

计及外部性的储能系统价值测算及经济性评估

赵会茹¹, 陆昊¹, 张士营¹, 王玉玮²

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学(保定) 经济与管理系, 河北 保定 071003)

摘要:以应用在电力系统中的电储能系统为研究对象, 以外部性理论为基础, 构建了计及外部性的储能系统价值测算模型, 并以储能系统接入光伏电站为例, 采用贴现现金流分析方法, 预估储能投资成本和收益, 分别从投资者角度和社会整体效益角度, 来研究储能系统应用在可再生能源发电侧的经济性, 并进行了盈亏平衡分析。通过盈亏平衡曲线分析了储能盈亏平衡情景, 经济性分析结果显示储能系统的外部性收益占年收益比例较大。

关键词:储能系统; 外部性; 综合价值; 贴现现金流; 光伏发电

中图分类号: F062.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2020)10—0019—09

随着储能示范项目在全球范围的开展, 储能系统在不同应用场景下的功能逐渐清晰, 但储能系统尚未实现商业化推广, 制约因素主要包括: 储能系统成本较高, 市场机制尚未理清, 储能应用收益衡量较为困难^[1]。将储能应用到电力系统的任一位置, 一般会对其他环节产生一定的效益, 表现出正外部性特征。例如, 用户侧安装的储能系统, 不仅能够实现削峰填谷、降低系统高峰负荷峰值^[2], 还可以延缓输配电设备升级^[3], 降低煤耗^[4], 减少温室气体排放^[5], 提高现有机组利用率^[6], 延缓新建峰荷机组, 降低电力系统生产成本等^[7]。

对于如何评估储能系统的经济性, 进而对其综合效益进行评价, 目前大部分研究在建模过程中均是收益最大化作为目标函数^[8]。Vahid-Pakdel等^[9]考虑了储能系统的套利、节约传输费用、延缓机组投资以及降低运维费等特点, 构建了开放市场环境下储能系统的经济效益评估模型, 同时结合遗传算法, 运用线性规划分析了其能够实现的效益和最佳的配比, 但缺少对环境影响的分析。曾鸣等^[10]以火电机组为例, 构建了含蓄电池的储能系统的经济调度控制模型, 以燃料费节省最大额为目标函数, 利用多维动态规划算法对储能系统的最佳规模和调度策略进行了求解。

王再闯^[11]和刘成运等^[12]以经济效益最大化为目标, 针对储能系统的低储高发以及备用收入等方面, 分别以10MW/70MWh的钒电池和钠硫电池为例, 建立了储能系统最佳运行策略的混合整数非线性规划模型, 基于通用代数模型系统(GAMS)对其运行方式和最佳的激励策略进行了分析, 在此基础上计算了系统的年收益。Ding^[13]和田崇翼等^[14]计算和分析了包含储能和分布式电源的微网运行的综合效益, 并考虑了储能在紧急备用中的可靠性, 但其中涉及的储能价值不够全面。孟虹年和谢开贵^[15]针对不同类型的储能在电力系统中的应用进行了稳定性和可靠性的分析, 同时计算求解了相关参数的灵敏度。

目前对于储能系统的价值评估缺乏较为综合全面的研究, 大部分是针对储能设备在电力系统中的经济效益进行测算, 或是对电力系统各个环节设置储能的可靠性进行分析。同时, 国外现有的上述相关研究中也只是对于储能系统在某一环节或者某一领域的单方面评价, 并没有对其涉及的其他环节的综合效益进行更为系统的评估^[16-17]。国内现有研究也集中于关于储能经济效益与可靠性的评估, 在储能的规划、选址定容以及综合应用方面也有相关的研究。但在储能系统的运行效益评估模型方面, 国内相关研究还很少, 且模型的准确度也不高^[18-20]。在评估储能系统的应用效益时, 未能考虑其对于环境的外部性影响, 评估系统不够全面。

现阶段, 储能经济性的研究主要在于储能投资收益的评估, 明确储能电站所能实现的收益构成, 全面衡

收稿日期: 2020—03—05

基金项目: 国家自然科学基金“考虑电力供需双侧不确定性的电化学储能系统综合价值测度及激励机制研究”(71973043); 中央高校基本科研业务费专项资金“储能在电力系统中多重应用的综合价值研究”(2019QN077); 河北省自然科学基金“多元随机干扰下微能源网运行优化及供能价格决策模型研究”(G2020502004)

作者简介: 赵会茹(1963—), 女, 北京人, 博士, 教授, 研究方向: 电力市场理论及应用技术等; (通讯作者) 陆昊(1993—), 男, 吉林敦化人, 博士研究生, 研究方向: 能源管理理论与应用; 张士营(1995—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向: 电力市场理论及应用技术等; 王玉玮(1986—), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 研究方向: 电力市场理论及应用技术等。

量储能价值。以目前的电力市场改革为背景,在各种相关政策的驱动下,需要进一步分析储能在电力系统中的各应用场景下收益的测算模式和测算方法,进而为相关行业决策者明确储能在这些场景中应用的收益水平和回收期等指标提供依据。同时,对各场景下储能应用的经济效益的评估研究能够作为相关的补贴政策、行业标准、价格制定等的参考和借鉴,避免政策制定过程中的盲目性,进而切实推动储能产业的发展。因此,对我国储能产业进行研究,测算储能系统给电力系统带来的综合价值,特别是储能系统对提升可再生能源消纳的效益评估,值得深入研究。

一、储能系统的外部性价值分析

开放的市场环境中,某一主体在经济活动过程中的某些行为给外界其他主体造成了一定的影响,这种影响不能直接由交易或者价格来反映,称为储能系统的外部性。随着时代的发展,人们对外部性理论的认识也逐步深入。随着时间的推移,对于外部性原因的认知也发生了变化,20世纪70年代以前,人们将外部性归因于个人或社会成本的偏离,应有相关政策对此进行管制。20世纪70年代人们认为外部性是由于产权的不清晰导致的,可以通过推进市场化以及明确的产权界定手段来避免。20世纪90年代,人们发现交易成本是造成外部性的本质原因,应利用一系列非正式的手段进行解决。

储能系统在电力系统中运行后,其外部性影响涉及主体主要有4类:发电厂商、电网公司、电力用户和外部环境。通常来讲,储能系统在运营过程都会对上述4类主体形成一定程度的影响。但是,由于储能系统所提供的服务十分广泛,在提供服务的主体不同时,某些影响可以从提供服务的成本中体现出来外部性会因此内部化,即转化为储能服务的内在因素;而其他没有内部化的影响,即产生的外部性影响也因提供主体不同而不同,见表1。

表1 电力系统中储能服务的提供主体及外部性作用主体

提供主体	发电厂商	电网公司	电力用户	外部环境
发电厂商	内部化	外部化	外部化	外部化
电网公司	外部化	内部化	外部化	外部化
电力用户	外部化	外部化	内部化	外部化
储能厂商	外部化	外部化	外部化	外部化

本文以储能厂商为提供储能服务的主体为例进行分析。假设电化学储能系统由独立的储能提供商来供给,不隶属于发电企业、电网公司或者用户,这样的设定既符合储能产业未来发展的路径和模式,又可以全面考量电化学储能系统给可再生能源发电商、电网运营者、电力用户等电力系统多元利益主体和社会带来的外部价值。若电化学储能系统是由某一电力系统利益主体提供时,如可再生能源发电商,那么依据外部性理论可知,储能给可再生能源发电厂商带来的减少弃电量、增加上网电量等效益会内部化,将不再是外部价值。

(一) 储能系统给发电企业带来的正外部性分析

储能系统在发电领域可提供辅助服务,平缓发电曲线,这些服务可以平稳发电机组出力,进而使得发电机组的运行变得更加经济和高效。由于并网的可再生能源发电诸如风电、光伏发电等规模不断增大,给电网的安全稳定运行以及供电质量产生了较大的负面影响。因此保证此类可再生能源发电的可靠性,需要配置一定容量的储能装置,在对可再生能源发电进行缓冲的同时,能够在很大程度上减小其对电网的冲击性,进而扩大风电和光伏发电的并网比例,增大可再生能源发电的调节能力,提高其就地消纳或者外送能力,最大限度促进可再生能源的利用率。

(二) 储能系统给电网公司带来的正外部性分析

发电企业结合储能系统可以改善可再生能源的并网能力,同样电网公司也可以结合一定容量的储能装置改善电能的输送能力。例如,为了保证系统的安全稳定运行,电网公司需要定期投资配置一定电网设备,当配置一定容量的储能装置或将储能装置与一些电力电子设备相融合,可以减小输电线路的容量损失,有效地缓解系统震荡,也能达到保证系统安全稳定运行的目的,进而减少或延缓投资新建线路产生的费用,进而获得极大的经济效益。

(三) 储能系统给电力用户带来的正外部性分析

对于配有储能装置的电网系统,在电能的传输过程中,可以根据不同类型储能的特点,针对系统发生的变化,及时有效地通过调控储能相关参数减小电压波动及闪变,进而避免出现系统中的电压暂降和暂升现象,提升供电质量,改善用电可靠性。对于一部分负荷敏感的用户,储能设备可以作为不间断电源,保证供电的持续性。此外,电力用户在使用储能系统时能够实现谷时充电峰时放电,可以由于现存的峰谷电价差带来经济收益,在未来电力市场环境下减少电价波动给用户自己带来的影响。

(四) 储能系统给环境带来的正外部性分析

储能系统提高了可再生能源并网能力,实现了可再生能源的就地消纳和外送,使得可再生能源的使用更加深入和广泛。可再生能源发电量的增加,会代替相应的传统火力发电机组的发电量,所以会减少火电机组所消耗的化石燃料,最终减少火电机组大气污染物的排放,减少了对环境的破坏。所以,储能系统的使用会对环境产生正外部性。

二、计及外部性的储能价值测算及经济性评估模型构建

(一) 储能系统综合价值测算模型

1. 储能系统自身价值测算

(1) 运行效益。储能系统应用在电力系统中不同场景充放电运行时,储能运营商直接获得的经济效益主要是低储高发的运行效益,计算如式(1)、式(2)所示:

$$W_E = \sum_{t=1}^T p_t P_{dis,t} \Delta t - p_t P_{ch,t} \Delta t \quad (1)$$

$$W_1 = \sum_{i=1}^{365} W_{E,i} \quad (2)$$

其中: W_E 和 W_1 表示储能系统的“低储高发”运行典型日效益和年效益; T 为调度总时段; p_t 表示第 t 时段的电价; $P_{dis,t}$ 和 $P_{ch,t}$ 表示 t 时刻储能系统的充电功率和放电功率; Δt 表示第 t 时段的时间间隔。

(2) 辅助服务效益。储能系统进行充放电运行的同时,在电力系统中也可以满足系统调峰、调频等需求,为系统提供辅助服务。这部分辅助服务收益计算如式(3)所示:

$$W_2 = C_{EP} E_{pd} + C_{EF} E_{fd} \quad (3)$$

其中: C_{EP} 表示储能调峰单位电量补偿价格; E_{pd} 表示储能在峰时段参与调峰的年放电电量; C_{EF} 表示储能调频单位电量补偿价格; E_{fd} 表示储能在一年内的调频有效调节电量。

2. 储能系统给发电企业带来的外部价值测算

当储能系统安装在新能源发电侧运行时,能够有效增加可再生能源消纳,这部分效益计算如式(4)所示:

$$W_3 = \lambda_r \Delta E_{PW} \quad (4)$$

其中: W_3 表示储能系统增加可再生能源并网发电的社会收益; λ_r 表示可再生能源上网电价; ΔE_{PW} 表示为储能提高的可再生能源年上网电量或减少的年弃电量。

3. 储能系统给电网公司带来的外部价值测算

延缓电网设备投资效益的计算如式(5)所示:

$$W_4 = C_d \eta P_{max} \quad (5)$$

其中: W_4 表示储能系统在延缓电网设备投资效益; C_d 表示电网设备折旧后的单位容量造价; η 表示储能装置的等效转化效率。

4. 储能系统给电力用户带来的外部价值测算

储能系统利用用电价差给用户带来经济效益的计算思路与运行效益一致,方法参考式(1)、式(2),提高用户用电质量及可靠性方面,体现在减少电力用户的停电损失所带来的收益,其计算方法如式(6)所示:

$$W_5 = v_{ul} (LF_E - LF) \quad (6)$$

其中: W_5 表示储能系统减少电力用户停电损失的收益; LF 和 LF_E 分别表示储能系统投运前后的用户年停电电量; v_{ul} 表示用户的单位电量停电损失。

5. 储能系统给环境带来的外部价值测算

减排效益如式(7)所示:

$$W_6 = \sum_{i=1}^n (V_{ei} \times Q_i) \quad (7)$$

其中: W_6 表示储能系统的减排效益; V_{ei} 表示第 i 项储能系统减少排放污染物的环境价值; n 表示污染物总数; Q_i 表示第 i 项污染物的排放量。

6. 残值

$$W_7 = \lambda_c C_T \quad (8)$$

其中: W_7 表示储能系统的残值; λ_c 表示储能期末回收残值率; C_T 表示储能系统的初始投资成本。

7. 总效益

总经济效益计算如式(9)所示:

$$W_{\text{total}} = \sum_{i=1}^7 W_i \quad (9)$$

需要说明的是,由于目前储能容量和实际运行的技术限制, W_1 和 W_2 在统计时具有互斥性,即储能价值的运行效益和辅助服务收益不能同时存在。

(二) 储能系统的成本测算模型

1. 投资成本

$$C_1 = (k_p P_{\text{max}} + k_E P_{\text{ess}}^E) \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

其中: C_1 表示储能系统的总投资成本; k_p 表示电能转换设备的单位造价; k_E 表示电池系统的单位造价; P_{max} 表示电能转换设备系统容量; n 表示电池储能系统循环寿命; P_{max} 表示储能项目投资收益率; P_{ess}^E 表示储能系统的额定容量。

2. 运行维护成本

$$C_2 = C_m Q \quad (11)$$

其中: C_2 表示运行维护成本; m 表示输出 1kWh 电能的运行维护成本; Q 表示储能系统年输出电量。

3. 总成本

总成本计算如式(12)所示:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^2 C_i \quad (12)$$

贴现现金流中的投资回收期 T_p 、费用现值 PC 、费用年值 AC 、净现值 NPV 和内部收益率 IRR 的计算方法及公式采用傅家骥和全允桓^[21]的方法。

(三) 储能接入光伏电站优化运行模型

储能系统在电力系统中具体应用的场景,决定了储能系统外部性价值的实现程度和价值的计量大小。例如,储能应用在可再生能源发电侧,其主要外部性收益为增加可再生能源消纳效益 W_3 ;若应用在电网峰谷差大,输电能力受限,老旧电网增容改造成本很高的地区时,其主要外部性收益为延缓电网设备投资效益 W_4 ;若应用在用户用电质量和安全稳定要求高的用户侧时,其主要外部性收益为储能系统减少电力用户停电损失的收益 W_5 。

本文以储能系统接入发电侧的光伏电站为例,分别构建光伏电站优化运行模型和储能电站优化运行模型,求得典型日下储能接入前后光伏电站的上网电量以及储能的充放电量,再以年为周期进行统计后,结合经济价值测算模型和成本测算模型及经济性评估方法完成计及外部性的储能系统价值测算及经济性评估。

1. 光伏电站优化运行模型

我国对可再生能源发电存在倾斜的调度规则,可再生能源发电吸纳率也是各电网运行绩效的重要指标,本文中假设光伏电站的实际出力按标杆电价结算,实际出力与日前申报计划间的偏差造成的备用费用光伏电站自己承担。配电网在全额收购申报电量的基础上,需要向常规机组购买剩余电量以满足负荷达到系统平衡。

光伏电站的收益由实际上网电量收入和其出力偏差调用系统备用的费用两部分组成,在运行时其目标函数为收益最大:

$$\max W_{\text{pv}} = \max \left[\sum_{t=1}^T p_{\text{pv}} P_{\text{pv},t}^R \Delta t - p^+ f(\Delta P_{\text{pv},t}) \Delta t - p^- f(-\Delta P_{\text{pv},t}) \Delta t \right] \quad (13)$$

$$\Delta P_{\text{pv},t} = P_{\text{pv},t}^B - P_{\text{pv},t}^R \quad (14)$$

其中: $P_{\text{pv},t}^B$ 表示 t 时刻风电和光伏申报出力; $P_{\text{pv},t}^R$ 表示 t 时刻下风电和光伏的实际出力; p_{pv} 表示光伏的标杆电价; $\Delta P_{\text{pv},t}$ 表示 t 时刻下光伏计划和实际出力的偏差; p^+ 和 p^- 表示上调和下调备用价格; $f(x)$ 表示分段函数:

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

约束条件包括以下几方面：

(1)出力约束。

$$0 \leq P_{PV,t}^R \leq P_{PV,t}^{\max} \quad (16)$$

其中： $P_{PV,t}^{\max}$ 表示 t 时刻下光伏最大出力。

(2)弃光约束。

$$\sum_{t=1}^T P_{PV,t}^R \geq (1 - \mu_{APV}) \sum_{t=1}^T P_{PV,t}^{\max} \quad (17)$$

其中： μ_{APV} 表示弃光率上限值。

(3)平衡约束。

$$P_{PV,t}^R + P_{G,t} = L_t \quad (18)$$

其中： $P_{G,t}$ 表示 t 时刻电网内其他发电商的出力； L_t 表示 t 时刻该区域的负荷。

2. 储能系统优化运行模型

储能电站作为独立运营的主体接入光伏电站时,其以自身收益 W_E 最大为目标进行充放电运行,其目标函数为

$$\max W_E = \max \left[\sum_{t=1}^T (p_t - c_m) P_{dis,t} \Delta t - (p_t + c_m) P_{ch,t} \Delta t \right] \quad (19)$$

其中： p_t 表示常规电源 t 时刻的上网电价。

约束条件包括：

(1)储能约束。为了便于计算,在储能调度时给予一个合理的初始剩余电能量 E_0 ,而在一个周期 T 内的充放电运行之后,剩余能量仍为 E_0 。这样既有助于模型优化求解,又保证了计算结果具有时间上的连续性,输出的策略能够让电储能连续的参与调度运行。

$$\begin{cases} P_{ess}(t) = E_0, & t = 1, 24 \\ P_{ess}(t) = E_0 + \left[u_{ch} P_{ch,t} - \left(\frac{1}{u_{dis}} \right) P_{dis,t} \right] \\ \Delta t - P_{loss}(t) + P_{ess}(t-1), & 2 \leq t \leq 23 \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{loss}(t) = \mu_{loss} P_{ess}(t) \quad (21)$$

$$P_{ess}^{\min} \leq P_{ess}(t) \leq P_{ess}^{\max} \quad (22)$$

$$P_{ess}^E r_E^{\min} \left(\frac{1}{u_{ch}} \right) I_{ch}(t) \leq P_{ch,t} \leq P_{ess}^E r_E^{\max} \left(\frac{1}{u_{dis}} \right) I_{ch}(t) \quad (23)$$

$$P_{ess}^E r_E^{\min} u_{dis} I_{dis}(t) \leq P_{dis,t} \leq P_{ess}^E r_E^{\max} u_{dis} I_{dis}(t) \quad (24)$$

$$0 \leq I_{ch}(t) + I_{dis}(t) \leq 1 \quad (25)$$

其中： $P_{ess}(t, s)$ 和 $P_{loss}(t, s)$ 表示储能 t 时段储能系统的剩余电量和损失电量； r_E^{\min} 、 r_E^{\max} 、 μ_{loss} 、 u_{ch} 和 u_{dis} 分别表示储能系统的爬坡率下限、爬坡率上限、能量损失率、充电效率和放电效率； P_{ess}^{\min} 和 P_{ess}^{\max} 表示储能系统的最小和最大剩余电量； $I_{ch}(t)$ 和 $I_{dis}(t)$ 是0-1变量,代表储能系统在 t 时段下的充放电状态,其中当 $I_{ch}(t)$ 为1时,代表处于充电状态,为0时处于不充电状态； $I_{dis}(t)$ 为1时,表示处于放电状态,为0时处于不放电状态。式(21)代表了储能在实际运行状态下的自然能量消耗。式(25)确保电储能装置不会在某一时段处于同时充电和放电状态。

(2)平衡约束。

$$P_{PV,t}^R + P_{G,t} - P_{ch,t} + P_{dis,t} = L_t \quad (26)$$

(3)其他约束。上文光伏电站优化运行模型中的式(16)、式(17)。

三、算例分析

本文以储能应用在可再生能源发电侧的光伏电站为例,采用贴现现金流分析方法,预估储能投资成本和收益,分别从不计及外部性的投资者角度和计及外部性的社会角度,分析储能系统在光伏电站中应用的经济

性。由于选取储能应用在发电侧的场景,储能减少用户停电损失难以衡量,为计算其对光伏电站的外部价值,储能运行商实际运行时只考虑自身收益最大化进行充放电运行,并不是以为光伏电站提供辅助服务为目的进行充放电运行,光伏电站仍需向电网购买辅助服务,因此在算例中不予计算减少电力用户停电损失的收益 W_3 和辅助服务收益 W_2 。

(一)算例参数

某地光伏电站容量为 25MW,光伏电站安装了 1MW/6MWh 的锂离子储能系统。该锂离子储能系统寿命为 10 年,期末回收残值率为 10%。依据《国家发展改革委关于完善光伏发电上网电价机制有关问题的通知》选取光伏上网标杆电价是 0.55 元/kWh。分时电价选取某地常规电源峰平谷电价。贴现率选取 8% 进行经济性分析指标的计算。典型日的负荷及光伏出力如图 1 和图 2 所示。其他算例参数见表 2。

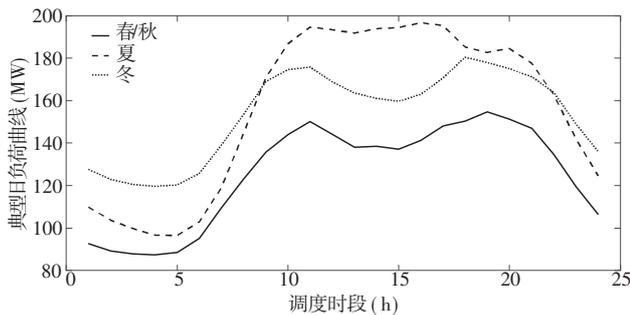


图 1 典型日负荷曲线

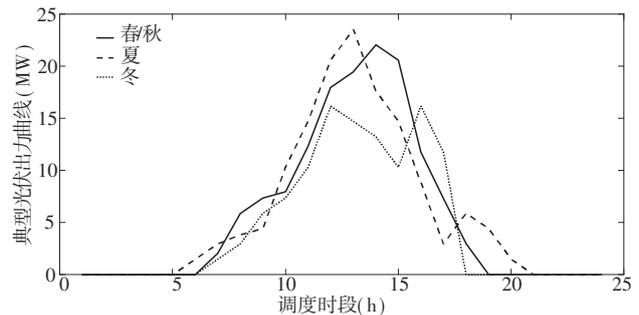


图 2 典型日光伏出力曲线

表 2 算例系统参数

参数	数值	参数	数值
初始剩余能量	3000kWh	储能电池系统成本	1400 元/kWh
储能充电效率	0.9	储能转换设备成本	350 元/kW
储能放电效率	0.9	运维成本	0.05 元/kWh
储能能量损失率	0.03	储能爬坡下限值	100kW/h
储能剩余能量下限	300kWh	储能爬坡上限值	1000kW/h
储能剩余能量上限	5450kWh	弃光率上限值	0.15
上调备用价格	1.2 元/kWh	下调备用价格	0.5 元/kWh

延缓设备投资方面的收益,由于储能系统通常并到 35kV 电压等级,结合某地电网公司的投资数据,以 35kV 计算,该项收益为 1383.91 元/kW,参考数据及折算方法参考孙威等^[22]的相关研究。储能系统减少 SO₂、NO_x、CO₂、CO、粉煤灰、炉渣、悬浮颗粒物等污染物排放所带来的环境效益^[22]为 0.11 元/kWh,具体见表 3。

表 3 常规燃煤机组的环境成本

项目	价值标准 (元/kg)	常规燃煤发电	
		单位排放 (g/kWh)	单位成本 (元/kWh)
SO ₂	6.00	8.56	0.0514
NO _x	8.00	3.80	0.0304
CO ₂	0.023	822.80	0.0192
CO	1.00	0.12	0.0001
TSP	2.20	0.19	0.0004
粉煤灰	0.12	52.29	0.0063
炉渣	0.10	14.26	0.0014
合计			0.1092

注:数据来源于文献[22]。

(二)经济性分析结果

本文运用 MATLAB 软件中的 YALMIP 工具箱进行模型求解。不计及外部性的投资者角度和计及外部性的社会角度的储能系统接入新能源发电经济性计量结果见表 4 和表 5。

从不计及外部性的投资者角度来看,该算例中的锂离子储能系统投资者的投资净现值为负,也就是说投

资该锂离子储能系统,投资者最终会亏损415.49万元,该锂离子储能系统投资的内部收益率为-3.27%。

从计及外部性的社会角度来看,该算例中的锂离子储能系统最终会得到260.94万元的收益,经过7.28年就可收回初期的全部投资,该锂离子储能系统投资的内部收益率为14.00%,大于本文选取的基准折现率8%,因此从计及外部性的社会角度来看该锂离子储能系统经济性良好。

由表5可见,目前储能系统应用在发电侧,为可再生能源发电厂商提供服务时,自身运行效益 W_1 和增加可再生能源消纳效益 W_3 是收益的主要部分,占总收益的75%左右。随着电力辅助服务市场价格机制的不断完善,如调峰调频补偿价格的确定,储能系统提供辅助服务的收益也能够进行计量,未来储能的经济性还会进一步提高。

(三)盈亏平衡分析

储能系统的成本、储能服务市场的价格、储能系统的商业运行模式、储能系统的补贴政策和储能系统的应用场景等因素都会对储能系统经济价值的实现和测算产生影响。目前来看,储能系统的成本随着技术的发展在逐渐降低,储能提供辅助服务也将随着电力辅助服务市场逐步形成与完善获得收益。未来储能成本的降低和储能参与辅助服务获得收益会影响储能自身的经济性,因此本文以目前储能收入和成本情况(表4)为基准,储能辅助服务收益较目前储能自身收益的增加比率为 x 轴,储能成本变化比率为 y 轴,当储能项目净现值为0时,储能系统盈亏平衡曲线如图3所示。

由图3可知,在该曲线上的所有储能辅助服务收益较目前储能自身收益的增加比率和成本变化比率的组合,都能使得储能项目达到盈亏平衡。例如,当成本维持当前水平时,储能辅助服务收益需增加到当前储能运行收益的98.43%才能够达到盈亏平衡;当储能辅助服务收益为0时,储能成本需要减少当前成本的49.79%才能够达到盈亏平衡。当储能辅助服务收益较目前储能自身收益的增加比率和成本变化比率的变化场景落到曲线以下时,投资者投运储能系统开始盈利,例如,当储能辅助服务收益需增加到当前储能运行收益的60%以上,同时储能成本减少当前成本的20%以下,投资储能项目是盈利的。

表4 储能接入新能源发电经济性计量结果(投资者角度)

项目名称		总计
现金流出	初始投资成本 C_1	875万元
	运行维护成本 C_2	0.47万元
	费用年值	130.87万元
	现金流出现值	878.15万元
现金流入	运行效益 W_1	62.91万元
	残值 W_7	87.5万元
	年收益	62.91万元
	现金流入现值	462.66万元
经济性分析指标	财务净现值 NPV	-415.49万元
	投资回收期 T_p	—
	财务内部收益率 IRR	-3.27%

表5 储能接入新能源发电经济性计量结果(社会角度)

项目名称		总计
现金流出	初始投资成本 C_1	875万元
	运行维护成本 C_2	0.47万元
	费用年值	130.87万元
	现金流出现值	878.15万元
现金流入	运行效益 W_1	62.91万元
	增加可再生能源消纳效益 W_3	60.94万元
	延缓电网设备投资效益 W_4	27.68万元
	减排效益 W_6	12.19万元
	残值 W_7	87.5万元
	年收益	163.72万元
	现金流入现值	1139.09万元
经济性分析指标	经济净现值 NPV	260.94万元
	投资回收期 T_p	7.28万元
	经济内部收益率 IRR	14.00%

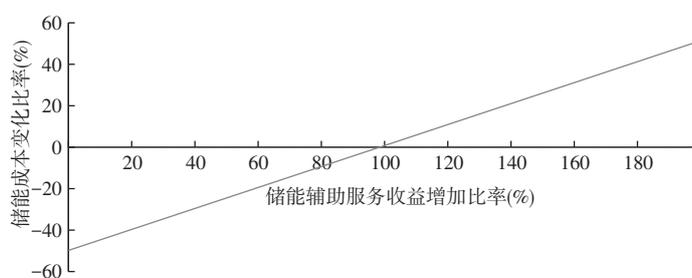


图3 储能系统盈亏平衡曲线

四、结论

本文以应用在电力系统中的电储能系统为研究对象,以外部性理论为基础,构建了计及外部性的储能经济性测算模型,并以储能系统接入光伏电站为例,采用贴现现金流分析方法,预估储能投资成本和收益,分别从不计及外部性的投资者角度和计及外部性的社会角度,来研究储能系统应用在可再生能源发电侧的经济性。

通过结果对比可知,储能系统的外部性价值能否得到补偿,是储能产业初期能够健康发展需要解决的关键问题。若不考虑储能系统外部性价值,对于投资者来说,投资储能系统项目,在寿命期内无法收回投资成本,不具有经济效益,投资吸引力较差。但是从社会整体角度来看,储能项目的自身和外部性收益是能够覆盖其成本的。

随着储能技术的不断发展,其成本在逐年下降。同时,储能若干商业模式的探索与完善,使得储能系统能够更加广泛地应用于电力系统中,逐渐实现商业化。并且伴随电力市场机制逐渐理顺和储能扶持政策的不断推进,其调峰调频、黑启动等辅助服务及提高用户用电质量和辅助用户需求响应的服务价格也能够逐渐确定,未来储能的综合价值也会进一步增加,投资储能系统的收益也会越来越高。而探索储能系统运行的商业模式,测定储能提供调峰调频、黑启动等辅助服务及其他服务的价格是未来研究需要面对的关键问题。

综上,在制定储能产业政策时,应考虑储能系统所带来的外部价值,以鼓励投资者投资储能项目,促进储能产业的健康持续发展。

参考文献

- [1] 刘吉成,于晶.基于委托代理理论的风力发电商与储能商协同风险承担模型[J].技术经济,2018,37(11):124-130.
- [2] 李建林,田立亭,来小康.能源互联网背景下的电力储能技术展望[J].电力系统自动化,2015,39(23):15-25.
- [3] 孙伟卿,裴亮,向威,等.电力系统中储能的系统价值评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(8):47-58.
- [4] 谭忠富,蒲雷,吴静,等.基于负荷率差别定价的分时输配电价优化模型[J].系统工程理论与实践,2019,39(11):2945-2952.
- [5] 李泓泽,陆昊,李兵抗.基于随机生产模拟的风电优先调度对发电企业的外部性量化研究[J].电网技术,2017,41(12):3803-3808.
- [6] 王彩霞,李琼慧,雷雪姣.储能对大比例可再生能源接入电网的调频价值分析[J].中国电力,2016,49(10):148-152.
- [7] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.大规模储能电源参与电网调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
- [8] YU H, DUAN J, DU W, et al. China's energy storage industry: Develop status, existing problems and countermeasures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 767-784.
- [9] VAHID-PAKDEL M J, NOJAVAN S, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 145: 117-128.
- [10] 曾鸣,李娜,马明娟,等.电力市场环境下风储联合运行系统的经济效益评估模型[J].华东电力,2012,40(9):1469-1473.
- [11] 王再闯,袁铁江,李永东.基于储能电站提高风电消纳能力的电源规划研究[J].可再生能源,2014,32(7):954-960.
- [12] 刘成运,孟超,景锐,等.A级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度[J].电力系统自动化,2019,43(14):136-146.
- [13] DING J, XU Y, CHEN H, et al. Value and economic estimation model for grid-scale energy storage in monopoly power markets[J]. Applied Energy, 2019, 240: 986-1002.
- [14] 田崇翼,张承慧,李珂,等.含压缩空气储能的微网复合储能技术及其成本分析[J].电力系统自动化,2015,39(10):36-41.
- [15] 孟虹年,谢开贵.计及电池储能设备运巧特性的风电场可靠性评估[J].电网技术,2012(6):214-219.
- [16] 汪免伶,侯朝勇,贾学翠,等.电化学储能系统标准对比分析[J].储能科学与技术,2016,5(4):583-589.
- [17] 吴盛军,刘建坤,周前,等.考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(10):10-23.
- [18] XIAO J, BAI L Q, ZHANG Z Q, et al. Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 601-607.
- [19] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等.储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2533-2543.
- [20] 刘吉成,韦秋霜,黄骏杰,等.基于区间二型模糊 TOPSIS 的风储联合发电系统协同决策研究[J].技术经济,2019,38(5):110-116.
- [21] 傅家骥,全允桓.工业技术经济学[M].3版.北京:清华大学出版社,2008:51-72.
- [22] 孙威,李建林,王明旺,等.能源互联网储能系统商业运行模式及典型案例分析[M].北京:中国电力出版社,2017:69-91.

(下转第 53 页)

Forecast of Power Grid Investment Scale in the New Round of Transmission and Distribution Price Supervision Cycle: Based on Optimized Support Vector Machine Model

Wang Ling, Wu Hongliang, Peng Daoxin

(China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510530, China)

Abstract: In the context of the power system reform, the transmission and distribution price reform has changed the profit model of power grid companies from the difference between the purchase and sale of electricity to the acquisition of the total permitted income from transmission and distribution, which is closely related to the effective investment scale. Thus, higher requirements are put forward, and the investment scale under different boundary conditions needs to be analyzed and predicted. Therefore, the main influencing factors of grid enterprise investment is firstly analyzed, and then the support vector machine optimized is used by optimization algorithm to predict and analyze the investment scale of the grid enterprise under different boundary conditions, and finally the corresponding conclusions and recommendations is gave. The results show as follows. The factors affecting the investment scale of a grid enterprise are GDP, electricity sales, resident population, peak load, secondary industry structure, net asset value ratio, asset-liability ratio, return on equity, and operation and maintenance costs. Through the support vector machine model, it is predicted that the investment scale under different boundary conditions in 2025 will be between 122 billion yuan and 153 billion yuan. In the sensitivity analysis, the investment scale of the grid enterprise has the highest sensitivity to GDP and electricity sales, with sensitivity of about 0.6 and 0.5 respectively.

Keywords: transmission and distribution price reform; power grid investment; investment scale; sensitivity analysis; support vector machine

(上接第26页)

Value Measurement and Economic Evaluation of Energy Storage System Considering Externality

Zhao Huiru¹, Lu Hao¹, Zhang Shiyang¹, Wang Yuwei²

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: Taking the electric energy storage system applied in the power system as the research object and based on the externality theory, the energy storage system economic calculation model considering the externality is constructed, and the energy storage system is connected to the photovoltaic power station as an example. The cash flow analysis method estimates the cost and benefits of energy storage investment, and the economics of the energy storage system applied to the renewable energy generation side from the perspective of investors as well as social overall benefits is studied, and the profit and loss balance of energy storage is analyzed. Through the break even curve, the scenario of energy storage break even is analyzed. The results of economic analysis show that the external income of energy storage system accounts for a large proportion of annual income.

Keywords: energy storage system; externality; comprehensive value; discount cash flow; photovoltaic power generation