

储能技术经济性分析

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

张鸿宇, 王 宇

(清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084)

摘要: 储能是高比例可再生能源电力系统稳定安全运行的重要支撑技术之一, 中国调频辅助服务市场规则设计应考虑储能参与。本文概述了电网侧储能技术的调频现状, 并介绍了储能为电网提供调频辅助服务具备响应时间快、调度性能好的优势, 并以美国、澳大利亚和英国的调频辅助服务市场为案例, 介绍了储能调频的现状, 分析了国外典型调频辅助服务市场设定的适用于电网侧储能电站的规则, 包括电网侧储能电站作为市场主体参与调频辅助服务市场的市场准入门槛、参与方式和价格机制; 比较了不同电力市场对于电网侧储能参与调频辅助服务市场的设计的差异及其对储能参与调频辅助服务市场的影响。调研了我国电力市场建设现状, 通过对比分析了我国储能参与调频辅助服务市场存在大多数地区储能的主体地位不明确, 大部分允许储能参与的市场容量准入限制为世界典型国家限制的2倍或以上, 部分地区调频收益下限过低难以反映储能调频的容量价值等不足。参考国外经验, 在合适的机制设计下, 我国储能调频容量需求可超过6 GW, 调频辅助服务市场设计应明确赋予储能市场主体地位, 随市场建设和技术发展适时降低准入门槛使分布式小容量储能参与提供调频服务, 价格机制设计两部制价值以反映储能调频的容量价值并保障储能调频最低收益。

关键词: 储能; 电力市场; 市场机制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0370

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2021) 02-766-08

Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China

ZHANG Hongyu, WANG Yu

(Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Energy storage is one of the important technologies to support the stable operation of power system with high renewable proportion. The participation of energy storage technology should be considered in the mechanism design of frequency regulation market in China. This paper first summarizes the status of grid-side energy storage technology in frequency regulation. The grid-side energy storage has advantages on response time and output adjustment to provide frequency regulation service for power grid. The development status of storage that provide frequency regulation service, the foreign market mechanisms for grid-side storage participating in the market, including the market access threshold, competing method and price mechanism, are analyzed from the frequency regulation auxiliary

收稿日期: 2020-11-16; 修改稿日期: 2021-01-21。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (面向电网的储能应用市场机制及价值评估关键技术研究)。

第一作者: 张鸿宇 (1994—), 女, 博士研究生, 研究方向为能源系统

分析, E-mail: zhang-hy18@mails.tsinghua.edu.cn。通信作者: 王宇, 博士, 副研究员, 研究方向为能源系统分析, E-mail: y-wang@tsinghua.edu.cn。

service markets of the United States, Australia and the United Kingdom. The differences of the designs and their influences on energy storage participating the market are analyzed. Finally, based on our current situation, there are still some deficiencies and challenges in the design of energy storage participating in the China's frequency regulation market, including that most region do not definitely take storage as market member, the capacity access threshold of storage in most of the China's frequency regulation markets are twice or more than that in typical frequency regulation markets worldwide, and the lower limit of frequency regulation benefit is too low in certain regions to reflect the capacity value of storage. Based on the experience of foreign markets, frequency regulation could bring more than 6 GW needs for storage with suitable market mechanism design and thus storage should be the market member of frequency regulation market. The access threshold should be timely reduced in the design of China's frequency regulation auxiliary service market along with the development of market and technology to allow the participant of small distributed storage. The price mechanism should consider the two-part payment to reflect the capacity value of storage in frequency regulation and guarantee the minimum payment for storage.

Key words: energy storage; power market; market mechanism

电力储能技术是通过化学或物理方法,在电力供应富裕的时候将电能存储起来,并在需要的时候释放电能。长期以来,储能技术在电力系统中发挥着调节电力供需平衡、维持电网稳定运行的作用,而随着风电和光伏发电等间歇性电源的快速发展,储能技术对电力系统的稳定和支撑作用越来越显著。截止2019年底,全球储能装机规模累计超过184 GW,其中抽水蓄能累计装机达到171 GW,电化学储能增长显著,装机规模累计超过9 GW^[1]。

在美国、澳大利亚、英国等国,储能已经是调频辅助服务市场的重要参与者。与国外相比,储能作为一种优质的调频资源,在我国提供调频服务还比较有限。而国内现有文献主要聚焦在储能在调频等领域的市场应用场景、商业模式和效益评估方面。文献[2-3]分析了不同电化学储能在电力系统中的适用性和电化学储能具备保障电力系统频率稳定等作用,文献[4-6]分析了国内外储能在调频等领域的市场应用情况,指出储能在调频领域具有很好的市场前景,文献[7-8]分别分析了储能参与辅助服务市场的商业模式提供调频服务、参与调频辅助服务市场是用户侧储能主要的商业模式之一,文献[9]构建了调频辅助服务市场下储能调度竞价策略并算例验证了该策略对于减少调频成本和延长电站调频时间的作用,文献[10-11]各自构建了储能在调频等领域的效益评估模型,文献[11]同时算例分析了火储

联合调频可带来经济效益。综上,现有文献对于储能参与调频辅助服务市场的市场机制分析较少,或对近年来部分市场对于储能参与的相关机制变化的跟踪和分析不足^[12]。

目前我国正处于电力市场改革的攻坚阶段,调频辅助服务市场建设正在起步,合理的市场机制设计有助于激励储能这一优质的调频资源提供服务,而国外典型调频辅助服务市场对于储能参与的成功设计及演变可以成为我国调频辅助服务市场设计的模板,对我国有借鉴价值。因此,有必要对储能参与调频市场的市场机制进行总结和分析。本文首先综述了电网侧储能技术的调频应用现状及优势;之后选取目前较成熟的美国、澳大利亚和英国的电力市场,梳理了国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的市场机制;最后结合国内情况,分析了我国储能调频需求及储能电站在试点地区的调频收益,总结国外经验对我国市场机制设计的启示并提出我国适合电网侧储能参与的调频辅助服务市场机制设计建议。

1 电网侧储能调频现状及优势

按照储能在电力系统中的应用环节不同,主要可以分为电源侧储能、电网侧储能和用户侧储能三类:电源侧储能可以平滑电源出力波动、辅助电源更好地跟踪调度指令;电网侧储能主要为电网提供

各种服务；用户侧储能可以帮助用户进行需求管理^[13-14]。目前，国内外对于电网侧储能尚没有统一定义，通常狭义的电网侧储能指建设在变电站内或专用站址、直接接入公用电网并提供服务的储能系统；而广义上接受电网统一调度、能为电网提供系统服务的储能均可纳入电网侧储能。广义的划分方式有利于各类储能为电网提供服务，从而形成开放竞争的市场^[7,12]。本文中电网侧储能关注的是广义划定的范围。

电网侧储能可以为电网提供多样的服务，其中调频辅助服务是在系统频率偏差超出了允许的范围时进行调节使其回归基准频率。电网侧储能在提供调频辅助服务方面具有如下优势：可以在短时间（几秒到几分钟）内，在无输出、满放电和满充电状态间自由转换，响应速度优于常规火电机组；可以在放电和充电状态之间切换，最高可以为系统提供两倍于自身容量的调节能力；还可以在非满负荷情况下经济运行^[11-12]。适合提供调频辅助服务的储能包括抽水蓄能、电化学储能、压缩空气储能和飞轮储能^[3,15]。根据美国能源部 (Department of

Energy, DOE)数据库的统计，目前提供调频辅助服务的储能装机达到56.2 GW，其中以抽水蓄能装机规模最大，65个项目总计53.3 GW，锂离子电池储能项目数最多，达到165个，装机1.3 GW^[16]。由此可见，除抽水蓄能外，电化学储能在提供调频服务方面发展迅猛。

2 国外电网侧储能电站参与辅助服务市场的机制经验

2.1 美国

确立储能设施的市场主体地位、制定合理的收益机制及结算和报告规则，美国通过一系列法令完善了储能参与辅助服务市场的过程（表1）^[17-18]。根据美国DOE数据库的统计，目前美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰 (Pennsylvania-New Jersey-Maryland, PJM) 市场中，提供调频辅助服务的在运储能装机规模超过110 MW，其中约80%采用锂离子电池^[16]。2018年，储能提供了美国PJM市场平均27%的调频服务，最高时可提供47%的调频服务^[19]。

表1 储能电站参与美国调频辅助服务市场的机制建设过程

Table 1 Mechanism construction process of storage station participating in American frequency regulation auxiliary service market

时间	法令	主要内容及进展
2007	890	赋予储能电站市场主体地位，允许其参与AGC(automatic generation control)调频服务
2011	755	按调频服务效果支付费用，制定储能提供调频服务的合理回报机制
2013	784	制定储能作为第三方提供辅助服务的结算和报告规则
2018	841	降低储能参与调频辅助服务市场门槛，允许储能在市场上提供其技术上能提供的服务。

美国各辅助服务市场的设计规则有相似之处也有差异，储能参与调频辅助服务市场需要符合当地电力市场的运行规则。美国各电力市场中，装机不小于0.1 MW的储能可以参与调频辅助服务市场，对于储能和电网的连接方式，市场规则中没有做出限制^[17]。此外，有些调频辅助服务市场要求参与的资源需要满足一定的性能指标^[20]。在PJM市场、加州电力市场和德州电力市场中，调频辅助服务市场均与电能量市场以总购买成本最小为目标共同出清，但在具体的出清和价格机制方面存在差异（表2）^[12, 20-26]。

美国PJM和加州调频辅助服务市场设立了容量和里程两部制价格，分别反映保留调频容量的价格和进行调频调整出力的价格^[20-21, 24]，体现了提供

调频服务的容量价值。同时，两个市场还设计了根据调频效果进行调整的机制^[12, 20-21]，储能设备由于响应时间快，调频准确度高，可以更容易在调频辅助服务市场中标并获得良好收益。此外，在加州实时调频辅助服务市场中，储能可以连续1 h放电的容量进行投标，也可选择调频能量控制按连续15 min放电的最大容量进行投标，却不能同时参与能量市场^[26]，选择能量调频控制使得一些功率容量较高但能量容量不足的储能设备可以以更大容量投标，利于发挥储能的容量价值。

2.2 澳大利亚

澳大利亚调频辅助服务市场可以分为调节调频和应急调频两大类，共8个市场（图1）。额定容量5 MW及以上的储能电站通过注册为辅助服务机组

表2 储能参与美国典型调频辅助服务市场规则对比

Table 2 Comparison of rules of energy storage participating in frequency regulation auxiliary service market in America

区域市场	调频方向	出清	价格机制	根据调频效果调整收益
PJM	不区分	日前市场（每小时）+ 实时市场（每5 min）	容量+里程	根据历史效果得分和效益因子对容量和效果报价进行调整。调频市场出清价格是最高的中标机组调整后的报价，调频市场效果出清价格为中标机组调整后最高的效果报价，调频市场容量出清价格为调频市场出清价格与调频市场效果出清价格之差。中标设备容量补偿由中标容量、容量价格、历史效果得分和效益因子确定，里程补偿由实际里程、效果得分、效益因子和效果价格确定
加州	向上调频、 向下调频	日前市场（每小时）+ 实时市场（每15 min）	容量+里程	中标设备的容量补偿由中标容量和边际容量价格确定，里程补偿由实际里程、准确度调整系数和里程倍增系数确定，其中准确度调整系数由15 min内调度指令之和、响应量与调度指令的偏差计算得到，运行日某一小时的里程倍增系数由前一周相应小时的实际运行数据计算得到
得州	向上调频+ 向下调频	日前市场（每小时）+ 调整阶段（需要时）	容量	—

后方可参与澳大利亚调频服务辅助市场，澳大利亚的市场规则中对于储能和电网的连接方式同样没有做出限制^[27-28]。根据美国 DOE 数据库的统计，目前澳大利亚参与调频的在运储能装机规模为110 MW，其中超过98%采用锂离子电池^[16]。由于具备非常出色的响应速度，以及向上、向下双向调节能力，储能电站已成为提供调频辅助服务的主力，同时大幅降低了辅助服务市场价格。例如 Hornsdale 储能电站的参与使得南澳调频辅助服务市场的价格降低了90%，电站也获得调频辅助服务市场所有收入的55%，实现了双赢^[29]。

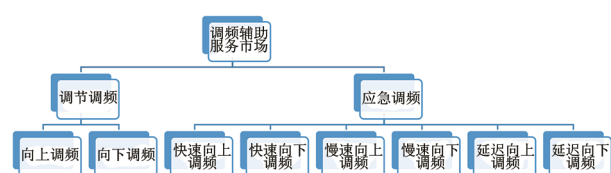


图1 澳大利亚调频辅助服务市场

Fig. 1 Frequency regulation auxiliary service market in Australia

储能参与调频辅助服务市场时，明确提供服务的价格，及每个价格下的容量和相关参数。调频辅助服务市场与现货市场同时出清，按总成本最小的原则决定实际调用的调频辅助服务，并确定出清价格。8个调频辅助服务市场有各自的出清价格，即各市场中标的最高报价。调频辅助服务按调度时段(5 min)进行结算，中标机组调频补偿由中标的调频辅助服务容量和对应调频市场的出清价格计算得出^[28]。

2.3 英国

在英国，储能仅通过英国国家电网公司组织的多月或月度招标市场参与固定频率响应，对于储能和电网的链接方式，市场规则中没有做出限制。英国调频辅助服务中，储能容量需不小于1 MW，且满足市场招标对设备性能的相关要求^[30]：10 s内响应持续20 s以上、30 s内响应持续30 min以上、10 s内响应可以无限持续。投标者可以对上述任何一种响应要求或要求组合进行投标，且需要在中标服务月前通过固定频率响应测试，储能单元可以针对未来一个月或者多个月时间段的服务进行投标，中标者需要按照相应时间提供调频容量，调频补偿包括可用费和响应能量费，可用费根据中标机组可用费投标价格和中标时长计算得到，响应能量费由响应能量投标价格和实际响应能量计算得出^[30-32]。目前，调频辅助服务已成为英国储能电站获取收益的主要来源。根据美国 DOE 数据库的统计，英国目前提供调频辅助服务的在运储能装机容量超过2000 MW，主要为一个抽水蓄能电站，锂离子电池储能装机为18 MW^[16]。

2.4 典型国家储能调频辅助服务市场规则对比分析

综上，各国设定的储能参与调频辅助服务的规则各不相同（表3）。准入门槛方面，美国对储能电站的容量要求最低，为0.1 MW，澳大利亚门槛最高，为5 MW。交易类型方面，由于市场组织形式不同，储能参与美国和澳大利亚的调频辅助服务市场是市场竞价，而在英国则通过投标获得辅助服务

合同来提供固定频率响应。价格机制方面,在美国和澳大利亚,储能参与调频辅助服务可以以较低的报价中标,但因为是以出清价格而非报价进行结算,因此将获得不错的收益。英国储能参与固定频率响应月度招标获得辅助服务合同后,按投标价格进行结算。此外,美国 PJM 市场和加州市场中两部制电价的设计体现了储能调频的容量价值,由于储能具有很好的调频性能,根据调频效果进行调整的设计也有利于激励储能参与调频辅助服务市场。

3 国内现状及面临的挑战

抽水蓄能电站是参与我国调频的重要资源,而电化学储能也开始探索参与调频。截止 2019 年底,我国抽水蓄能装机累计达到 30.3 GW, 电化学储能示范项目累计装机达到 1.7 GW^[9]。典型电化学储能项目包括江苏镇江 101 MW/202 MW·h 储能电站、河南合计 100 MW 的分布式储能电站、北京怀柔北房 5 MW/10 MW·h 储能电站、湖南长沙芙蓉

26 MW/52 MW·h 储能电站等^[33]。

为促进/鼓励储能技术的发展,中国已出台相关政策对储能参与电力市场做出规定。国家发展改革委、国家能源局在 2019 年 8 月发布的《关于深化电力现货市场建设试点工作的建议》中鼓励储能设施等第三方参与辅助服务市场^[34]。山西、广东、福建、江苏、甘肃等地也已明确储能可以独立参与调频辅助服务市场,但在具体的准入门槛、价格机制等方面的设计存在差异(表 4)^[35-40]。这些地区目前用于调频的在运储能电站还比较有限,其中抽水蓄能电站容量规模最大,包括山西的西龙池 1.2 GW 抽水蓄能电站、广东的广州 2.4 GW、惠州 2.45 GW、清远 1.28 GW 抽水蓄能电站以及福建的仙游 1.2 GW 抽水蓄能电站;但近年调频领域储能投资多倾向锂离子电池技术,包括山西多个 9 MW 火储联合调频试点和 2 个 150 MW 独立储能试点,广东数十个招标和在建储能电站,福建晋江 30 MW 储能电站,江苏镇江 101 MW 储能电站,

表 3 典型国家储能参与调频辅助服务市场规则对比

Table 3 Comparison of rules of energy storage participating in frequency regulation auxiliary service market in typical countries

国家	服务类型	准入条件	交易方式	定价机制	收益计算公式
美国	自动发电控制	0.1 MW, 且部分市场要求性能测试达标	市场竞争, 与电能量市场联合出清	根据调频市场报价, 按总成本最低原则出清, 确定调频市场出清价格; 其中 PJM 市场和加州市场设计了容量+里程两部制价格, 并考虑了机组调频效果	PJM 市场、加州市场: 调频收益=容量价格×调频性能指标×中标容量+里程价格×调频性能指标×实际里程 得州市场: 调频收益=里程价格×实际里程
澳大利亚	自动发电控制	5 MW	市场竞争, 与电能量市场联合出清	根据各类调频市场报价, 按总成本最低原则出清, 确定各调频市场出清价格	调频收益=里程价格×实际里程
英国	固定频率响应	1 MW, 通过固定频率响应测试	定期招标	根据投标价格确定	调频收益=投标容量价格×中标容量×服务时长+投标里程价格×实际里程

表 4 储能参与调频辅助市场规则对比

Table 4 Comparison of rules of energy storage participating in frequency regulation auxiliary service market

地区	山西	广东	福建	江苏	甘肃
准入门槛	独立: 15 MW 联合调频: 9 MW	2 MW	10 MW	10 MW	10 MW
价格机制	里程	里程	容量+里程	容量+里程	里程
根据调频效果调整收益	是 调频补偿=实际里程×调 节性能指标×里程价格	是 调频补偿=实际里程×调 节性能指标×里程价格	是 调频补偿=调频容量×投 运率×容量价格+实际里 程×调节性能指标×里程 价格×调节系数	是 调频补偿=调频容量×投 运率×调节性能指标×容 量价格+实际里程×调节 性能指标×里程价格	是 调频补偿=实际里程×调 节性能指标×里程价格

甘肃布隆吉 60 MW 储能电站等^[18,33,41-45]。以山西的火储联合调频项目为代表, 煤电机组与储能配合可以将调频性能指标值由平均 2.8 显著提升至平均 4.6 左右, 由此可大幅增加调频收益^[46]。

当前电网侧储能参与电力市场仍面临许多挑战。一是市场主体地位, 虽然一些省份、地区的电力市场允许储能参与提供调频服务, 但大部分省份地区对此没有明确规定或者明确排除了抽水蓄能电站参与电力市场, 因此储能的市场主体地位尚不明确。二是准入门槛, 不同地区对于储能参与市场的容量下限要求不同。目前, 大部分地区设置的储能参与电力市场准入门槛为 10 MW 以上, 是门槛最高的澳大利亚的 2 倍, 从而限制了小容量储能参与电力市场。三是价格机制, 允许储能参与的调频辅助服务市场大多设计了根据调频效果调整收益的机制, 但部分地区的价格机制设计中没有考虑容量补偿, 因而无法反映储能参与调频的容量价值。

4 国外经验对我国的启示

我国储能参与调频辅助服务尚处于探索阶段, 国外典型调频辅助服务市场对于储能参与的机制设计对我国有很好的借鉴意义。

首先, 需要以政策法规明确赋予储能独立参与调频辅助服务市场的市场主体地位, 消除储能参与调频辅助服务市场的障碍, 使储能可以和发电机组平等地参与市场竞争。美国等典型电力市场明确允许储能作为独立主体参与调频辅助服务市场, 保证了储能参与市场的资格。我国最大用电负荷接近 11 亿千瓦, 按最大负荷的 2% 作为调频容量需求, 若我国全国范围储能提供调频服务的比例达到美国 PJM 市场的水平, 由储能满足约 30% 的调频需求, 则储能调频容量需求超过 6 GW, 考虑到各储能技术的特点以及国内外近期的发展趋势, 新增的用于调频的储能技术上主要将采用锂离子电池技术。然而我国储能可以参与调频辅助服务市场的地区还十分有限, 储能作为优质的调频资源, 应扩大可以提供调频服务的地区。

其次在准入门槛方面, 较高的最低容量要求更方便市场出清计算及调度, 但限制了小容量储能参与调频辅助服务市场, 降低最低容量要求可以使分布式小容量的储能也参与到调频辅助服务市场, 可以一定程度上增加调频资源, 减少新增调频设备投

资。我国在电力市场建设初期可以参考澳大利亚设计相对高的储能装机准入门槛, 但应根据电力市场发展情况以及实际需求, 参考美国电力市场, 适时降低储能参与调频辅助服务市场的装机准入门槛。

最后在价格机制方面, 调频辅助服务市场价格机制应考虑到调频辅助服务提供者提供的辅助服务的效果差异和价值。我国储能可参与的调频辅助服务市场有考虑按调频效果付费, 但各省的具体设计存在差异, 还有部分市场没有考虑参与调频的容量价值。以 15 MW 的锂离子电池独立储能电站为例, 由于储能优异的调节性能, 其在各省辅助服务市场中的调频性能指标可接近上限, 如果按日调频里程 1000 MW、日调频时长 16 h、年调频天数 300 d 计算, 在福建、江苏的调频收益范围分别在每年 25 万~400 万元、50 万~380 万元, 在山西和广东由于有较高的里程报价下限, 收益范围分别大致为每年 1200 万~2400 万元、540 万~1350 万元, 但在同样没有考虑容量补偿的甘肃, 年收益下限仅约为 10 万元; 若按日调频里程降至 500 MW 计算, 仅考虑里程补偿的山西、广东和甘肃的调频收益直接减半, 但在设计了容量补偿的福建和江苏, 调频收益下限分别 25 万元和 40 万元, 下降幅度不大, 反映了调频的容量价值, 也一定程度上保证了储能调频的最低收益。因此, 在我国调频辅助服务市场建设过程中, 建议参考美国 PJM 和加州电力市场的两部制价格以及根据调频效果对价格进行调整的设计, 充分反映储能参与调频的容量价值。

5 结 论

我国调频辅助服务市场建设处于起步阶段, 储能参与有限, 但储能作为优质的调频资源, 未来可以成为调频辅助服务的主要提供者, 因此设计适合储能参与的调频辅助服务市场机制至关重要。论文研究结果表明: 调频辅助服务市场允许储能参与, 将可以在全国范围带来超过 6 GW 的储能调频需求, 如此大体量的调频储能必须明确其市场地位, 为储能提供调频服务提供保障。其次, 目前我国储能市场准入门槛偏高, 一定程度阻碍了小容量储能提供调频服务, 因此, 应适时降低储能的市场准入门槛。最后, 储能参与调频市场的价格机制设计方面必须考虑调频容量价值的两部制价格设计, 将使储能获得合理收益, 有助于推动储能积极参与调频

服务市场并促进储能的发展。

参考文献

- [1] 中关村储能产业技术联盟. 十年磨一剑,《储能产业研究白皮书 2020》利剑出鞘[EB/OL]. [2020-05-27]. https://mp.weixin.qq.com/s/VVBap5M9ghuHP_VYNJvb5Q
- [2] 裴哲义, 范高峰, 秦晓辉. 我国电力系统对大规模储能的需求分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1562-1565.
PEI Zheyi, FAN Gaofeng, QIN Xiaohui. Demand analysis of large scale energy storage in China's power system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1562-1565.
- [3] 孟祥飞, 庞秀岚, 崇峰, 等. 电化学储能在电网中的应用分析及展望[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 38-42.
MENG Xiangfei, PANG Xiulan, CHONG Feng, et al. Application analysis and prospect of electrochemical energy storage in power grid[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 38-42.
- [4] 刘冰, 张静, 李岱昕, 等. 储能在发电侧调峰调频服务中的应用现状和前景分析[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(6): 909-914.
LIU Bing, ZHANG Jing, LI Daixin, et al. Energy storage for peak shaving and frequency regulation in the front of meter: Progress and prospect[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(6): 909-914.
- [5] 时智勇. 国外储能电站应用分析及对我国的启示[J]. 能源, 2019(6): 79-82.
SHI Zhiyong. Application analysis of foreign energy storage power station and its enlightenment to China[J]. Energy, 2019(6): 79-82.
- [6] 李岱昕. 从CAISO和PJM区域电力市场, 看储能的能量型和功率型应用状况[J]. 电器工业, 2018(7): 41.
LI Daixin. Application status of energy-based and power-based energy storage from CAISO and PJM regional power market[J]. China Electrical Equipment Industry, 2018(7): 41.
- [7] 胡静, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 适应中国应用场景需求和政策环境的电网侧储能商业模式研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 367-375.
HU Jing, LI Qionghui, HUANG Bibin, et al. Business model research of energy storage on grid side adapted to application scenarios and policy environment in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 367-375.
- [8] 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.
LI Dezhi, TIAN Shiming, WANG Weifu, et al. Business model research and economic analysis of distributed energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 86-91.
- [9] 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.
- [10] 饶宇飞, 高泽, 杨水丽, 等. 大规模电池储能调频应用运行效益评估[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1828-1836.
RAO Yufei, GAO Ze, YANG Shuili, et al. Operational benefit evaluation for frequency regulation application of large-scale battery energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1828-1836.
- [11] 刘畅, 徐玉杰, 张静, 等. 储能经济性研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1084-1093.
LIU Chang, XU Yujie, ZHANG Jing, et al. Research progress in economic study of energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1084-1093.
- [12] 李建林, 李雅欣, 周喜超. 电网侧储能技术研究综述[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 77-84.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao. Summary of research on grid-side energy storage technology[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 77-84.
- [13] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16.
- [14] 周喜超. 电力储能技术发展现状及走向分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 7-12.
ZHOU Xichao. Development status and trend analysis of electric energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 7-12.
- [15] 钟海旺. 储能参与电力市场的机遇与挑战[EB/OL]. [2020-05-27]. <http://www.chinapower.com.cn/informationhyfx/20191018/1288064.html>.
- [16] 文贤旭, 张世海, 邓彤天, 等. 大容量电力储能调峰调频性能综述[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 487-492.
WEN Xianxui, ZHANG Shihai, DENG Tongtian, et al. A summary of large capacity power energy storage peak regulation and frequency adjustment performance[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6): 487-492.
- [17] DOE. DOE global energy storage database [EB/OL]. [2020-12-22] <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.
- [18] FERC. FERC issues final rule on electric storage participation in regional markets [EB/OL]. [2019-04-26]. <https://www.ferc.gov/media/news-releases/2018/2018-1/02-15-18-E-1.asp>.
- [19] 国家能源局. 美国推动储能参与电力市场的政策演进[EB/OL]. [2020-06-02]. <http://www.ocpe.com.cn/show-12748-lists-51.html>
- [20] PJM. Full committee hearing to examine expanded deployment of grid scale energy storage [EB/OL]. [2019-07-21]. https://www.energy.senate.gov/public/index.cfm/files/serve?File_id=08C06596-519A-42C9-BAB6-DC45E9166152.
- [21] PJM. Energy & ancillary services market operations [EB/OL]. [2019-09-03]. <https://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m11-redline.ashx?la=en>
- [22] CAISO. Business practice manual for market operations [EB/OL]. [2019-09-23]. https://bpmcm.caiso.com/BPM%20Document%20Library/Market%20Operations/BPM_for_Market%20Opera

- tions_V62_redline.pdf.
- [23] ERCOT. ERCOT nodal market guide v3.0 [EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.scribd.com/document/249467429/ERCOT-Nodal-Market-Guide-v3-0>.
- [24] CAISO. Business practice manual for market instruments [EB/OL]. [2019-09-27]. https://bpmcm.caiso.com/BPM%20Document%20Library/Market%20Instruments/BPM_for_Market%20Instruments_V55_redline.pdf.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] CAISO. PDR-DER-NGR summary comparison matrix [EB/OL]. [2019-09-24]. <http://www.caiso.com/Documents/Participation-Comparison-ProxyDemand-DistributedEnergy-Storage.pdf>.
- [28] 北极星电力网. 《世界各国电力市场综述》澳大利亚篇[EB/OL]. [2019-04-23]. <http://shoudian.bjx.com.cn/html/20160321/717794.shtml>.
- [29] AEMO. Guide to ancillary services in the national electricity market [EB/OL]. [2019-05-27]. <https://www.aemo.com.au/-/media/Files/PDF/Guide-to-Ancillary-Services-in-the-National-Electricity-Market.pdf>.
- [30] 张静. 2019年储能市场: 增速遇冷趋势不冷[EB/OL]. [2020-05-05]. <http://www.escn.com.cn/news/show-803046.html>.
- [31] NationalgridESO. Firm frequency response (FFR) [EB/OL]. [2019-09-26]. <https://www.nationalgrideso.com/balancing-services/frequency-response-services/firm-frequency-response-ffr>.
- [32] NationalgridESO. Firm frequency response (FFR) Market information report for Oct-19 [EB/OL]. [2019-09-11]. <https://www.nationalgrideso.com/document/151466/download>.
- [33] RENTON A, RUDD M, PARTRIDGE J, et al. The role of energy storage in the UK electricity system [EB/OL]. [2019-08-01]. <https://www.twobirds.com/~media/pdfs/news/bird--bird--the-role-of-energy-storage-in-the-uk-electricity-system.pdf?la=en>.
- [34] 集邦新能源网. 盘点国内7大电网侧储能项目最新动态[EB/OL]. [2020-05-27] <https://www.energytrend.cn/news/20190722-72781>.
- html.
- [35] 国家发展改革委. 《关于深化电力现货市场建设试点工作的意见》[EB/OL]. [2020-05-25]. <http://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=16253>.
- [37] 国家能源局山西监管办公室. 山西能源监管办关于印发《山西电力调频辅助服务市场运营细则》的通知[EB/OL]. [2020-12-21]. <http://sxb.nea.gov.cn/frontIndex/publicDirectory/showOffice.do?documentId=O4bb8d2cc74b148a9ac74c499594f1f9e>.
- [37] 北极星储能网. 山西省鼓励电储能参与调峰调频辅助服务电储能设施可作为独立主体[EB/OL]. [2020-12-21]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20171109/860694.shtml>.
- [38] 国家能源局江苏监管办公室. 关于印发《江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. [2020-12-22] <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-7/202073154200.htm>.
- [39] 南方能源监管局. 关于印发《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. [2020-12-22]. http://120.31.132.37:8085/SC-SERC_OUTER/temp/examples/upfileattch/71620229_wz_towaiwang.pdf.
- [40] 国家能源局福建监管办公室. 关于印发《福建省电力调频辅助服务市场交易规则(试行)(2019年修订版)》的通知[EB/OL]. [2020-12-22]. <http://fjb.nea.gov.cn/Upload/file/福建省能源监管办关于印发《福建省电力调频辅助服务市场交易规则》EF%BC%88试行%EF%BC%89%EF%BC%882019年修订版%EF%BC%89》的通知-15260321263.pdf>.
- [41] 国家能源局甘肃监管办公室. 关于印发《甘肃省电力辅助服务市场运营暂行规则》(2020年修订版)的通知[EB/OL]. [2020-12-22]. <http://gsb.nea.gov.cn/Upload/2020120164759.pdf>.
- [42] 国家能源局山西监管办公室. 调峰风光火消纳新能源山西省电储能全国领跑[EB/OL]. [2020-12-25]. <http://sxb.nea.gov.cn/admin-Content/initViewContent.do?pk=297edff863dd46330163dd55cfc90001>.
- [43] 中国储能网. 60兆瓦/240兆瓦时!甘肃网域大规模电池储能试验示范项目并网[EB/OL]. [2020-12-26]. <http://www.escn.com.cn/news/show-1094567.html>.
- [44] 中国储能网. 广东粤电靖海发电有限公司3#、4#机组储能调频项目招标[EB/OL]. [2020-12-26]. <http://escn.com.cn/news/show-1129562.html>.
- [45] 国务院国有资产监督管理委员会. 晋江储能电站获福建省首张独立储能电站发电业务许可证[EB/OL]. [2020-12-26]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588129/c14599516/content.html>.
- [46] 李建林. 储能调频关键技术与示范工程[EB/OL]. [2020-12-25]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20180723/914866.shtml>.