

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.10.006

电能量-调频联合市场中储能电站的参与策略分析

王元元^{1*}, 刘航航², 司君诚¹, 宋世航³, 蔡言斌¹

(1. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257091; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001;

3. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要:在“双碳”目标的背景下,如何完善市场机制以最大化发挥储能的作用值得深入探讨。以山东省电力现货市场规则为基础,构建含储能电站的电能量-调频辅助服务市场交易机制,并引入储能调频可用容量限制系数表征两市场间的耦合关系,建立含储能电站的现货电能量市场与调频辅助服务市场联合出清模型。以储能电站参与两市场的容量分配为依据构建不同策略,从电力市场购电成本、负荷曲线波动程度、储能自身收益三个方面选取和构建指标,对不同参与策略下储能的作用和自身收益情况进行分析。通过算例仿真,探讨了储能不同参与策略下作用发挥与收益变化的规律,表明随着可再生能源并网比例的提高,储能作为优质的调频资源去利用,更加有利于资源优化配置与系统运行,但应在电力市场规则中关注调频里程因子与调频报价等的合理设计。

关键词:储能电站;电力现货市场;电能量市场;调频辅助服务市场;参与策略

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2024)10-0055-12

Analysis on the Strategies of Energy Storage Stations Participating in the Electricity Energy-regulation Joint Market

WANG Yuanyuan^{1*}, LIU Hanghang², SI Juncheng¹, SONG Shihang³, CAI Yanbin¹

(1.State Grid Dongying Power Supply Company, Dongying 257091, China;

2.State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 3.Key Laboratory of Power System Intelligent

Dispatch and Control of Ministry of Education(Shandong University), Jinan 250061, China)

Abstract: In the context of carbon peaking and carbon neutrality goals, so how to improve market mechanism to maximize the value of energy storage is worth in-depth study. First, on the basis of Shandong electricity spot market rules, a trading mechanism of energy storage power stations participating in the energy and frequency regulation auxiliary services market is proposed, and the restrictive coefficient of available capacity for energy storage frequency regulation is introduced to characterize the coupling relationship between two markets. Therefore, the clearing model, which combines the energy market with frequency regulation auxiliary services market, is constructed. Then, based on the capacity allocation of energy storage in the two markets, different strategies are adopted and evaluating indexes are chosen from the perspective of the market cost, load curve fluctuation and energy storage's income, and further the role and income of energy storage are analyzed. Finally, an example simulation analysis is carried out, and the law of different participation strategies of energy storage on its role and income is presented, that indicates with the increase of the proportion of renewable energy connected to the grid, taking good use of energy storage as excellent frequency regulating resource is benefit to the allocation of resources and system operation. However, the designed mileage factor and regulating bidding should be well compatible with the electricity market trading rules.

Keywords: energy storage station; electricity spot market; energy market; regulating ancillary service market; participation strategy

基金项目:国网山东省电力公司科技项目“电力现货市场情境下的源网荷储协调互动技术研究及应用课题2含多类源网荷储资源的市场运行机制及验证技术研究”(52061620009L)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Research and Application on Coordination and Interaction Technology of Power Generation, Transmission, Loading and Storage on the Situation of Power Spot Market" Sub-project 2 "Research on Market Operation Mechanism and Verification Technology of Diversed Resource of Power Generation, Transmission, Loading and Storage"(52061620009L)。

0 引言

2020年,我国提出了“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的低碳能源转型战略。在“双碳”目标的背景下,以新能源为主体的新型电力系统已成为电力能源领域未来发展的新形态。我国新能源发电装机容量已初具规模,并继续保持着较高的增长率^[1-2]。具有间歇性和不确定性的光伏、风电等新能源的高比例接入,对电力系统的运行灵活性提出了更高的要求,储能在新电力系统中的作用日益受到关注^[3]。

作为提升电力系统运行灵活性的主要措施之一,储能与需求响应、火电机组灵活性改造等技术一起,正在快速发展^[4]。储能具有的快速响应、灵活充放电、控制精确等特点,使其在应对高比例新能源接入的挑战时具有突出的优势。随着我国电力市场建设的逐步推进,特别是电力现货市场建设试点的开展^[5],市场成为资源优化配置的首要手段,如何完善市场机制,激励储能更好地为电力系统运行发挥积极作用值得深入探讨。

根据储能参与电力市场主体地位的不同,可以分为厂站端储能、电网侧储能以及独立储能,即储能电站。厂站端储能通过与各类发电机组的互补作用提升厂站参与市场交易的总体效益。如文献[6]以马尔科夫决策过程分析风储联合参与电能量市场与调频辅助服务市场,有效提高了风储联合投标的收益。电网侧储能是系统运行调度优质的灵活性调节手段,最有利于实现对储能能量特性与功率特性的统筹利用^[7]。鉴于我国目前的输配电定价监管政策,电网侧储能的发展模式尚待探讨^[8]。随着新型电力系统建设的开展,储能电站受到广泛关注,日益发展壮大^[9-10]。储能电站参与电力现货市场的形式主要有两种:单一市场方式,即同一时段内储能仅参与现货电能量市场或辅助服务市场中的一个^[11-12];联合市场方式,即同一时段内储能同时参与现货电能量市场和辅助服务市场^[13]。鉴于储能的优势特点,储能参与辅助服务市场的交易品种以调频辅助服务为主。

为优化利用储能,市场机制的建设至关重要。储能参与现货市场,可采用电能量市场和调频辅助服务市场顺次出清机制或联合出清机制,二者均能

实现市场购电总成本最小的目标,但联合出清机制流程更简单^[14]。研究表明,电能量-调频-备用联合市场模式更有利于储能利润最大化与系统灵活性提升的平衡决策^[15];而加密交易频度,可更好地考虑储能荷电状态的实时变化与限制,实现对储能可调容量的充分利用^[11]。

在参与市场交易时,储能有不可忽视的利益追求和技术特性。其面临在不同模式市场下的策略性投标问题^[16],也受到邻日荷电状态对充放电计划制定的制约^[17]及电池寿命的影响等^[18]。

综上,储能全面参加电力现货市场是新型电力系统建设和电力市场改革的必然趋势,但现有研究仍存在问题:

1) 储能电站参与电力市场,在追求自身利益与满足电力系统运行需求之间,是否存在利益冲突以及如何协调二者间的平衡。

2) 电能量市场追求以交易周期为时间尺度的电量平衡,调频辅助服务市场追求实时的功率平衡,储能因其独特优点在两个市场上都可以发挥积极作用,如何参与市场或如何协调在不同市场的参与程度,能最大限度地发挥储能的作用。

针对上述问题,以山东电力现货市场实际为基础,建立储能电站参与现货电能量市场与调频辅助服务市场的仿真模型。通过建立储能作用与收益的综合指标,对储能在两市场不同参与策略下的作用与收益进行考核,探讨“双碳”目标下如何完善市场机制与储能交易规则,以兼顾电力系统需求与储能收益。

1 含储能电站的现货电能量-调频辅助服务联合市场模型

1.1 联合市场交易机制

山东省作为全国首批开展电力现货市场建设的试点地区之一,其市场建设实践备受业界关注^[19]。现阶段山东省电力现货市场由电能量市场与调频辅助服务市场两部分组成,二者依次协调出清,储能电站可以选择提交自调度计划参与电能量市场或参与调频辅助服务市场。以山东省电力市场规则为基础,并参考美国加利福尼亚州(California ISO, CAISO)、美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰(Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection, PJM)等国外电力市场规则,构建储能参与现货电能

量-调频辅助服务联合市场的机制与模型。

1)市场类型与市场主体。市场由现货电能量市场与调频辅助服务市场构成,均包含日前市场与实时市场两部分,出清方式为联合出清。市场主体包含火电机组、可再生能源机组、储能与电力用户。

2)交易标的。现货电能量市场以电能量为交易标的。调频辅助服务市场根据各参与主体的报价,通过集中式交易确定各参与主体的调频容量与调频里程。

3)储能参与电力市场的模式。在山东省电力市场规则基础上,扩大储能参与电力市场的范围与灵活性,允许储能以“报量报价”的方式同时参与现货电能量市场与调频辅助服务市场。

4)可再生能源机组参与电力市场的模式。鉴于可再生能源出力的不可控性,仅允许其参与电能量市场。并在山东省电能量市场规则的基础上,扩大可再生能源参与市场竞争的份额,将其参与市场竞争的比例由预测出力的10%调整为50%。

5)市场出清与结算。电能量市场以边际电价对各参与主体的中标功率结算。调频辅助服务市场调频容量、调频里程的出清价格为中标主体的最高申报价格,并依此对各参与主体的实际中标量结算。

1.2 联合出清模型

提出的储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的联合出清模型架构如图1所示。

1.2.1 目标函数

含储能的现货电能量-调频辅助服务市场联合

出清模型以电能量与调频辅助服务的购买总成本最小为目标函数,即

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{e=1}^E (b_{e,t}^{\text{dis}} P_{e,t}^{\text{dis}} - b_{e,t}^{\text{cha}} P_{e,t}^{\text{cha}}) + \sum_{g=1}^G b_{g,t} P_{g,t} + \sum_{r=1}^R b_{r,t}^{\text{Renew}} P_{r,t}^{\text{Market-Renew}} + \sum_{e=1}^E (b_{e,t}^{\text{cap,a}} P_{e,t}^{\text{cap}} + b_{e,t}^{\text{mile,a}} M_{e,t}^{\text{mile}}) + \sum_{g=1}^G (b_{g,t}^{\text{cap,a}} P_{g,t}^{\text{cap}} + b_{g,t}^{\text{mile,a}} M_{g,t}^{\text{mile}}) \right] \quad (1)$$

式中: T 为一个研究周期之内的总时段数; t 为时段; E 、 G 、 R 分别为储能、火电机组、可再生能源机组数; $b_{e,t}^{\text{dis}}$ 、 $b_{e,t}^{\text{cha}}$ 分别为第 e 台储能 t 时段在现货电能量市场申报的放电价格、充电价格; $b_{g,t}$ 、 $b_{r,t}^{\text{Renew}}$ 分别为第 g 台火电机组、第 r 台可再生能源机组 t 时段在现货电能量市场申报的电能量价格; $P_{e,t}^{\text{dis}}$ 和 $P_{e,t}^{\text{cha}}$ 分别为第 e 台储能 t 时段在现货电能量市场中标的放电功率、充电功率; $P_{g,t}$ 、 $P_{r,t}^{\text{Market-Renew}}$ 分别为第 g 台火电机组、第 r 台可再生能源机组 t 时段在现货电能量市场中标的发电功率; $b_{e,t}^{\text{cap,a}}$ 、 $b_{e,t}^{\text{mile,a}}$ 分别为经调整之后第 e 台储能 t 时段在调频辅助服务市场申报的调频容量价格、调频里程价格,由该主体原报价与历史调频性能之比得到; $b_{g,t}^{\text{cap,a}}$ 、 $b_{g,t}^{\text{mile,a}}$ 分别为经调整之后第 g 台火电机组 t 时段在调频辅助服务市场申报的调频容量价格、调频里程价格,由该主体原报价与历史调频性能之比得到; $P_{e,t}^{\text{cap}}$ 、 $M_{e,t}^{\text{mile}}$ 分别为第 e 台储能 t 时段在调频辅助服务市场中标的调频容量、调频里程; $P_{g,t}^{\text{cap}}$ 、 $M_{g,t}^{\text{mile}}$ 分别为第 g 台火电机组 t 时段在调频辅助服务市场中标的调频

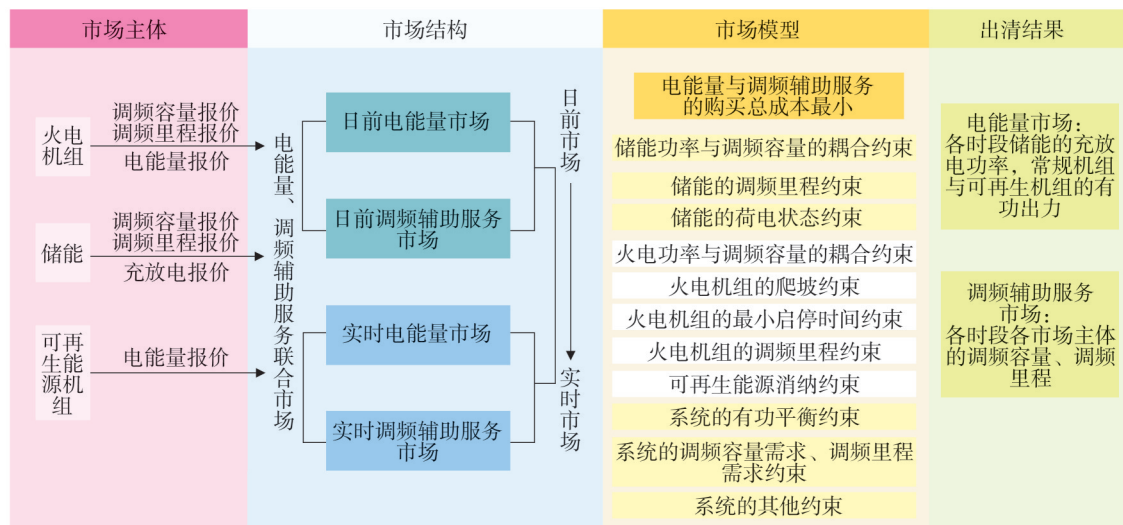


图1 含储能电站的联合市场出清模型架构

Fig.1 Framework of energy storage station participating in joint market clearing model

容量、调频里程。

1.2.2 约束条件

1) 系统约束为:

$$\sum_{e=1}^E (P_{e,t}^{\text{dis}} - P_{e,t}^{\text{cha}}) + \sum_{g=1}^G P_{g,t} + \sum_{r=1}^R P_{r,t}^{\text{Market-Renew}} + \sum_{r=1}^R P_{r,t}^{\text{Guarantee-Renew}} = P_t^{\text{D}} \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^E P_{e,t}^{\text{cap}} + \sum_{g=1}^G P_{g,t}^{\text{cap}} \geq P_t^{\text{Demand-cap}} \quad (3)$$

$$\sum_{e=1}^E M_{e,t}^{\text{mile}} + \sum_{g=1}^G M_{g,t}^{\text{mile}} \geq M_t^{\text{Demand-mile}} \quad (4)$$

式中: P_t^{D} 为 t 时段电力系统负荷的有功功率; $P_{r,t}^{\text{Guarantee-Renew}}$ 、 $P_{r,t}^{\text{Market-Renew}}$ 分别为第 r 台可再生能源机组 t 时段得到保障性消纳发电量与通过市场竞争中标的发电量; $P_t^{\text{Demand-cap}}$ 与 $M_t^{\text{Demand-mile}}$ 分别为 t 时段系统的调频容量需求值、调频里程需求值。

式(2)一式(4)分别为系统有功功率平衡约束、调频容量需求与调频里程需求约束。

2) 储能的约束为:

$$u_{e,t}^{\text{dis}}, u_{e,t}^{\text{cha}} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$0 \leq u_{e,t}^{\text{dis}} + u_{e,t}^{\text{cha}} \leq 1 \quad (6)$$

$$u_{e,t}^{\text{cha}} f_{\text{cap}}^{\text{join}} P_{e,t}^{\text{cap}} \leq P_{e,t}^{\text{cha}} \leq u_{e,t}^{\text{cha}} (P_e^{\text{max}} - f_{\text{cap}}^{\text{join}} P_{e,t}^{\text{cap}}) \quad (7)$$

$$u_{e,t}^{\text{dis}} f_{\text{cap}}^{\text{join}} P_{e,t}^{\text{cap}} \leq P_{e,t}^{\text{dis}} \leq u_{e,t}^{\text{dis}} (P_e^{\text{max}} - f_{\text{cap}}^{\text{join}} P_{e,t}^{\text{cap}}) \quad (8)$$

$$0 \leq P_{e,t}^{\text{cap}} \leq P_e^{\text{max}} \quad (9)$$

$$P_{e,t}^{\text{cap}} \leq M_{e,t}^{\text{mile}} \leq s_e^{\text{mile-cap}} P_{e,t}^{\text{cap}} \quad (10)$$

$$S_{e,t}^{\text{Soc}} = S_{e,t-1}^{\text{Soc}} + \frac{P_{e,t}^{\text{cha}} \eta_e - \frac{P_{e,t}^{\text{dis}}}{\eta_e}}{C_e^{\text{energy-cap}}} \quad (11)$$

$$S_{e,t}^{\text{SocMin}} \leq S_{e,t}^{\text{Soc}} \leq S_{e,t}^{\text{SocMax}} \quad (12)$$

$$S_{e,0}^{\text{Soc}} = S_{e,24}^{\text{Soc}} \quad (13)$$

式中: $u_{e,t}^{\text{cha}}$ 、 $u_{e,t}^{\text{dis}}$ 分别为第 e 台储能 t 时段在现货电能量市场的充放电标志, 取值为 1 表示处于对应的状态, 取值为 0 表示不处于对应的状态; P_e^{max} 为第 e 台储能的最大充放电功率; $s_e^{\text{mile-cap}}$ 为第 e 台储能的调频里程因子, 由电力交易中心设置, 反映该调频主体的单位调频容量可提供的最大调频里程; η_e 为第 e 台储能的充放电效率; $S_{e,t}^{\text{SocMin}}$ 、 $S_{e,t}^{\text{SocMax}}$ 、 $S_{e,t}^{\text{Soc}}$ 分别为第 e 台储能 t 时段的荷电状态及其设定的上限、下限; $C_e^{\text{energy-cap}}$ 为第 e 台储能的能量容量; $f_{\text{cap}}^{\text{join}}$ 为储能调频可用容量限制系数, 其越大表示对储能调频可用容量的限制程度越大。可通过调整此系数对储能可以参与调频市场的

容量进行设定, 以分析储能能在能量市场、调频辅助服务市场的参与程度对储能收益、效用发挥的影响, 这将在后续章节进行详细讨论。

式(5)一式(6)将储能划分为放电状态、充电状态、不充不放状态; 式(7)一式(9)为储能充放电功率与调频容量的耦合约束, 表示储能的充放电功率在满足自身功率限制的同时, 还应预留出上、下调频容量; 式(10)为储能中标的调频里程约束; 式(11)一式(13)为储能的荷电状态约束。

3) 火电机组约束为:

$$u_{g,t} (P_g^{\text{min}} + P_{g,t}^{\text{cap}}) \leq P_{g,t} \leq u_{g,t} (P_g^{\text{max}} - P_{g,t}^{\text{cap}}) \quad (14)$$

$$P_{g,t}^{\text{cap}} \leq M_{g,t}^{\text{mile}} \leq s_g^{\text{mile-cap}} P_{g,t}^{\text{cap}} \quad (15)$$

式中: $u_{g,t}$ 为第 g 台火电机组 t 时段的启停状态决策变量, 1 与 0 分别代表开机、关机状态; P_g^{min} 、 P_g^{max} 分别为第 g 台火电机组的最小、最大有功出力; $s_g^{\text{mile-cap}}$ 为第 g 台火电机组的调频里程因子。

由式(14)可见, 第 g 台火电机组的发电功率与调频容量间存在耦合约束, 两者之和受到机组最大、最小出力的限制; 式(15)为第 g 台火电机组中标的调频里程约束。火电机组的约束还包含机组最小启停时间约束、爬坡约束。

4) 可再生能源机组约束为:

$$0 \leq P_{r,t}^{\text{Market-Renew}} \leq (1 - s^{\text{Renew}}) P_{r,t}^{\text{Renew}} \quad (16)$$

$$P_{r,t}^{\text{Guarantee-Renew}} = s^{\text{Renew}} P_{r,t}^{\text{Renew}} \quad (17)$$

式中: s^{Renew} 为在电力交易中设置的可再生能源消纳系数, 取值范围为 $0 \leq s^{\text{Renew}} \leq 1$, 能够反映可再生能源消纳程度; $P_{r,t}^{\text{Renew}}$ 为可再生能源机组在 t 时段的出力预测值。

式(16)一式(17)表示可再生能源出力的保障性消纳与市场性竞争。

1.3 联合出清模型的线性化表达与求解方法

提出联合出清模型中关于储能、火电机组的功率与调频容量的耦合约束式(7)一式(8)、式(14)存在 0-1 变量与连续变量相乘的非线性项, 可根据文献[20-21]中 Big-M 线性化方法, 引入足够大的常数 M 进行线性化处理。储能充电功率与调频容量的耦合约束式(7)的线性化处理结果如式(18)所示。式(8)、式(14)的处理方式与式(7)的线性化处理类似。

$$\begin{cases} P_{e,t}^{cha} \geq f_{cap}^{join} P_{e,t}^{cap} - (1 - u_{e,t}^{cha}) M \\ P_{e,t}^{cha} \geq 0 \\ P_{e,t}^{cha} \leq P_e^{max} - f_{cap}^{join} P_{e,t}^{cap} \\ P_{e,t}^{cha} \leq u_{e,t}^{cha} M \end{cases} \quad (18)$$

含储能的现货电能量-调频辅助服务市场联合出清模型中的非线性部分通过 Big-M 法进行线性化处理之后,整个出清模型已转化为混合整数线性规划问题,可以在 MATLAB 2020a 中使用 Yalmip 工具箱进行编程描述,并调用商业求解器 Cplex 12.10.0 进行求解。

2 储能电站作用与收益的评价

储能通过参与电能量市场与调频辅助服务市场获得收益,同时可在系统运行中发挥平滑负荷曲线和降低购电成本的作用。但令储能自身利益最大化的充放电计划未必与系统安全经济运行的需求相一致。为此,本文从购电成本、负荷曲线波动程度、储能自身收益三个方面,构建和选取了相关指标,对储能的作用与自身收益情况进行量化评价。

2.1 储能对购电成本影响的评价指标

在设计的市场机制中,储能可以参加现货电能量市场与调频辅助服务市场,其作为新兴主体参与电力市场后,必然会影响市场的总购电成本。为分析储能对电能量市场与调频辅助服务市场运行经济性的不同影响,分别选取电能量市场与调频辅助服务市场的成本作为评价指标。

1) 现货电能量市场成本的评价指标。

$C_{S_i}^{energy}$ 为储能对电能量市场成本影响的评价指标,表示储能采取 S_i 参与策略时电能量市场的总购电成本,由电能量市场各时段各参与主体的电能量成本累加得到。计算方法如式(19),即目标函数式(1)的前半部分,为

$$C_{S_i}^{energy} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{e=1}^E (b_{e,t}^{dis} P_{e,t}^{dis} - b_{e,t}^{cha} P_{e,t}^{cha}) + \sum_{g=1}^G b_{g,t} P_{g,t} + \sum_{r=1}^R b_{r,t}^{Renew} P_{r,t}^{Market-Renew} \right] \quad (19)$$

2) 调频辅助服务市场成本的评价指标。

$C_{S_i}^{frequency}$ 为储能采取 S_i 参与策略时调频辅助服务市场的总成本,由调频市场各时段各参与主体的调频容量、调频里程成本累加得到,并将其作为储能对调频辅助服务市场成本影响的评价指标。计算方法

如式(20)所示,即目标函数式(1)的后半部分,为

$$C_{S_i}^{frequency} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{e=1}^E (b_{e,t}^{cap,a} P_{e,t}^{cap} + b_{e,t}^{mile,a} M_{e,t}^{mile}) + \sum_{g=1}^G (b_{g,t}^{cap,a} P_{g,t}^{cap} + b_{g,t}^{mile,a} M_{g,t}^{mile}) \right] \quad (20)$$

2.2 储能平滑负荷作用的评价指标

储能可以通过自身的充放电行为调节电力供需,表现为负荷曲线变平滑,波动程度减轻。 $F_{S_i}^{load}$ 为储能采取 S_i 参与策略时负荷曲线的波动程度,其值越大,反映负荷曲线波动越大,反之则负荷曲线的波动越小。即为

$$F_{S_i}^{load} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [(P_{S_i,t} - P_{S_i,e,t}^{dis} + P_{S_i,e,t}^{cha}) - P_{S_i}^{D,av}]^2 \quad (21)$$

式中: $P_{S_i}^{D,av}$ 为储能采取 S_i 参与策略时负荷曲线波动程度的平均值。

$$P_{S_i}^{D,av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t^D - P_{S_i,e,t}^{dis} + P_{S_i,e,t}^{cha}) \quad (22)$$

2.3 储能自身收益的评价指标

1) 储能在现货电能量市场收益的评价指标。

$R_{S_i}^{energy}$ 为储能采取 S_i 参与策略时在电能量市场的收益,由储能在电能量市场各时段的收益累加得到,并将其作为储能在电能量市场收益的评价指标。

$$R_{S_i}^{energy} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{e=1}^E (\lambda_t^{energy} P_{e,t}^{dis} - \lambda_{e,t}^{energy} P_{e,t}^{cha}) \right] \quad (23)$$

式中: λ_t^{energy} 为 t 时段电能量市场的出清价格,通过计算系统功率平衡约束式(2)的拉格朗日乘子得到。

2) 储能在调频辅助服务市场收益的评价指标。

$R_{S_i}^{frequency}$ 为储能采取 S_i 参与策略时在调频辅助服务市场的收益,由储能各时段的调频容量收益 $R_{S_i}^{cap}$ 与调频里程收益 $R_{S_i}^{mile}$ 累加得到,并将其作为储能在调频辅助服务市场收益的评价指标。

$$R_{S_i}^{frequency} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{e=1}^E (\lambda_t^{cap} P_{e,t}^{cap} + \lambda_t^{mile} M_{e,t}^{mile}) \right] \quad (24)$$

式中: λ_t^{cap} 、 λ_t^{mile} 分别为 t 时段调频市场调频容量、调频里程的出清价格。

3 算例分析

3.1 基础数据

以 10 台火电机组、1 台可再生能源机组、1 座储能电站作为电能量-调频辅助服务市场的参与主体。

火电机组参数、负荷与可再生能源机组出力预测信息见文献[7],火电总装机容量为1 662 MW,含2台基荷机组,5台腰荷机组,3台峰荷机组。储能电站参数见表1。为应对可再生能源出力的波动性与不确定性,取可再生能源机组预测出力的10%与预测负荷的10%作为系统的调频容量需求,并乘以系统调频里程因子(取7)作为调频里程需求。

表1 储能电站参数设置

Table1 Parameter setting of energy storage station

最大充放电 功率/MW	最大能量容 量/MWh	荷电状 态下限	荷电状 态上限	充放电 效率/%	调频里 程因子
100	300	0.1	0.9	95	8

按照可再生能源接入电网比例的不同,分为以下三种仿真场景,系统负荷及不同场景的可再生能源出力预测情况如图2所示。

场景Ⅰ:无可再生能源接入电网。

场景Ⅱ:低比例可再生能源接入电网,可再生能源装机容量305 MW,渗透率为15.5%。

场景Ⅲ:高比例可再生能源接入电网,可再生能源装机容量800 MW,渗透率为32.5%。

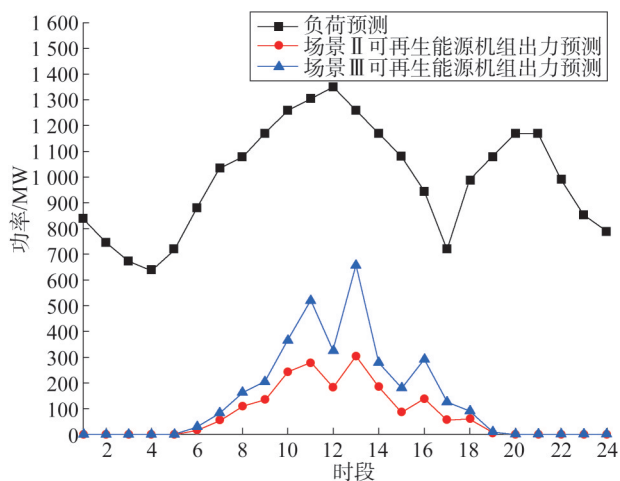


图2 不同场景的负荷与可再生能源出力预测情况

Fig.2 Load and renewable energy output prediction in different scenarios

3.2 储能参与策略的设置

为了更深入地分析储能能在电能市场与调频辅

助服务市场参与程度对系统与储能的影响,在储能报价保持不变的情况下,调整储能能在调频辅助服务市场的参与程度,设置储能调频可用容量从100 MW到10 MW,以10 MW为步长递减,形成储能参与现货市场的10种参与策略。并设置储能不参与电能市场与调频辅助服务市场的参与策略 S_0 ,与该10种参与策略形成对照。

采用上文提出的含储能的现货电能-调频辅助服务市场联合出清模型对储能的不同参与策略进行仿真计算。储能不同参与策略的调频可用容量与调频可用容量限制系数 f_{cap}^{join} 的对应关系如表2所示。

表2 不同交易策略储能调频可用容量与 f_{cap}^{join} 的关系Table 2 Relationship between available capacity for energy storage frequency regulation and f_{cap}^{join} under different strategies

交易策略	调频可用容量/MW	调频可用容量限制系数 f_{cap}^{join}
S_1	100	1.00
S_2	90	1.11
S_3	80	1.25
S_4	70	1.43
S_5	60	1.67
S_6	50	2.00
S_7	40	2.50
S_8	30	3.33
S_9	20	5.00
S_{10}	10	10.00

3.3 储能对电力市场成本的影响分析

储能不同参与策略对应的市场成本如表3所示,电能市场与调频辅助服务市场成本的变化趋势如图3所示。

根据表3,在各种可再生能源接入的比例下,无论储能采取何种参与策略,市场成本均低于储能不参与电力市场的对照组 S_0 ,证明了储能参与电力市场能够降低市场成本。

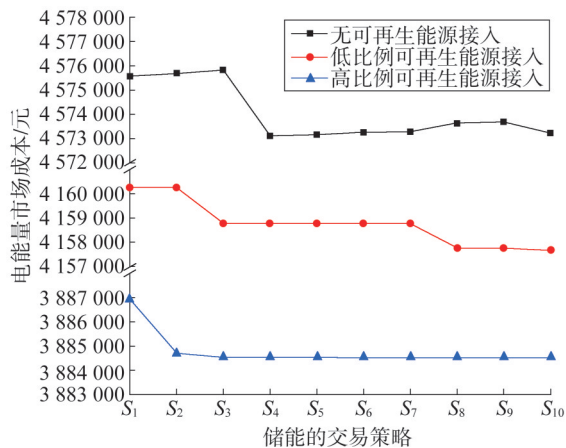
由图3(a)可知,随着储能调频辅助服务市场参与程度的降低,不同可再生能源接入比例场景下电能市场的成本均呈下降趋势。且3种场景均为在

表3 储能不同参与策略的市场成本

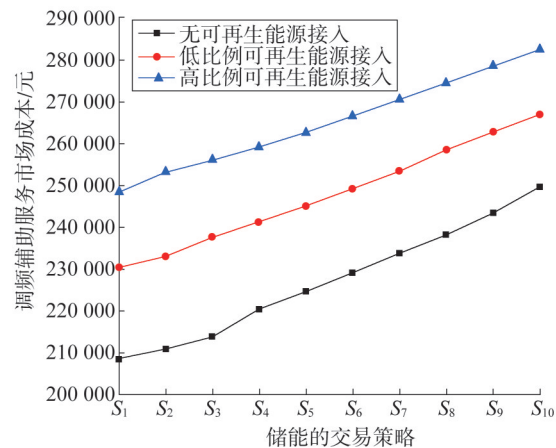
Table 3 Market cost of energy storage under different participation strategies

单位:元

储能 参与 策略	场景 I (无可再生能源接入)			场景 II (低比例可再生能源接入)			场景 III (高比例可再生能源接入)		
	电能量 市场成本	调频辅助服 务市场成本	总成本	电能量 市场成本	调频辅助服 务市场成本	总成本	电能量 市场成本	调频辅助服 务市场成本	总成本
S_0	4 633 075.65	284 590.22	4 917 665.86	4 254 700.87	322 511.51	4 577 212.38	3 994 903.29	354 701.52	4 349 604.81
S_1	4 575 563.40	208 803.91	4 784 367.32	4 160 274.32	230 449.22	4 390 723.54	3 886 931.99	248 537.34	4 135 469.33
S_2	4 575 687.45	211 013.17	4 786 700.62	4 160 274.32	233 106.84	4 393 381.16	3 884 715.93	253 301.07	4 138 016.99
S_3	4 575 835.24	213 945.38	4 789 780.61	4 158 784.30	237 763.56	4 396 547.86	3 884 550.23	256 122.11	4 140 672.35
S_4	4 573 115.11	220 439.00	4 793 554.11	4 158 784.30	241 186.94	4 399 971.24	3 884 550.23	259 159.71	4 143 709.94
S_5	4 573 160.60	224 646.01	4 797 806.61	4 158 784.30	245 095.34	4 403 879.65	3 884 550.23	262 759.36	4 147 309.59
S_6	4 573 264.70	229 089.53	4 802 354.24	4 158 784.30	249 228.43	4 408 012.73	3 884 555.54	266 585.15	4 151 140.68
S_7	4 573 296.40	233 805.57	4 807 101.98	4 158 784.30	253 532.90	4 412 317.20	3 884 550.23	270 600.90	4 155 151.13
S_8	4 573 636.86	238 282.86	4 811 919.71	4 157 765.73	258 637.99	4 416 403.72	3 884 550.23	274 600.03	4 159 150.26
S_9	4 573 695.36	243 515.22	4 817 210.59	4 157 765.73	262 845.96	4 420 611.69	3 884 550.23	278 623.26	4 163 173.49
S_{10}	4 573 230.64	249 695.12	4 822 925.76	4 157 692.07	267 028.56	4 424 720.63	3 884 554.00	282 634.44	4 167 188.43



(a) 电能量市场成本



(b) 调频辅助服务市场成本

图3 不同参与策略电能量市场与调频市场成本变化趋势

Fig.3 The change trend of energy market cost and frequency regulation market cost under different participation strategies

调频市场参与程度降低的初期,电能量市场成本有着较大程度的下降,随后逐渐趋于平缓。其中,与储能参与调频市场不受限制的交易策略 S_1 相比,场景 I 在储能调频市场参与程度降低的初期,电能量市场成本最多下降 1.3%,场景 II 最多下降 2.3%,场景 III 最多下降 2.8%。这表明储能参与电能量市场,有助于提高火电机组的利用率,起到降低发电成本的

作用。但对于某一给定的系统来说,这种作用是有限度的,在储能参与电能量市场达到一定程度后,更多储能参与将不再是减少电能量市场成本的主要因素。

图3(b)反映出随着储能在调频辅助服务市场参与程度的降低,调频辅助服务市场成本不断增加。储能参与调频市场的可用容量以 10 MW 为步长减小

的情况下,场景Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的调频辅助服务市场成本均以约4 000元的幅度增加。结合表2与图3可知,随着储能调频市场参与程度的降低,当储能对电能量市场成本的降低作用小于对调频市场成本的增加作用时,市场总成本逐渐升高。

表3也反映出了可再生能源接入对电力市场成本的影响,其较低的发电边际成本会降低电能量市场的总成本,而其出力的波动性与不确定性又会增加调频辅助服务市场的成本。

3.4 储能平滑负荷曲线的作用分析

由式(20)知,负荷曲线波动程度能够代表储能调节电力供需、平滑负荷曲线作用的强弱。若储能能在能量市场的负荷低谷段中标更多的充电功率,负荷尖峰段中标更多的放电功率,则负荷曲线波动程度减小,表明储能发挥了较好的平滑负荷曲线的作用。

如前所述,对应调频市场储能可用容量限制系数 $f_{\text{cap}}^{\text{join}}$ 不同取值建立了储能不同参与策略,对应的负荷曲线波动程度如图4所示。低比例可再生能源接入场景下储能采用不同参与策略对应的各调频主体提供的总调频容量,即交易日内所有时段的各调频主体提供的调频容量之和如图5所示。

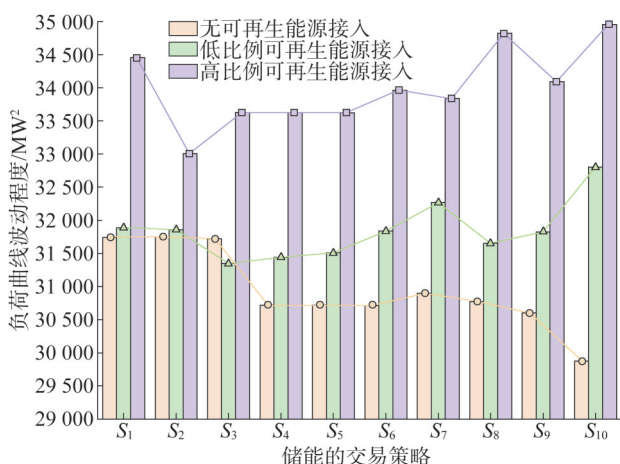


图4 储能不同参与策略对应的负荷曲线波动程度

Fig.4 The load curve fluctuation corresponding to different participation strategies of energy storage

由图4可知,在无可再生能源接入的场景下,随着储能调频辅助服务市场参与程度的降低,负荷曲线的波动程度整体呈下降趋势,这表明储能更多地

参与电能量市场,可以更好地发挥平滑负荷曲线的作用。

而在可再生能源接入的场景下,随着储能调频辅助服务市场参与程度的降低,负荷曲线的波动程度先下降,随后又呈上升趋势。这是因为,在可再生能源接入电网之后,其出力的波动性与不确定性增大了电网的调频需求。以场景Ⅱ为例,在储能参与调频程度降低的初期,相较于储能参与调频不受限制的 S_1 策略, S_3 策略在交易日储能总调频容量略微下降的基础上,使得负荷波动承担降低了1.56%。这表明一定程度地限制储能在调频辅助服务市场的参与程度,可以在不影响储能主要承担调频市场中标量的基础上,引导其兼顾电能量市场功率波动的平抑。但随着储能参与调频市场限制程度的不断加大,调频市场出清结果将有较大变化,调频容量将更多地由火电机组承担。由图5可知,为了满足因储能逐渐退出调频市场而产生的调频容量缺口,更多灵活性火电机组将开机提供调频服务,同时降低了电能量市场的功率平衡压力,因此储能灵活性调节作用的发挥受到限制,其平滑负荷曲线的作用将会变弱。

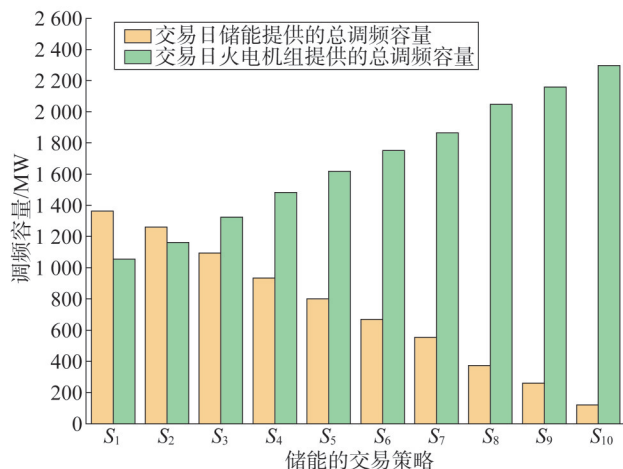


图5 低比例可再生能源接入下各主体提供的总调频容量

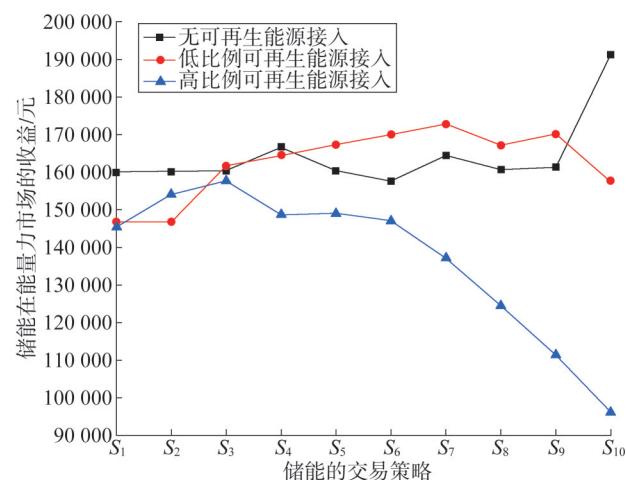
Fig.5 Total regulating capacity provided by participants in the case of low penetration proportion of renewable energy

3.5 储能自身收益分析

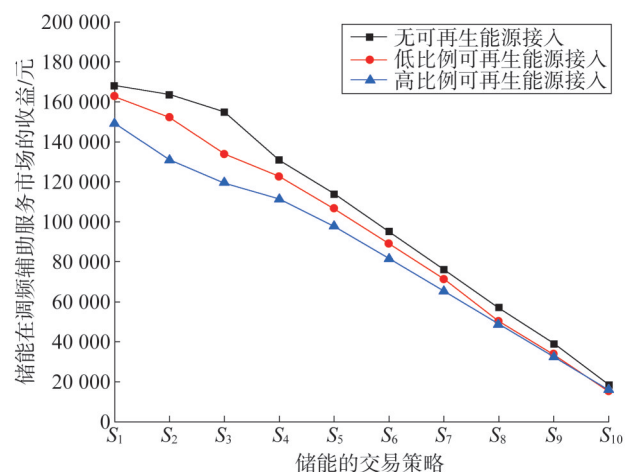
在算例设置中,与发电侧总装机容量相比,储能装机规模较小,因此其对电能量市场峰谷电价差影响较小。可认为储能在电能量市场的收益主要取决

于电能量市场中标充放电功率的大小。

储能不同参与策略对应的电能量市场与调频市场收益情况如图6所示,联合市场收益情况如图7所示。



(a)电能量市场收益



(b)调频辅助服务市场收益

图6 储能不同参与策略对应电能量市场与调频市场收益
Fig.6 Revenue of energy market and frequency regulation market corresponding to different participation strategies of energy storage

由图6(a)可知,在无可再生能源接入的场景下,随着储能调频辅助服务市场参与程度的降低,储能在电能量市场的收益整体呈增加趋势,这表明在调频需求不高的情况下,储能更多地参与电能量市场,将有利于增加储能在电能量市场的收益。

而在可再生能源接入的场景下,随着储能调频

辅助服务市场参与程度的降低,储能在电能量市场的收益先增加,随后又呈减少趋势。原因与3.4节的分析类似,为满足调频需求增加开机的火电机组在填补因储能退出调频市场而产生的调频容量缺口的同时,由于火电机组参与联合市场所具有的成本优势,造成储能在电能量市场中标功率的减少,使其收益降低。

图6(b)反映在可再生能源接入比例不同的场景下,随着储能调频辅助服务市场参与程度的降低,储能在调频辅助服务市场的收益均不断减小。结合图7可知,储能调频可用容量限制系数的调整对电能量市场收益的增加作用小于对调频市场收益的减少作用,因此随着储能调频市场参与程度的降低,储能的总收益逐渐减少。

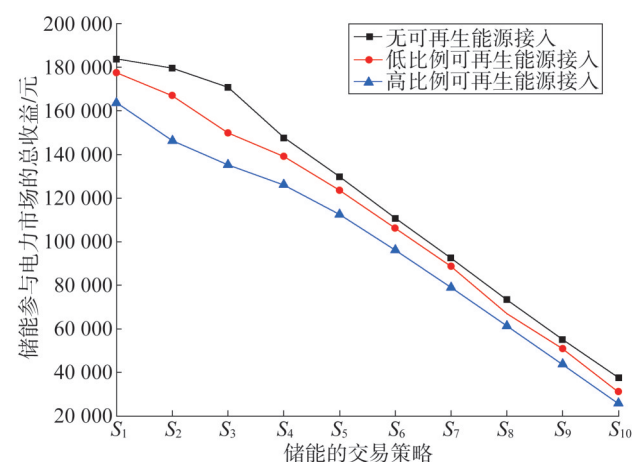


图7 储能不同参与策略对应的联合市场收益

Fig.7 Revenue of joint market corresponding to different participation strategies of energy storage

且随着可再生能源接入比例的增加,储能的收益略微降低。是因为在本文设置的算例环境中,电力系统内火电机组的灵活性有限,随着可再生能源接入电网的比例不断增加,储能将更多地被调用于平抑电能量市场负荷曲线的波动,以保障电能量市场的正常出清,因此其在调频辅助服务市场的收益将受到影响。而调频辅助服务市场作为储能收益的主要来源,其收益的影响最终将导致储能的总收益下降。

3.6 调频里程因子与调频报价的灵敏度分析

储能具有充放电灵活,调节速率快等优良的物理特性,可为电力系统提供优质的调频资源。在市

场规则中对储能调频里程因子 $s_e^{\text{mile-cap}}$ 进行合理设计,并制定合理的储能调频报价,有利于更好地发挥储能优良的调频性能,保障储能的收益。

调频里程因子取值设为3~8,仿真结果如表4所示。

表4 储能不同调频里程因子对应的市场运行结果
Table 4 The market operation results corresponding to different $s_e^{\text{mile-cap}}$ of energy storage

储能调频里程因子 $s_e^{\text{mile-cap}}$	市场总成本/元	储能总收益/元
8	4 148 401.31	245 520.79
7	4 165 941.14	242 706.86
6	4 186 959.13	238 525.95
5	4 214 500.32	231 455.52
4	4 243 347.21	197 063.33
3	4 276 598.68	158 870.08

由表4可知,增大储能的调频里程因子,可以降低市场的总成本,并提高储能的收益。

更大的调频里程因子意味着在中标调频容量一定的条件下,允许储能中标更多的调频里程,有利于发挥储能作为优良调频资源的作用。但过于频繁地改变自身充放电功率提供调频辅助服务会对储能电池的寿命产生较高的折损^[22]。因此,储能的调频里程因子也不宜设置过高,应结合电池性能确定。

为分析调频报价对系统运行与储能自身收益的影响,指导储能制定合适的调频报价策略,设计了4种不同的储能调频报价,其对应的市场运行结果如表5所示。

表5 储能不同调频报价对应的市场运行结果
Table 5 The market operation results corresponding to different regulating biddings of energy storage

场景	调频容量报价/(元/MW)	调频里程报价/(元/MW)	市场成本/元	储能总收益/元
场景1	20	9	4 186 959.13	238 525.95
场景2	14	14	4 235 991.67	231 713.55
场景3	11	11	4 193 283.87	227 835.85
场景4	20	20	4 308 624.20	155 409.75

注:储能调频里程因子统一取6。

场景1:储能的调频容量报价在所有市场主体报价中最高,调频里程报价在所有市场主体报价中最低。

场景2:储能的调频容量报价与调频里程报价均处于所有市场主体报价的中间。

场景3:储能的调频容量报价与调频里程报价在所有市场主体报价中最低。

场景4:储能的调频容量报价与调频里程报价在所有市场主体报价中最高。

由表5可知,不同调频报价对应的市场总成本由低到高排序为:场景1、场景3、场景2、场景4,储能总收益由高到低排序为:场景1、场景2、场景3、场景4。且储能总收益最高的场景比总收益最低的场景高83 116.2元,高53.4%。市场成本最低的场景比成本最高的场景低121 665.07元,低2.8%。可见,储能不同的调频报价策略对市场成本及自身收益有着较大影响。

其中,场景1对调频容量的报价较高,有利于储能较高投资建设成本的回收;对调频里程的报价较低,使储能可以获得更多的调用机会,更好地发挥其调频的灵活性与经济性。可见,采取场景1调频报价,能够较好地反映储能自身技术特性,并兼顾电力市场运行的经济性与储能自身收益。

4 结论

以山东省电力现货市场为基础,构建了储能电站参与现货电能量-调频辅助服务市场联合出清模型,并引入储能调频可用容量限制系数表征两市场间的耦合关系,从电力市场购电成本负荷曲线波动程度、电力市场购电成本、储能收益方面对储能不同的参与策略进行了对比分析,结论如下:

1)储能由于充放电灵活、调节速率快等优点,在调频辅助服务市场上更具优势。在储能的调频里程因子与调频报价设置合理的前提下,能够令储能在调频辅助服务市场获得可观的收益,特别是在可再生能源高比例并网情况下,储能参与电能-辅助服务联合市场将比仅参与电能量市场收益更高。

2)引入的储能调频可用容量限制系数很好地反映了电能量市场与调频辅助服务市场的强耦合关系,通过对该系数的调整,建立了储能在电能市场与调频辅助服务市场的不同参与策略,为观察储能不

同参与策略对市场购电成本与系统负荷曲线波动程度的影响提供了抓手。

3)可再生能源接入比例明显影响储能的参与策略。在可再生能源不接入或低比例接入时,储能更多地参与电能市场对改善负荷曲线波动程度、降低电能市场成本都是有益的;但在可再生能源比例升高后,这种作用的发挥是有限度的,储能更多地参与调频市场,对市场及其自身都更加有益。

对储能电站在电力现货市场的参与策略进行了探讨,得出了有一定参考意义的结论。储能作用的发挥与系统规模及运行状态相关,因此针对更大规模系统及考虑电网安全约束的研究仍有待进一步开展。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 国家统计局,中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].[2022-02-28].http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html.
- [3] CASTAGNETO GISSEY G, SUBKHANKULOVA D, DODDS P E, et al. Value of energy storage aggregation to the electricity system [J]. Energy Policy, 2019, 128: 685-696.
- [4] 武昭原,周明,王剑晓,等.双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7746-7764.
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7746-7764.
- [5] 中共中央国家发展改革委.《关于开展电力现货市场建设试点工作的通知》(发改办能源[2017]1453号)[EB/OL].2017.https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201709/t20170905_962552.html.
- [6] 王浩浩,陈嘉俊,朱涛,等.计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J].电网技术,2021,45(1):208-217.
WANG Haohao, CHEN Jiajun, ZHU Tao, et al. Joint bidding model and algorithm of wind-storage system considering energy storage life and frequency regulation performance [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-217.
- [7] 张利,杨建,营学辉,等.考虑次小时尺度运行灵活性的含储能机组组合[J].电力系统自动化,2018,42(16):48-56.
ZHANG Li, YANG Jian, JIAN Xuehui, et al. Unit commitment with energy storage considering operation flexibility at sub-hourly time-scales [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 48-56.
- [8] 国家发展改革委,国家能源局.关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知(发改办运行[2022]475号)[EB/OL].[2022-05-24].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202206/t20220607_1326854.html?code=&state=123.
- [9] 国家发展改革委,国家能源局.关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知(发改能源[2022]209号)[EB/OL].[2022-01-29].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220321_1319773.html?code=&state=123.
- [10] 张金梦.山东4家储能电站加入电力现货市场——参与报价50次,累计交易电量962.1万千瓦时[N].中国能源报,2022-03-28(9).
- [11] 林阿竹,柯清辉,江岳文.独立储能参与调频辅助服务市场机制设计[J].电力自动化设备,2022,42(12):26-34.
LIN Azhu, KE Qinghui, JIANG Yuewen. Market mechanism design of independent energy storage participating in frequency modulation auxiliary service market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 26-34.
- [12] KARANDEH R, LAWANSON T, CECCHI V. A two-stage algorithm for optimal scheduling of battery energy storage systems for peak-shaving [C]//2019 North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2019: 1-6.
- [13] 谢敏,韦薇,李建钊,等.储能电站参与能量-调频市场联合调度模式研究[J].电力建设,2019,40(2):20-28.
XIE Min, WEI Wei, LI Jianzhao, et al. Research on combined dispatching mode of energy storage in energy market and regulation market [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 20-28.
- [14] 肖云鹏,张兰,张轩,等.包含独立储能的现货电能与调频辅助服务市场出清协调机制[J].中国电机工程学报,2020,40(增刊1):167-180.
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180.
- [15] ZOU P, CHEN Q X, XIA Q, et al. Evaluating the contribution of energy storages to support large-scale renewable generation in joint energy and ancillary service markets [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 808-818.
- [16] 姜欣,刘萌,王天梁,等.电网侧储能电站参与现货联合市场的竞价策略[J].电网技术,2021,45(9):3398-3408.
JIANG Xin, LIU Meng, WANG Tianliang, et al. Bidding strategy for

- grid-side energy storage power stations to participate in the spot joint market [J]. Power System Technology, 2021, 45 (9) : 3398-3408.
- [17] WANG Y S, DVORKIN Y, FERNÁNDEZ-BLANCO R, et al. Look-ahead bidding strategy for energy storage [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (3) : 1106-1117.
- [18] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (5) : 2359-2367.
- [19] 山东能源监管办, 山东省发展改革委, 山东省能源局. 关于做好2022年山东省电力现货市场结算试运行有关工作的通知[EB/OL]. 2022 [2020-01-29]. <https://shoudian.bjx.com.cn/html/20220215/1204315.shtml>.
- [20] 李淋, 徐青山, 王晓晴, 等. 基于共享储能电站的工业用户日前优化经济调度[J]. 电力建设, 2020, 41 (5) : 100-107.
- LI Lin, XU Qingshan, WANG Xiaoqing, et al. Optimal economic scheduling of industrial customers on the basis of sharing energy-storage station [J]. Electric Power Construction, 2020, 41 (5) : 100-107.
- [21] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42 (8) : 2604-2611.
- LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and big-M method [J]. Power System Technology, 2018, 42 (8) : 2604-2611.
- [22] 李柯江, 宋天昊, 韩肖清, 等. 计及电价不确定性和损耗成本的储能竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (17) : 52-59.
- LI Kejiang, SONG Tianhao, HAN Xiaoqing, et al. Bidding strategy of energy storage considering electricity price uncertainty and loss cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (17) : 52-59.
-
- 收稿日期: 2023-06-11
修回日期: 2023-11-07
作者简介:
王元元(1985), 通信作者(yywang2012@163.com), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、电网调度;
刘航航(1985), 男, 高级工程师, 研究方向为电力现货市场运行、辅助服务市场;
司君诚(1979), 男, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行;
宋世航(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为电力市场;
蔡言斌(1983), 男, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行。
- (责任编辑 郑天茹)