-scale intermittent resources integrating with power grid. Nowadays 164 projects of megawatt-scale energy storage in nearly 20 countries around the world is under construction or operation for frequency regulation, which penetrate into generation, transmission and distribution system as well as the demand side. Firstly through the statistical analysis in the category structure of known projects, this paper summarizes relevant parameters in storage selection. Secondly from existing operating modes, distinct technical requirements as well as related policies and market rules are analyzed. Thirdly based on status quo of regulation markets both at home and abroad, the measuring and settlement methods and policies for commercial application of storage in regulation are researched. Finally, suggestions on how to commercialize energy storage in regulation field in China are put forward.

This work is Supported by National Nature Science Foundation of China (No. 51507160) and State Grid Corporation of China.

Key words: megawatt-scale energy storage; frequency regulation; operating modes; ancillary services market