

# BESS 参与风电辅助服务市场效益敏感性分析

张 伟<sup>1</sup>, 马美婷<sup>2</sup>, 秦艳辉<sup>3</sup>, 皮 霞<sup>4</sup>, 袁铁江<sup>5</sup>, 刘沛汉<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;

3. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

4. 国网甘肃电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050; 5. 大连理工大学, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 储能电池作为一种较优的储能方式, 在解决弃风、弃光问题方面逐渐得到重视。然而电池储能电站 (battery energy storage station, BESS) 的经济性现状还不明朗, 难以进行大规模应用。提出了一种 BESS 与常规机组竞价上网的辅助服务提供模式; 建立了 BESS 的市场效益分析模型; 根据模型计算, 利用 Microsoft Office Excel 2007 进行 BESS 投资收益的敏感性分析, 为电池储能电站方案规划提供工程经济参考。

**关键词:** 电池储能电站; 辅助服务; 经济性; 敏感性分析

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0077-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.016

## Sensitivity Analysis on Market Efficiency in Auxiliary Service of Wind Power with BESS

Zhang Wei<sup>1</sup>, Ma Meiting<sup>2</sup>, Qin Yanhui<sup>3</sup>, Pi Xia<sup>4</sup>, Yuan Tiejia<sup>5</sup>, Liu Peihan<sup>2</sup>

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

4. State Grid Gansu Economic Research Institute, Lanzhou 730050, Gansu, China;

5. Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

**Abstract:** As a better energy storage method, energy storage battery gets more and more attention in solving the problem of wind and photovoltaic energy curtailment. However, the economic status of battery energy storage station (BESS) is not clear, and it is difficult to carry out the large-scale applications. An auxiliary service delivery model is proposed, in which BESS and conventional units bid against each other. Market efficiency analysis model of BESS is established, and according to the calculation of the model, the sensitivity of BESS investment returns is analyzed in Microsoft Office Excel 2007, which can provide an engineering economic reference for the planning project of BESS.

**Key words:** battery energy storage station; auxiliary service; economic status; sensitivity analysis

## 0 引 言

全球化石能源的日益匮乏和自然环境的每况愈下, 无形地促进了含风、光电在内的可再生能源产业的发展。然而, 可再生能源出力十分不稳定, 波动幅度大, 无益于电网的安全稳定运行, 为火、水电等传

统机组的调峰、调频工作造成很大负担。当前, 在没有清晰的辅助服务补偿制度前提下, 传统机组正在无偿为风电提供调峰、调频辅助服务, 对火电等传统机组的利益提出了考验, 在一定程度上打消了常规机组提供电力辅助服务的积极性, 影响了风电的大规模并网消纳<sup>[1]</sup>。而储能技术在电网中呈现出的包括削峰填谷、电能的时空转移等多种应用方式, 可以有效提升风电渗透率, 解决电网高峰、低谷负荷的

问题;同时,能够通过合理的电价设计,促进电力市场自由化。

文献[2-3]在储能电池应用于跟踪风电场计划出力方面做了探索。文献[4]通过分析处理储能示范电场的实际数据,得到储能电池是一种高效且适用的平抑风电波动方法的结论。文献[5]研究了储能电池在应用于平抑风电功率波动时的新的控制方法。文献[6-8]均在风电场出力短期预测技术基础上,进行了BESS在平抑风电出力波动方面的控制策略研究。文献[9]提出一个虚拟电厂的概念,将风电场及储能系统联合起来调度管理,分析了储能的工作方式,得出了储能系统的收入和成本计算公式。

综上,目前对电池储能系统应用于电网建设的探索,还集中在风储联合系统中储能的控制策略和容量配置研究上,而在制约电池储能电站大规模发展的经济性因素方面研究尚少,从行业发展来看,研究规模化电池储能技术的经济性是十分紧迫的需求。

为保证电力系统具有可靠的风电辅助服务提供能力,实现风电安全、经济、高效的并网,亟需一种新的辅助服务电力市场模式,提高各机组提供辅助服务的积极性。下面在分析BESS参与风电辅助服务场景的过程中,提出了新的辅助服务市场模式。首先依据BESS的参与方式及参与量,建立其参与风电辅助服务的经济效益模型。然后,在Excel中建立BESS收益敏感性分析模型,由此分析影响BESS经济效益的敏感因素,得到对BESS收益影响最大、最敏感的参数,得出减少不利因素影响、改善和提高项目的投资效果的结论。

## 1 BESS参与风电辅助服务场景分析

目前,随着风电的大规模入网,弃风限电现象也越来越不容小觑,风电的安全可靠并网问题也得到了越来越多的关注。众所周知,风电出力十分不稳定,出力曲线大幅度波动情况多见,且结合负荷曲线分析时,频繁发生反调峰威胁着电网的稳定运行。因此,需要系统提供辅助服务来协同风电友好并网<sup>[10]</sup>,这里将此种辅助服务称为风电辅助服务。

而现阶段,中国并没有成熟的辅助服务交易模

式,尚且不能将辅助服务和电能服务分开来看<sup>[11]</sup>。同时也还无配合中国新能源规模化应用的补偿机制,这还处于示范试点研究阶段。目前,中国已计划实施一些电力辅助服务补偿机制试点工程,分布在弃风现象较为严峻的东北、华北和西北等地区,相应地,也会对参与辅助服务的储能系统提供商给予资金补偿,补偿方式方法没有制度化<sup>[11]</sup>。

因此,下面效仿现有电能服务市场,提出一种新的辅助服务市场模式,如图1所示。在此种模式下,提供辅助服务的传统机组和储能系统都可以在保证自身盈利的情况下,根据其辅助服务提供能力给出报价。把电池储能电站看做独立个体,和提供辅助服务的传统机组竞价上网。由上级调度安排上网计划,以购电成本最小为目标,以电网安全稳定为约束,选择最佳的辅助服务提供方案。这种模式的一大优点就是无需电力系统或辅助服务需求方提供辅助服务补偿。

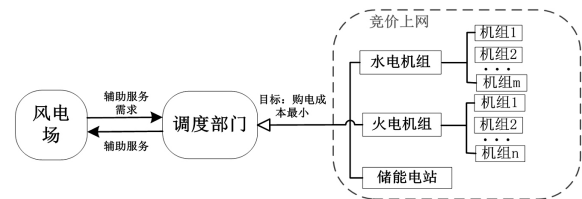


图1 风电辅助服务提供机组参与方式

## 2 BESS市场效益建模

### 2.1 BESS的成本与收入构成

从分析BESS的成本、收入构成入手,研究BESS的市场效益。

首先,BESS的成本由初始投资成本和运行维护成本组成。采用相应的电池寿命值和折现率,将BESS全寿命周期内的成本进行分摊,与同一时间尺度下的运行维护成本相加,得到BESS的年均成本和日成本。

其次,BESS的收入包括容量收入、电量收入、环境效益和储能电池回收收入等4部分,其中:容量收入与电池储能电站容量有关,容量电价考虑采用两部制电价中的容量电价计算方法,按补偿储能系统固定成本和准许收益的原则确定;电量收入由BESS参与风电辅助服务的参与量和其充、放电价决定,BESS通过与常规机组竞价的方式参与风电辅助服务,其辅助服务提供量根据调度机构的安全经济分

配得出;环境效益是指在采用 BESS 后减少污染物排放的效益,即其代替传统机组承担辅助服务所减少的污染物、温室气体排放产生的效益;储能电池回收收入是在储能电站经过长期使用,达到其寿命极限时,对其金属进行回收再利用的效益。

### 2.2 BESS 市场效益建模

根据以上分析,建立 BESS 的市场效益模型如式(1)所示。

$$F_d = I_{total} - C_{total} = \sum_{i=1}^n (m_{UEC_i} Q_i) E_{s.out} + \frac{1}{365} P_e m_f + \sum_{i=1}^{96} I_2 + \frac{1}{365} \sum_{i=1}^n (R_{metali} \rho_{metali} E_e / \delta_{energy-i}) \lambda - \frac{1}{365} [(C_p P_e + C_E E_e) \lambda + C_{yw} P_e] \quad (1)$$

式中:  $m_{UEC_i}$  为第  $i$  种污染物环境负荷量单位成本<sup>[12]</sup>;  $Q_i$  为常规燃煤发电第  $i$  种污染物排放量;  $E_{s.out}$  为储能电站参与风电辅助服务放电电量;  $P_e$  是 BESS 额定功率;  $m_f$  为储能电站容量电价;  $R_{metali}$  为金属  $i$  的单价,下标代表金属属性;  $\rho_{metali}$  为单位电池中金属  $i$  的含量;  $E_e$  是 BESS 额定容量;  $C_p$  是 BESS 单位功率成本;  $C_E$  是 BESS 单位容量成本;  $C_{yw}$  是 BESS 单位年运行维护费用;  $\lambda = \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1}$ 。

## 3 BESS 市场效益敏感性分析

### 3.1 多因素综合变动对 BESS 日收益的影响分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 进行 BESS 投资收益的敏感性分析,建立 BESS 收益敏感性分析模型如图 2 所示。

BESS 收益敏感性分析模型									
1	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前 BESS 日收益(元)	变动后 BESS 日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4				1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523
4	额定功率(MW)	1				1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.80973784
5	额定容量(MWh)	1				1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523

图 2 BESS 收益敏感性分析模型

通过滚动条控制影响因素的变动百分比,进而控制因素变动后的值(百分比增加或减少 1,代表影响因素增加或减少初始值的一倍)。根据日收益模型,以储能放电电价、BESS 额定容量、BESS 额定功率三者为变量,建立 BESS 日收益与 3 个变量间的关系式,作为变动前 BESS 日收益及变动后 BESS 日收益的计算公式。

设定放电电价初始值为 0.4 元/(kW·h),额定

功率初始值为 1 MW,额定容量初始值为 1 MW·h。各影响因素经过一定变动,日收益也随即变动。模型计算结果如图 3 所示。

BESS 收益敏感性分析模型									
1	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前 BESS 日收益(元)	变动后 BESS 日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4			1.6	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523
4	额定功率(MW)	1			3	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.80973784
5	额定容量(MWh)	1			4	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523

图 3 BESS 收益敏感性分析计算 1

当前, BESS 放电电价为 1.6 元/(kW·h),额定功率为 3 MW,额定容量为 3 MW·h, BESS 日收益为 4 390.748 41 元。要分析多因素综合变动对 BESS 日收益的影响,可将各因素增加其初始值的 1 倍,计算结果如图 4 所示。

BESS 收益敏感性分析模型									
1	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前 BESS 日收益(元)	变动后 BESS 日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4			2	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.666824
4	额定功率(MW)	1			4	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.889099
5	额定容量(MWh)	1			5	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.666824

图 4 BESS 收益敏感性分析计算 2

由计算结果可见,日收益变为 6 147.1 元。则各因素变动其初始值的 1 倍时, BESS 日收益变动了 40%。继续使各因素变动为其初始值的 1~n 倍时,得到 BESS 日收益变动曲线及敏感系数曲线如图 5 所示。

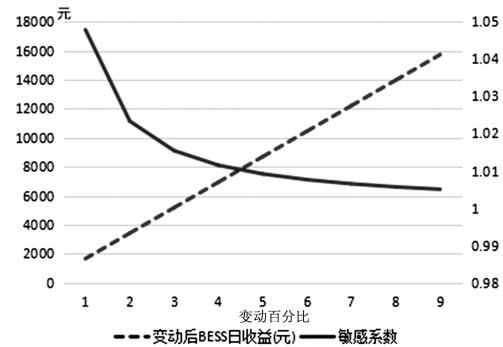


图 5 BESS 收益敏感性分析计算 3

由图 5 可知,各因素综合变动对 BESS 日收益影响的敏感系数由大变小,但始终大于 1。

### 3.2 各因素变动对 BESS 日收益的影响分析

#### 3.2.1 放电电价对 BESS 日收益的影响

采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算:保持 BESS 额定功率为 3 MW,额定容量为 4 MW·h,建立放电电价变动对日收益变动影响的模拟运算表,根据其模拟运算表,建立单因素影响分析动态图如图 6、图 7 所示。

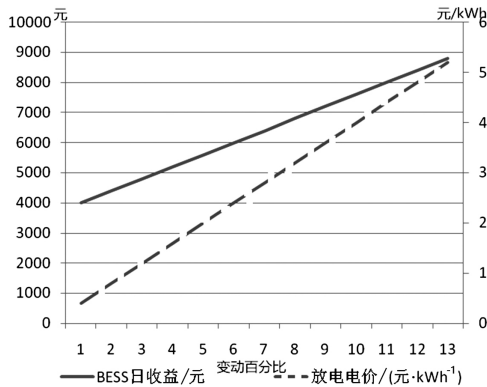


图6 放电电价对 BESS 日收益的影响动态

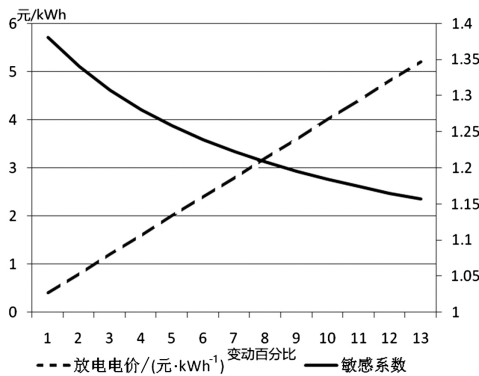


图7 放电电价变动曲线与其敏感系数曲线

放电电价由初始值 0.4 元/(kW·h) 以 0.4 元/(kW·h) 为变动量不断增加时,由图 6 可得结论: BESS 的日收益随着 BESS 放电上网电价的增加而增加。因素变动对日收益变动影响的敏感系数如图 7 中实线所示。可见,当电价不断增加的过程中,敏感系数不断下降,但仍大于 1,即表明日收益受电价变动的影 响虽是逐渐减弱,却依旧很大。

### 3.2.2 额定容量对 BESS 收益的影响

在调度机构进行辅助服务经济分配时,存在储能电池的容量约束。因此,电池容量对 BESS 参与风电辅助服务的提供量、日收益都有影响。若保持储能电池额定功率为 3 MW,单价为 1.6 元/(kW·h) 不变,采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算,建立额定容量变动对日收益变动影响的模拟运算表,并形成单因素影响分析动态如图 8、图 9 所示。

图 8 展现了 BESS 额定容量对日收益的影响趋势。BESS 日收益受额定容量不断增大的影响,其值不断减小,在额定容量等于约 7.6 MW·h 时,BESS 收益存在过零点,BESS 由盈利转为亏损。图 9 表现了额定容量由初始值 1 MW·h 并以 1 MW·h 为变动量不断增加时,BESS 额定容量变动对日收益的敏感系数的变化趋势。敏感系数小于 0,说明 BESS 日

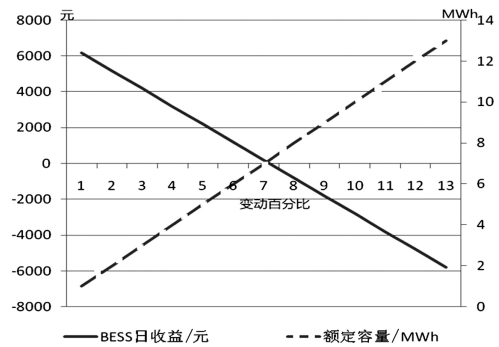


图8 额定容量对储能电站日收益的影响趋势

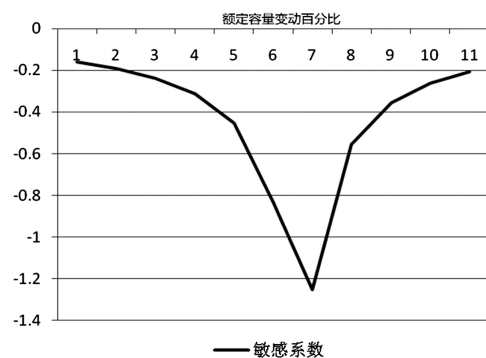


图9 敏感系数曲线

收益随着额定容量变动向反方向变化;而额定容量在 0~7.6 MW·h 之间变动时,BESS 收益,BESS 日收益对于额定容量的变动越来越敏感;在额定容量大于 7.6 MWh 之后,BESS 亏损,BESS 亏损量对于额定容量的变动敏感性减弱,趋向于 0。

### 3.2.3 额定功率对 BESS 日收益的影响

根据所建 BESS 收益数学模型,BESS 的额定功率对其参与风电辅助服务的提供量有影响;同时,对其容量收入、初始投资成本影响也很大。

通过计算,在控制 BESS 额定容量为 4 MW·h,单价为 1.6 元/(kW·h) 不变时,采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算,建立额定功率变动对日收益变动影响的模拟运算表。根据额定容量与日收益变动模拟运算表,建立单因素影响分析动态图如图 10、图 11 所示。由图 10 可知,BESS 额定功率与其日收益呈正比关系,额定功率越大,收益越大。由图 11 可见,BESS 额定功率变动对日收益的影响敏感系数随着 BESS 额定功率的增大,呈对数形式增长,趋近于 1,敏感度亦不大。

## 4 结 论

1) 为顺应风电的大规模发展,需要建立合理、

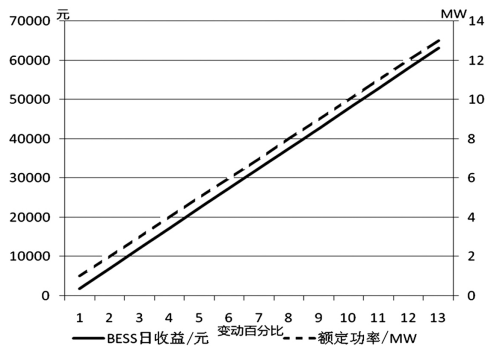


图 10 额定功率对 BESS 日收益的影响动态

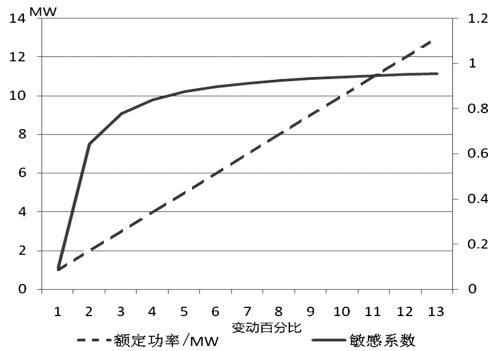


图 11 额定功率变动曲线与敏感系数曲线

有效的辅助服务市场机制,提出了一种新的辅助服务模式,其中 BESS 与常规机组同时上报其提供能力和报价,参与风电辅助服务的竞价。在引导传统机组提供电力辅助服务的同时,促进可再生能源和储能产业的发展,保障电网的可靠运行。

2) 针对所建 BESS 综合经济效益模型的敏感性分析可知,对 BESS 参与风电辅助服务的综合经济效益影响较大的 3 个因素分别为:放电电价、额定容量和额定功率,其中放电电价无疑是最为敏感的影响因素,符合利润分析常理。

参考文献

[1] 马美婷. BESS 参与风电辅助服务综合经济效益研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.  
 [2] 靳文涛,李蓓,谢志佳. 电池储能系统在跟踪风电计

(上接第 42 页)

[7] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-9.  
 [8] Gouveia C, Moreira J, Moreira C L, et al. Coordinating Storage and Demand Response for Microgrid Emergency Operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1898-1908.  
 [9] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.

划出力中的需求分析[J]. 储能科学与技术,2013,2(3):294-299.  
 [3] 杨水丽,李建林,惠东,等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. 电网技术,2014,38(6):1485-1491.  
 [4] Yoshimoto K, Nanahara T, Koshimizu G. Analysis of Data Obtained in Demonstration Test About Battery Energy Storage System to Mitigate Output Fluctuation of Wind Farm[C]// Integration of Wide-scale Renewable Resources into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium 2009:1-1.  
 [5] Jiang Q, Wang H. Two-time-scale Coordination Control for a Battery Energy Storage System to Mitigate Wind Power Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2013,28(1):52-61.  
 [6] Jiang Q, Gong Y, Wang H. A Battery Energy Storage System Dual-layer Control Strategy for Mitigating Wind Farm Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2013,28(3):3263-3273.  
 [7] 娄素华,吴耀武,崔艳昭,等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):17-22.  
 [8] 李蓓,郭剑波. 平抑风电功率的电池储能系统控制策略[J]. 电网技术,2012,36(8):38-43.  
 [9] 闫涛,渠展展,惠东,等. 含规模化电池储能系统的商业型虚拟电厂经济性分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):98-104.  
 [10] 马美婷,袁铁江,陈广宇,等. 储能参与风电辅助服务综合经济效益分析[J]. 电网技术,2016,40(11):3362-3367.  
 [11] 单茂华,李陈龙,梁廷婷,等. 用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略[J]. 电网技术,2014,38(2):469-477.  
 [12] 赵艳妮. 基于 VC++ 的电动汽车实验数据分析系统设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

作者简介:

张伟(1966),硕士,专业方向为电力系统继电保护及自动化、新能源发电与并网技术。

(收稿日期:2018-01-28)

[10] 刘娇娇,王致杰,袁建华,等. 基于 PSO 算法的风光储微电网优化调度研究[J]. 华东电力,2014,42(8):1534-1539.

作者简介:

杜继成(1986),硕士研究生、工程师,主要研究方向为电力系统调度运行;

张真源(1986),博士、副教授,主要研究方向为电力系统运行与分析、智能电网及电力市场;

张宇馨(1993),硕士在读,硕士期间主要研究方向为微网调度、微网电力市场。

(收稿日期:2018-01-05)