

配电网中储能参与多场景的多维经济性评估

李翠萍¹, 闫佳琪¹, 孙大朋¹, 孙哲彬², 梁涛², 席向东², 萨仁高娃², 张前², 朱星旭¹, 李军徽^{1*}

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省 吉林市 132012;

2. 内蒙古电力经济技术研究院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010010)

Multi-dimensional Economic Evaluation of Energy Storage Participating in Multi-scenarios in Distribution Network

LI Cuiping¹, YAN Jiaqi¹, SUN Dapeng¹, SUN Zhebin², LIANG Tao², XI Xiangdong², Sarengaowa², ZHANG Qian², ZHU Xingxu¹, LI Junhui^{1*}

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education

(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Inner Mongolia Power Economic Technology Research Institute, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: With the expansion of the installed scale of new energy in the distribution network, it will cause problems such as the increase of peak-valley difference of distribution network load and the consumption of new energy. Since energy storage has the characteristics of 'low storage and high incidence', it has been considered as an effective means of peak-cutting and valley-filling and improving the accommodation capacity of new energy. However, the cost of energy storage is still high, so how to configure energy storage and evaluate its economy is important. Therefore, considering the two application scenarios of energy storage system to participate in peak-cutting and valley-filling and improve the accommodation capacity of new energy, taking into account the multi-dimensional factors such as arbitrage income, environmental benefits, government subsidies, investment and construction costs, and annual operation and maintenance costs, the economic evaluation model of the energy storage system is established, and the economic analysis of the two scenarios is carried out by an example. The results show that in the scenario of peak-cutting and valley-filling, the optimal allocation of the maximum energy storage benefit under different price differences is obtained. In the scenario of improving the accommodation capacity of new energy, it is determined that under the given conditions, when the proportion

of new energy consumption exceeds 66%, the energy storage system begins to profit.

Keywords: distribution network; peak-cutting and valley-filling; accommodation capacity; economic evaluation; government subsidies

摘要: 随着配电网中新能源装机规模的扩大,会带来配网负荷峰谷差增大及新能源消纳困难等问题。储能具有“低储高发”的特性,其已经被认为是削峰填谷、提高新能源消纳能力的有效手段。但目前储能成本仍较高,故如何配置储能并对其进行经济性评估分析是重要的。为此,综合考虑储能系统参与削峰填谷、提高新能源消纳能力的两种应用场景,计及套利收益、环境效益、政府补贴、投资建设成本和年运行维护成本等多维因素,建立储能系统的经济性评估总模型,通过算例对两种场景进行经济性分析。结果表明,在削峰填谷场景中,得到了不同电价差下,储能收益最大时的最优配置。在提高新能源消纳能力场景中,确定了在所设条件下,新能源消纳比例超过66%时储能系统开始盈利。

关键词: 配电网; 削峰填谷; 消纳能力; 经济性评估; 政府补贴

0 引言

在目前碳达峰、碳中和的能源转型大背景下,新能源发电系统接入配电网的比例逐步增大。新能源发电出力具有随机性、间歇性等特点,其出力与配电网负荷需求在时间上的不匹配,会造成负荷峰谷差增大、配网消纳新能源能力不足等问题^[1-2],给配电网

基金项目: 内蒙古电力经济技术研究院科技项目(分布式储能接入蒙西配电网优化控制与接入标准研究, 2020-54)。

Science and Technology Project of Inner Mongolia Electric Power Economic and Technological Research Institute (Research on Optimal Control and Integrate Standard of Distributed Energy Storage Access to West Inner Mongolia Distribution Network, 2020-54).

的安全稳定运行带来重大挑战。储能系统具有“低储高发”的特性，目前利用储能技术进行削峰填谷或是提高新能源消纳能力已经基本被业界认可。现阶段储能的相关成本仍较高，以至于如何配置储能^[3-5]、如何对其进行经济性评估分析^[6-9]是储能参与削峰填谷或提高新能源消纳能力的至关重要的一环。

现阶段，全球学者对于储能的容量优化配置及经济性评估分析已经做了较多研究。文献[10]对于梯次利用电池储能参与削峰填谷的经济性问题，建立了基于电池投资回报率和回收期的储能电池经济性评估模型，分析了不同回收成本下，梯次利用电池储能的容量配置。文献[11]首先以发电企业净收益最大为目标建立了储能容量优化模型，其次结合电池的循环寿命建立了电池损耗成本函数，考虑售电收益以及考核费用，利用粒子群算法求解净收益最大时的储能容量配置。文献[12]首先建立了储能全寿命周期的成本模型，其次建立了考虑降低线路网损收益、峰谷差套利收益以及政府补贴等方面的收益模型，最终通过算例分析各要素对储能经济性的影响。文献[13]基于提高储能系统全寿命周期经济性的控制策略，利用动态规划方法实现了系统年优化控制，并分析了不同电价方案、储能系统的容量及储能系统单位容量成本对系统全寿命周期经济性的影响。文献[14]对于储氢的容量配置经济性及其风电并网质量二者不可兼得的问题，建立了风力发电氢储能容量配置双层规划模型，利用改进的遗传算法对其进行求解，验证了所提方案的优越性。然而，上述文献很少从多个场景的角度对储能经济性进行评估分析。

本文综合考虑储能系统参与削峰填谷、提高新能源消纳能力两个基本应用场景，建立了储能系统经济性评估总模型。结合蒙西某电网全年的负荷数据仿真分析了不同电价差下，收益达到最大时的储能最优功率及容量配置。同时也分析了政府补贴在储能收益中所占比重，考虑如若政府补贴退出市场，会对储能经济性造成的影响。

1 划分场景及确定储能类型

1.1 场景的划分

新能源的发电出力具有随机性、间歇性等特点，新能源发电高比例接入配电网后，会给配电网造成诸多不良影响。其中间歇性的新能源与负荷叠加后的负荷峰谷差增大；另外光伏系统白天出力过剩而轻负

荷，夜间光伏出力为零而重负荷，即光伏系统的出力特性与配电网负荷需求在时间上的不匹配，会导致配电网消纳新能源的比例较低，功率向主网倒送，从而引发弃光，限制配电网对新能源的消纳能力。

储能因其能够实现“平移能量”，已经成为了解决配电网当前面临问题的有效手段。利用储能的“低储高发”特性，可以有效地削减负荷的峰谷差、提高配电网对新能源的消纳能力。

针对上述新能源发电系统接入配网所带来的两个典型问题，考虑配置储能来有效解决。本文基于此划分了两个应用场景进行分析，场景一为储能参与削峰填谷，场景二为储能参与提高新能源消纳能力。在划分场景的基础上，考虑到目前的储能成本仍较高，因而在分析储能经济性之前应先确定所研究的储能类型。

1.2 储能类型的确定

储能按照技术类型^[15]可分为：机械储能、电磁储能、电化学储能、热储能以及化学类储能5类。其中机械储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能；电磁储能主要包括超级电容器和超导电磁储能；电化学储能包括锂离子电池^[16]、铅蓄电池^[17]、钠硫电池、液流电池等；化学类储能主要包括氢能和合成燃料。

其中电化学储能具备高可控性、快速响应、高模块程度的优势，能量密度大、转换效率高、建设周期短且安装方便，使用范围广，具有极高的推广价值。

与此同时，储能技术发展情况各不相同，相应的技术经济性指标也存在明显差异，影响着储能的经济性。典型储能技术的经济性指标如表1所示。

表1 典型储能技术经济性指标
Table 1 Economic index of typical energy storage technology

储能类型		充放电效率/%	单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	单位容量成本/(元·kW ⁻¹)
机械储能	压缩空气储能	41~75	3000~4000	20~50
	飞轮储能	80~90	1500~10 000	2000~5000
电磁储能	超级电容	85~90	600~1800	>10 000
	超导储能	75~80	1200~1800	6000~60 000
	锂离子电池 ^[18]	90~95	1500	3000~4000
电化学储能	钠硫电池	>85	2500	5000~7000
	全钒液流电池	60~75	8000	4000~10 000
	铅碳电池	70~80	1500	600~1200
化学类储能	碱性水电解制氢	62~82	6360	14 000

根据上述电化学储能的相关优势, 又由表1可知, 电化学储能的总体经济性指标要优于其他储能类型的经济性指标, 且目前电化学储能应用广泛, 落地的大规模工程也很多, 故本文研究对象以电化学储能为主。

就目前电化学储能的技术发展水平来看, 要实现其在电力系统中的大规模应用, 期望的储能效率应大于95%, 充放电循环寿命应超过10 000次, 储能系统规模可达到10 MWh以上, 并且应具有较高的安全性。在上述基准下, 目前各类储能电池技术现状如图1所示。

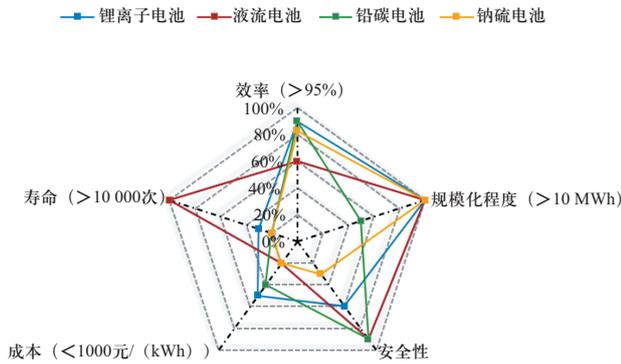


图1 储能电池技术现状雷达图

Fig. 1 Radar chart of energy storage battery technology

从图1中对比效果来看, 储能电池技术各有短板, 距期望值均有一定差距。就安全性的角度考虑, 由于钠硫电池的安全性较其他三种电池的安全性低, 故本文初步选择以磷酸铁锂电池、全钒液流电池以及铅酸电池为研究对象进行经济性分析。

2 储能系统经济性分析方法

2.1 储能系统经济收益构成

本文考虑的储能系统的经济收益^[19-20]构成主要包括套利收益、环境效益以及政府补贴三个部分。下面进行具体阐述。

2.1.1 套利收益

价格机制成为发展储能的关键。其中峰谷电价机制, 即对高峰时段、低谷时段及平时段分别设置不同的价格。利用电化学储能的“低储高发”进行峰谷电价套利, 是储能经济收益的重要组成部分。

$$S_{\text{income}} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_i^+ - P_D) R_i - \sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_C - P_i^-) R_i \quad (1)$$

式中: S_{income} 为储能系统的套利收益; P_i^- 和 P_i^+ 为第*i*小时段电池充放电功率, 在同一时间内电池储能系统只会保持充电或放电单一状态; P_C 为充电起始值; P_D 为放电起始值; R_i 为第*i*小时段分时电价。

2.1.2 环境效益

目前, 中国大多数电网调峰只能依靠传统的燃煤发电机组来承担, 进而增大了单位煤耗。促进光伏等清洁能源的并网消纳可减小火电机组的上网电量, 有效降低硝硫等污染气体的排放量。同样的, 储能系统的投运也会减少污染物的排放, 并带来一定的环境收益。运用储能装置进行削峰填谷, 则可以代替火电机组完成部分调峰^[21]任务, 进而间接减少并优化火电机组的频繁增减出力, 使储能装置能够基本上稳定在高效率范围运行, 其数学模型为

$$S_{\text{environment}} = \sum_{t=1}^T (\alpha_{\text{pv}} P_{\text{pv},t}^{\text{acc}} + \alpha_{\text{soc}} \eta_d P_{d,t}) \quad (2)$$

式中: $S_{\text{environment}}$ 为储能系统的环境收益; α_{pv} 为光伏并网消纳产生的环境收益系数; α_{soc} 为储能系统运行产生的环境收益系数; $P_{\text{pv},t}^{\text{acc}}$ 为*t*时段的光伏消纳功率; $P_{d,t}$ 为*t*时段储能系统的放电功率; η_d 为储能系统的放电效率。

2.1.3 政府补贴

财政部、国家发展和改革委员会关于印发的《电力需求侧管理城市综合试点工作中中央财政奖励资金管理暂行办法》中明确指出: 对通过实施能效电厂和削峰填谷技术等实现永久性节约电力负荷和转移高峰电力负荷, 东部地区每千瓦时补贴0.44元, 中西部地区每千瓦时补贴0.55元。故

$$S_{\text{allowance}} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{t=n_3}^{n_4} P_i \cdot m_t \quad (3)$$

式中: $S_{\text{allowance}}$ 为储能系统的政府补贴收益; n_3 、 n_4 为储能系统放电起始、终止时间; m_t 为减少单位峰荷而补贴的现金。

2.2 储能系统全寿命周期成本构成

储能系统的全寿命周期成本^[22]包括投资建设成本和年运行维护成本^[23]。投资建设成本包括功率成本和容量成本; 年运行维护成本即储能系统在运行一年中需要花费的维护费用。

2.2.1 投资建设成本

储能系统的投资建设成本主要包括容量成本和功率成本。可表示为

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{ep}} \cdot P_{\text{ESS}} + C_{\text{ce}} \cdot E_{\text{ESS}} \quad (4)$$

式中: C_{ep} 为储能系统单位功率成本; C_{ce} 为储能系统

单位容量成本； P_{ESS} 为储能系统额定功率； E_{ESS} 为储能系统额定容量。

2.2.2 年运行维护成本

储能系统的年运行维护成本主要由其规模确定，可表示为

$$C_{re} = C_{wp} \cdot P_{ESS} + C_{we} \cdot E_{ESS} \quad (5)$$

式中： C_{wp} 为储能系统年运行单位功率成本； C_{we} 为储能系统年运行单位容量成本。

2.2.3 全寿命周期成本

根据储能系统的使用寿命和贴现率，将其投资建设成本及年运行维护成本在全寿命周期内进行成本分摊，得到储能系统的费用年值。

$$C_{all} = (C_{inv} + C_{re}) \cdot \frac{r \cdot (1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \quad (6)$$

式中： r 为贴现率； L 为储能系统使用寿命年限。

2.3 储能系统经济性评估总模型

综合式(1)一式(6)建立储能系统收益模型和成本模型，可得到储能系统经济性评估总模型：

$$S_{all} = S_{income} + S_{environment} + S_{allowance} - C_{all} \quad (7)$$

综上所述，本文的储能系统经济性评估总模型构建完毕，整个评估方法的流程图如图2所示。

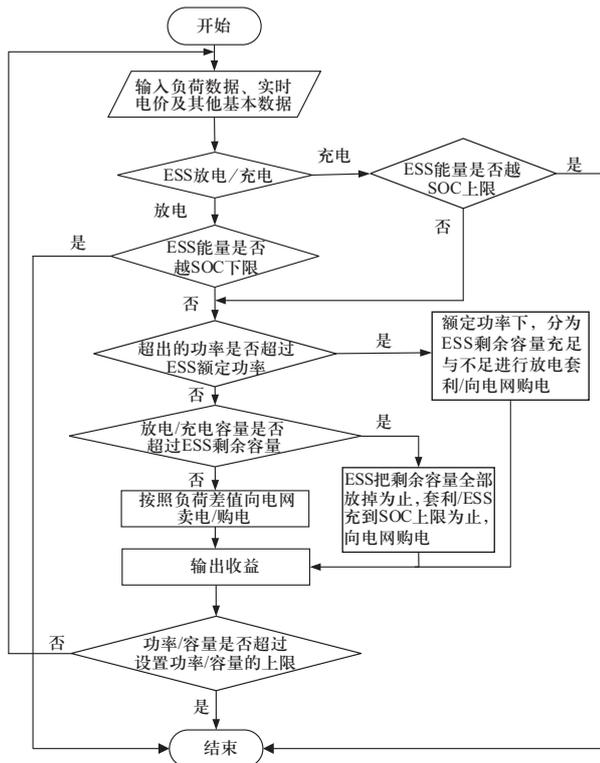


图2 储能系统经济性评估方法的流程图

Fig. 2 Flow chart of economic evaluation method of energy storage system

3 算例分析

3.1 算例条件

算例采用蒙西某区域电网一年的负荷数据，基于储能系统参与削峰填谷以及储能系统提高新能源消纳能力的两种基本应用场景，结合所建立的储能系统经济性评估总模型，运行参数如储能电池相关参数、收益计算相关参数和所设置的峰谷电价差等，如表2—表4所示。在两种不同的应用场景下，继续划分不同的情况，分别对储能系统参与削峰填谷、储能系统提高新能源消纳能力的经济性进行分析。

表2 储能电池相关参数

Table 2 Related parameters of energy storage battery

储能电池类型	循环寿命/次	SOC上下限	单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	单位容量成本/(元·kW ⁻¹)
磷酸铁锂电池	3500~5000	0.2~0.8	2400	2000
铅碳电池	2500~3500	0.3~0.7	1200	1200
全钒液流电池	16 000	0.05~0.95	8000	4000

表3 收益计算相关参数

Table 3 Related parameters of income calculation

参数及单位	取值
贴现率 r	0.07
储能系统运行产生的环境收益系数 α_{soc} /(元·kW ⁻¹)	0.031 4
光伏并网消纳产生的环境收益系数 α_{pv} /(元·kW ⁻¹)	0.08
年运行单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	25
年运行单位容量成本/(元·kW ⁻¹)	0.05
政府补贴(本文取)/(元·kW ⁻¹)	0.55

表4 峰、谷电价

Table 4 Peak-and-valley prices

谷时电价/(元·kW ⁻¹)	峰时电价/(元·kW ⁻¹)	电价差/(元·kW ⁻¹)
0.49	1.00	0.51
0.39	1.00	0.61
0.39	1.10	0.71
0.29	1.10	0.81
0.29	1.20	0.91
0.29	1.30	1.01

3.2 参与削峰填谷的电池储能经济性分析

本文在储能系统参与削峰填谷的应用场景下, 划分以下3个角度进行分析, 角度一是在事先界定储能功率、容量范围内, 对比不同电价差及不同配置下磷酸铁锂电池、铅碳电池、全钒液流电池的收益, 将同等条件下、收益最大的储能电池确定为最终的研究对象。角度二是在确定了储能电池类型后, 储能电池所设置的功率范围在1 kW~5000 kW之间, 容量范围在1 kWh~5000 kWh之间, 研究不同峰谷电价差下, 收益分别达到最大时的储能电池功率、容量配置。角度三是基于目前政府对储能的相关政策补贴, 考虑到未来随着市场化的发展, 新能源发电将进入平价阶段, 故而研究有无政府补贴对储能经济性的影响, 并进一步观察储能各部分收益的占比情况。结合上述条件进行仿真, 得出结论, 具体阐述如下。

3.2.1 不同储能电池在不同配置、不同电价差下收益情况

基于不同储能电池类型, 分析在不同储能配置、不同峰谷电价差下的收益情况, 以此来确定最终所研究的储能电池类型。该场景下, 本文储能配置功率为560 kW~880 kW, 储能配置容量为2800 kWh~4600 kWh, 结果如图3所示。

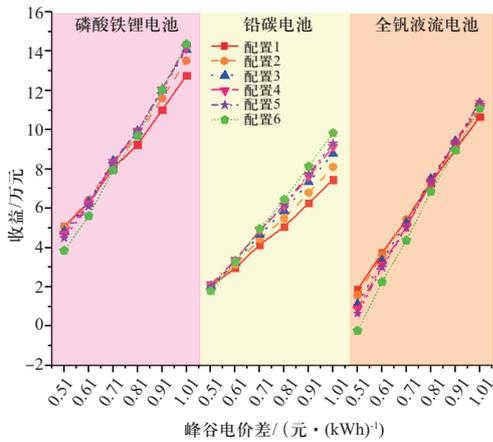


图3 不同储能电池类型在不同电价差及不同配置下的收益对比图

Fig. 3 The income comparison chart of different energy storage battery types under different price difference and different configuration

由图3可以看出, 在相同的储能配置以及相同的峰谷电价差情况下, 磷酸铁锂电池储能的收益较铅碳电池、全钒液流电池的收益高。故在本文所设置的储能功率及容量配置范围内, 磷酸铁锂电池的应用在储

能中具有显著的优势。因此在以下阐述中, 选定的研究对象均为磷酸铁锂电池。

3.2.2 不同电价差下储能收益最大时的最优配置

基于上述内容选定储能电池类型为磷酸铁锂电池, 取不同的峰谷电价差, 该场景下, 储能电池所配置功率为1 kW~5000 kW, 配置容量为1 kWh~5000 kWh。得到储能电池在不同电价差及不同配置下的收益, 如图4所示。

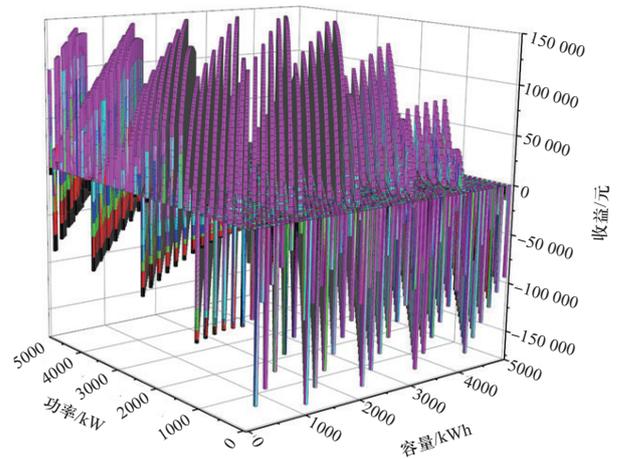


图4 磷酸铁锂电池在不同电价差及不同配置下的收益三维图
Fig. 4 The three-dimensional profit diagram of lithium iron phosphate battery under different price differences and configurations

由图4可得到, 磷酸铁锂电池在不同电价差下收益最大化的储能最优配置, 如表5所示。

表5 磷酸铁锂电池在不同电价差下收益最大化时的最优配置
Table 5 The optimal configuration of lithium iron phosphate battery when the profit is maximized under different price differences

电价差 / (元 · kWh ⁻¹)	最大收益 / 万元	最大收益时 功率/kW	最大收益时 容量/kWh
0.51	5.050 6	561	2901
0.61	6.392 0	641	3301
0.71	8.418 6	720	3800
0.81	9.892 2	721	4001
0.91	12.068 7	801	4201
1.01	14.335 6	881	4801

由表5可得到, 不同电价差下, 储能电池达到最大收益时所对应的最优功率及容量配置。随着峰谷电价差的增大, 储能的收益增加, 与此同时, 最大收益时所对应的储能的配置功率及容量也有所增加。

3.2.3 政府补贴对经济性的影响

以上两个角度的分析均计及政府补贴。“十四五”规划中明确了可再生能源市场化发展的要求,风电、光伏发展将进入平价阶段。故在确定磷酸铁锂电池储能的配置为561 kW/2901 kWh后,首先选择一个月的磷酸铁锂电池储能的充放电功率曲线来观察其出力情况,结果如图5所示;其次对比分析不同峰谷电价差下,有无政府补贴的收益,结果如图6所示。另外根据储能各部分收益占比,进一步考虑政府补贴退出市场可能对储能经济性造成的影响,结果如图7所示。

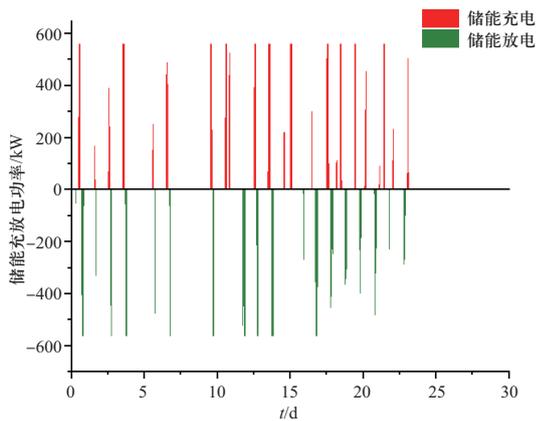


图5 一个月内磷酸铁锂电池储能的充放电功率曲线

Fig. 5 Charge discharge power curve of lithium iron phosphate battery in one month

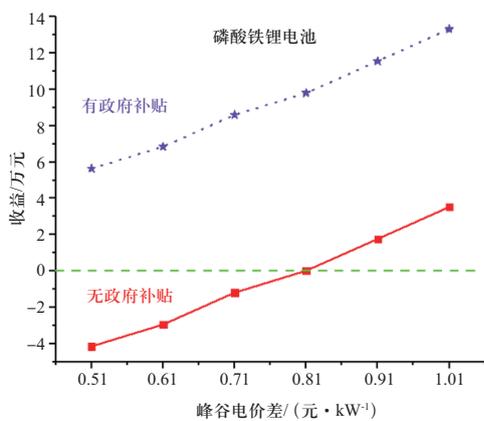


图6 磷酸铁锂电池有无政府补贴下的收益对比图

Fig. 6 Profit comparison chart of lithium iron phosphate battery with government subsidies

由图6可看出,在所选定储能配置下,无政府补贴时,只有当峰谷电价差较大,即超过0.81元/kWh的情况下,储能电池才能实现盈利。

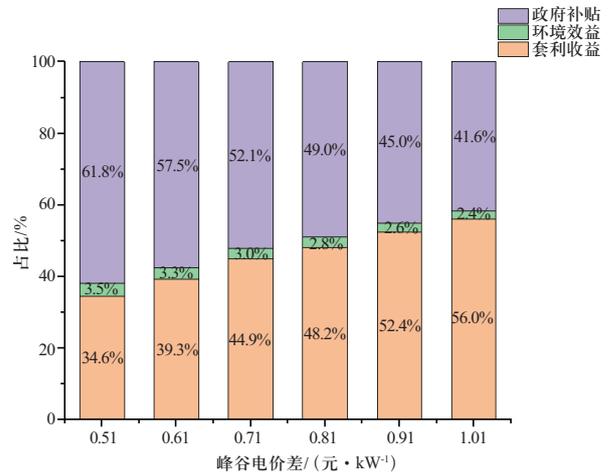


图7 储能各部分收益占比图

Fig. 7 Proportion chart of energy storage revenue

由图7可看出,目前政府补贴在总收益中的比重仍较大,如果政府补贴彻底退出市场,可能还需要一定时间根据相应的政策进行调节,这样储能电池获利才能在一定程度上获得保障。未来随着储能电池的成本逐渐下降,收益也会在一定程度上有所增加。

3.3 提高新能源消纳能力的电池储能经济性分析

基于3.2节所阐述的内容,确定研究对象为磷酸铁锂电池储能系统。本文在储能系统提高新能源消纳能力的应用场景下,划分以下两个角度进行分析。角度一是基于利用储能系统使得配网对光伏所发出电能的消纳程度不同,储能经济性收益也不同,故而考虑在固定电价差及储能配置基础上,研究不同的光伏消纳比例下,储能对应的收益情况,进一步观察储能系统开始获利时所对应的新能源消纳比例。角度二是考虑配网完全消纳新能源,即消纳比例为100%,再选定储能配置为720 kW/3800 kWh,分析不同电价差下储能各部分收益占比情况,并进一步分析政府补贴对经济性的影响。结合上述条件进行仿真,得出结论。其中涉及的新能源消纳比例是指利用储能系统能够使配网对新能源所发出的电能的消纳程度,具体阐述如下。

3.3.1 不同消纳比例下的储能收益

基于固定峰谷电价差为0.71元/kWh,固定储能配置为720 kW/3800 kWh,分析不同光伏消纳比例下的收益,结果如图8所示。

由图8可看出,随着新能源消纳比例的提高,储能系统所获得的收益逐渐增加。在该场景所设条件下,当新能源的消纳比例超过66%时,储能系统才开始盈利。

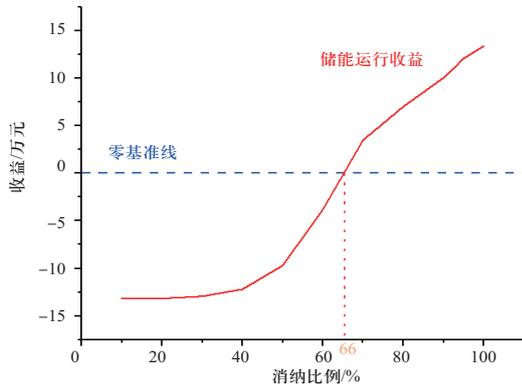


图8 不同光伏消纳比例下的磷酸铁锂电池收益图

Fig. 8 Profit diagram of lithium iron phosphate battery under different photovoltaic consumption ratios

3.3.2 政府补贴对经济性的影响

基于新能源科学合理的消纳是新能源进一步在中国布局发展中的关键, 该分析最大限度地提高配网对新能源的消纳能力, 即设置新能源的消纳比例为100%、固定储能配置为720 kW/3800 kWh的情况下, 分析不同峰谷电价差下储能的各部分收益占比情况。并进一步考虑政府补贴退出市场, 可能对储能经济性造成的影响, 结果如图9所示。

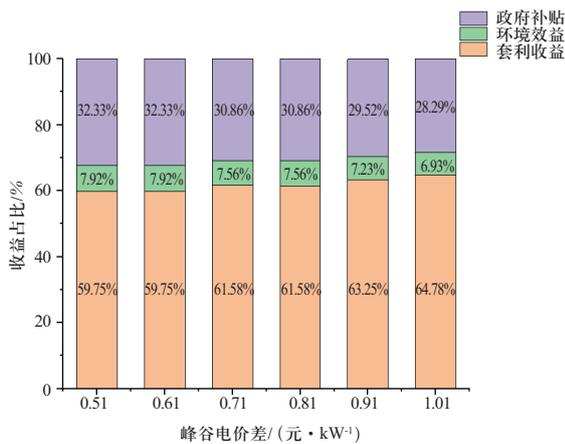


图9 储能各部分收益占比图

Fig. 9 Proportion chart of energy storage revenue

由图9可看出, 在配网完全消纳新能源的条件下, 套利收益占比最大, 政府补贴次之。这是由于所设置新能源的消纳比例为100%, 最大限度地提高了消纳能力的分布式光伏给储能电池进行充电, 并在必要时将储能电池的能量进行释放, 大大节省了向电网购电的部分成本, 故而即使政府补贴退出市场, 储能系统也会在一定程度上盈利。

4 结论

本文通过建立储能系统经济性评估总模型, 对储能系统参与削峰填谷、提高新能源消纳能力两种基本应用场景进行了经济性分析, 得到如下结论。

在储能系统参与削峰填谷的场景中:

1) 在所设置的电价差及功率、容量范围内, 得到了储能电池系统收益达到最大时的储能最优功率及容量配置。

2) 在固定储能配置为561 kW/2901 kWh, 不同电价差情况下, 无政府补贴时, 只有当电价差超过0.81元/kWh时, 储能电池才开始盈利; 另外从占比图中可看出政府补贴所占比重仍较大, 最高可达61.8%。若政府补贴退出市场, 需根据相应的政策进行调节。

在储能系统提高新能源消纳能力的场景中:

1) 在固定峰谷电价差为0.71元/kWh以及储能配置为720 kW/3800 kWh情况下, 随着新能源消纳比例的提高, 磷酸铁锂电池储能系统所获得的收益也有所增加; 且当新能源的消纳比例超过66%时, 储能系统才开始盈利。

2) 在固定储能配置为720 kW/3800 kWh、不同电价差的情况下, 通过收益占比图可得到套利收益占比最大, 政府补贴次之, 故而如若政府补贴退出市场, 储能系统也会在一定程度上盈利。

未来随着储能的相关政策出台及储能成本的逐步降低, 新能源联合储能的方式接入配电网的比例会大幅度增加。本文有关配电网中储能参与多场景的多维经济性评估, 可为光储联合系统并入配电网的经济性分析提供有效的借鉴。另外通过本文的分析, 可以看出政府补贴仍然是储能经济性获利的必不可少的一部分。然而随着市场化的发展, 未来新能源发电将会进入平价阶段, 因此本文分析政府补贴对经济性的影响是必要的。

参考文献

- [1] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等. 储能系统容量优化配置及全生命周期经济性评估研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 1-13.
LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LYU Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 1-13(in Chinese).
- [2] 修晓青. 储能系统容量优化配置及全生命周期经济性评估

- 方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [3] 蒋建慧, 倪志春, 陈成锦, 等. 户用光伏+储能系统的容量配置及经济性计算方法研究[J]. 太阳能, 2020(11): 44-48. JIANG Jianhui, NI Zhichun, CHEN Chengjin, et al. Capacity configuration and economic calculation of household PV + storage energy system[J]. *Solar Energy*, 2020(11): 44-48(in Chinese).
- [4] 刘永前, 梁超, 阎洁, 等. 风-光伏电站中储能系统混合最优配置及其经济性研究[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 143-150. LIU Yongqian, LIANG Chao, YAN Jie, et al. Optimal configuration and economic study of hybrid energy storage system in wind and solar power plants[J]. *Electric Power*, 2020, 53(12): 143-150(in Chinese).
- [5] 史林军, 杨帆, 刘英, 等. 计及社会发展的多场景用户侧储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 59-66. SHI Linjun, YANG Fan, LIU Ying, et al. Multi-scenario user-side energy storage capacity optimization configuration considering social development[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 59-66(in Chinese).
- [6] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29-35. SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(1): 29-35(in Chinese).
- [7] 倪驰昊, 刘学智. 光伏储能系统的电池容量配置及经济性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(1): 1-10. NI Chihao, LIU Xuezhi. Battery capacity configuration and economic analysis of photovoltaics energy storage system[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(1): 1-10(in Chinese).
- [8] 沈汉铭, 俞夏欢. 用户侧分布式电化学储能的经济性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 50-54. SHEN Hanming, YU Xiahuan. Economic analysis of distributed electrochemical energy storage on the user-side[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(5): 50-54(in Chinese).
- [9] 林申力, 王子璇. 供电局储能系统经济性分析[J]. 电工技术, 2019(7): 28-32. LIN Shenli, WANG Zixuan. Economic analysis of energy storage systems invested by a power supply bureau[J]. *Electric Engineering*, 2019(7): 28-32(in Chinese).
- [10] 孙舟, 田贺平, 王伟贤, 等. 梯次利用电池储能系统参与用户侧削峰填谷的经济性研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 95-100. SUN Zhou, TIAN Heping, WANG Weixian, et al. Research on economy of echelon utilization battery energy storage system for user-side peak load shifting[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(4): 95-100(in Chinese).
- [11] 徐岩, 何宸, 付超, 等. 多种调度模式下的光储电站经济性最优储能容量配置分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1632-1640. XU Yan, HE Chen, FU Chao, et al. Analysis of energy storage capacity allocation considering optimal economy of PV & battery cogeneration system under different scheduling modes[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(6): 1632-1640(in Chinese).
- [12] 郭莉, 薛贵元, 吴晨, 等. 储能系统应用于削峰填谷的经济效益分析研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(5): 31-34. GUO Li, XUE Guiyuan, WU Chen, et al. Research on economic evaluation of energy storage applied to load shift[J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(5): 31-34(in Chinese).
- [13] 贾禾, 彭晋卿, 李念平, 等. 动态电价下分布式光伏-储能系统优化与经济性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 187-193. JIA He, PENG Jinqing, LI Nianping, et al. Optimization and economic analysis of distributed photovoltaic-energy storage system under dynamic electricity price[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(5): 187-193(in Chinese).
- [14] 于淼, 王宏伟, 马洪兵. 基于改进遗传算法的储氢容量优化[J]. 水力发电, 2021, 47(7): 95-98. YU Miao, WANG Hongwei, MA Hongbing. Optimization of hydrogen storage capacity based on improved genetic algorithm[J]. *Water Power*, 2021, 47(7): 95-98(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 赖春艳, 陈宏, 倪嘉茜, 等. 锂离子电池储能技术在电力能源中的应用模式与发展趋势[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(4): 380-384. LAI Chunyan, CHEN Hong, NI Jiashan, et al. The application of lithium ion battery energy storage technology in electric power energy and its development trend[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2021, 37(4): 380-384(in Chinese).
- [17] DONG L, SANG Z C, LI P, et al. Capacity optimization and economic evaluation of battery energy storage system for Qinghai Province based on time series simulation technology[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. October 30-November 1, 2020, Wuhan, China. IEEE, 2020: 1768-1773.
- [18] STECKEL T, KENDALL A, AMBROSE H. Applying leveled cost of storage methodology to utility-scale second-life lithium-ion battery energy storage systems[J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117309.
- [19] QIAN K J, ZHOU Z K, SONG J, et al. An economic evaluation model for user-side energy storage considering uncertainties of demand response[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference. November 29-December 2, 2020, Nanjing, China. IEEE, 2020: 3221-3225.
- [20] JIANG K, ZHANG X Z, SU L, et al. Comprehensive economic benefit assessment method and example of energy storage based on power grid[C]//2019 IEEE Sustainable Power and

Energy Conference (iSPEC). November 21-23, 2019, Beijing, China. IEEE, 2019: 2287-2292.

- [21] 李军徽, 张嘉辉, 李翠萍, 等. 参与调峰的储能系统配置方案及经济性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4148-4160.

LI Junhui, ZHANG Jiahui, LI Cuiping, et al. Configuration scheme and economic analysis of energy storage system participating in grid peak shaving[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4148-4160(in Chinese).

- [22] 赵伟, 袁锡莲, 周宜行, 等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 16-24.

ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 16-24(in Chinese).

- [23] 李军徽, 范兴凯, 穆钢, 等. 应用于电网调频的储能系统经济性分析[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 355-360.

LI Junhui, FAN Xing kai, MU Gang, et al. Economic analysis of energy storage applied to grid frequency regulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 355-360(in Chinese).

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2022-02-19。



李翠萍

作者简介:

李翠萍(1982), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与储能技术。

李军徽(1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电与储能技术。通信作者, E-mail: lijunhui@neepu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)