

# 高比例新能源系统储能需求优化研究

傅 旭<sup>1</sup>,李富春<sup>1</sup>,刘 飞<sup>2</sup>,张雨津<sup>1</sup>,杨 欣<sup>1</sup>,吴 雄<sup>3</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团 西北电力设计院有限公司,西安 710075;2. 国网青海省电力有限公司 经济技术研究院,西宁 810008;3. 西安交通大学 电气工程学院,西安 710049)

## Research on energy storage demand optimization of high proportion new energy system

FU Xu<sup>1</sup>, LI Fuchun<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>, ZHANG Yujin<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>1</sup>, WU Xiong<sup>3</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 2. Economic Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Co., Ltd., Xining 810008, China;  
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:**高比例新能源系统储能容量优化,对于提高新能源消纳能力,降低储能电站建设成本具有重要意义。研究了抽水蓄能、压缩空气、电化学储能等储能电站的容量效益、电量效益,提出了储能电站参与调峰的成本效益分析模型,进而提出了一种确定高比例新能源系统储能电站建设规模和型式的方法。以我国西北地区实际高比例新能源系统为研究对象,分析了储能的容量需求、各种储能的成本和效益,研究结果可为我国高比例新能源系统储能容量需求、储能规划和运行提供参考。

**关键词:**储能电站;电量效益;容量效益;新能源弃电率

**Abstract:** Optimizing the energy storage capacity of a high proportion of new energy system is of great significance for improving new energy consumption and reducing the construction cost of energy storage stations. The capacity and electricity benefit of energy storage stations are studied, such as pumped storage power station, compressed air, and electrochemical energy storage. A cost-benefit analysis model for energy storage stations participating in peak regulation is proposed, and a new method of determining capacity and type of energy storage in a high proportion new energy system is proposed. Taking the actual high proportion of new energy system in northwest China as the research object, the energy storage capacity requirements, the costs and benefits of various energy storages are analyzed, and the research results can be used for China's high proportion new energy systems to study energy storage capacity requirement, energy storage planning and operation.

**Key words:** energy storage station; electricity benefit; capacity benefit; new energy abandonment rate

## 0 引言

储能是电网中可以发挥调频、调峰等多种功能,通过储能提高电网的新能源接纳能力成为研究热点<sup>[1-7]</sup>。文献[8]针对新能源发电的波动问题,提出利用储能平抑新能源发电的波动。文献[9]以最小化储能投资成本和弃风成本为优化目标,建立储能与电网一体化优化模型。文献[10]建立储能双层规划模型,外层配置储能容量,内层优化储能充放电功率。文献[11]利用生产模拟程序计算了江苏电网不同场景的储能需求。文献[12]建立一种综合优化模型研究多种储能设备的规划和运行。仿真算例表明所提模型可用于研究储能对提高风电接入能力的作

用,适用于多种应用场景。文献[13]对微电网储能容量协同优化进行了研究。文献[14]发现用户侧储能能在峰谷电价差较大地区具有经济性。文献[15]提出了储能经济效益系数指标,用以计算年储能的利润率。文献[16]对微电网储能容量协同优化进行了研究,考虑了源、荷的预测误差,在保证较好经济效益的同时,提升了微电网的并网友好特性水平。文献[17]针对用户侧储能目前没有得到充分利用的情况,提出了建立储能服务市场的相关建议。文献[18]研究了典型的储能配置案例,指出了用户侧储能能在峰谷电价套利等方面的应用前景和存在的问题。文献[19]构建了考虑机组燃料成本、启停成本、环境成本及运行维护成本的机组组合模型。文献[20]提出了储能两阶段鲁棒规划模型,以包含机组燃料成本、储能投资成本、弃风惩罚成本及切负荷惩罚成本的综合成本最小为目标,采用列生成算法求解。文献[21]构建了储能随机规划方法,建立了不同典型日下系统期望运行成本的平均值最小模型。

收稿日期:2020-03-24;修回日期:2020-07-05

基金项目:国家自然科学基金(51807149)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51807149)

随着我国西北地区高比例新能源发电的大规模接入,对储能容量需求和效益的综合评估是储能健康发展的迫切需求。本文建立了高比例新能源系统储能需求和效益评估模型。储能需求分析部分采用8 760 h生产仿真模拟,考虑了储能运行方式、新能源配额约束、新能源弃电率约束等。储能效益分析模型中,计算不同类型储能的容量效益和电量效益,并将其折算成经济指标,与储能成本对比,计算出不同储能的净效益,从而选择最经济的储能类型。研究结果可为我国高比例新能源系统储能电站容量优化提供参考。

## 1 数学模型

### 1.1 储能容量需求与类型分析

以规划水平年内系统净收益最大为目标,提出一种储能电站优化规划的启发式算法,计算流程如图1所示,主要为:

(1) 利用8 760 h生产仿真模拟程序,分析系统新能源弃电量和弃电时段分布,确定高比例新能源系统储能电站的容量需求。一般以新能源消纳配额或者新能源弃电率低于某一门槛值为约束,本文考虑新能源弃电率低于5%;

(2) 在系统供电可靠性水平不变的情况下,计算储能电站投入运行后,系统可以降低的火电装机和煤耗,进而分析不同类型储能电站的容量效益和电量效益,得出不同储能类型的净效益;

(3) 对不同储能类型的净效益进行排序,选择最优的储能类型与容量需求。

### 1.2 生产模拟数学模型

#### (1) 目标函数

在满足负荷需求约束下,尽量减少新能源弃电和发电煤耗,目标函数为

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G (f(p_{i,t}^{\text{th}}) + Q_{i,t}^{\text{up}} + Q_{i,t}^{\text{off}}) + \\ \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (W_{b,t}^{(0)} - W_{b,t}) + \\ \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (S_{b,t}^{(0)} - S_{b,t}) + \lambda_3 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M E_{i,t} + \\ \lambda_4 \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B l_{b,t} + \lambda_5 \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B h_{b,t} \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: $f(p_{i,t}^{\text{th}})$ 为火电机组*i*在时段*t*的发电成本函数; $p_{i,t}^{\text{th}}$ 为火电机组*i*在时段*t*的有功出力; $Q_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{off}}$ 分别为火电机组*i*在时段*t*的启动和停机费用; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 分别为弃风、弃光、弃水的惩罚因子; $\lambda_4$ 为失负荷惩罚; $\lambda_5$ 为失备用惩罚; $W_{b,t}$ 为时段*t*内节点*b*的风电出力; $W_{b,t}^{(0)}$ 为时段*t*内节点*b*的风电预测出力; $S_{b,t}$

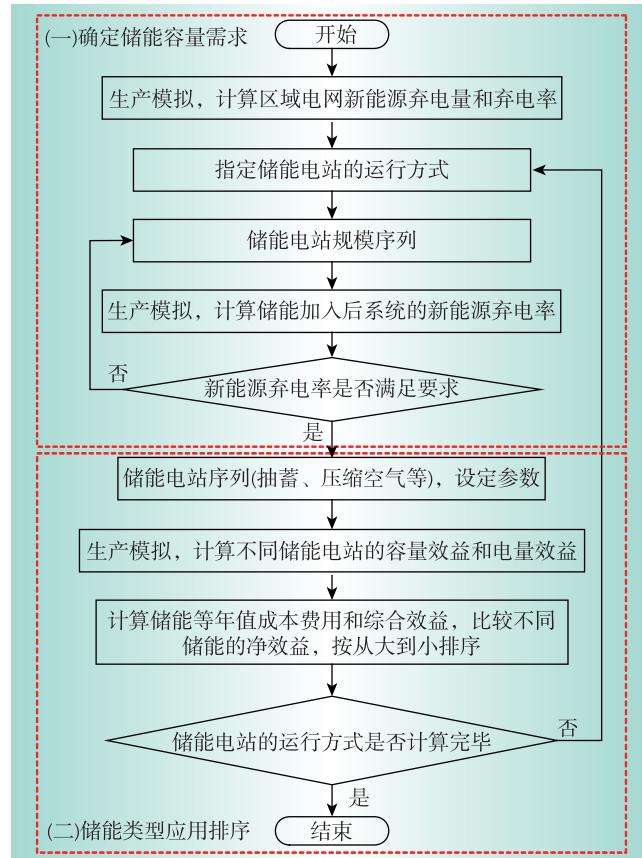


图1 储能容量需求与类型分析

Fig. 1 Capacity demand and type analysis of energy storage

为时段*t*内节点*b*的光伏出力; $S_{b,t}^{(0)}$ 为时段*t*内节点*b*的光伏预测出力; $E_{i,t}$ 为水电机组*i*时段*t*的弃水; $l_{b,t}$ 和 $h_{b,t}$ 分别为*t*时刻节点*b*的失负荷量和失备用量; $G$ 为所有火电机组的集合; $M$ 为所有水电机组的集合; $T$ 为所有时段的集合; $B$ 为所有节点的集合。

#### (2) 约束条件

包括系统平衡约束、电站/机组运行约束、地区间联络线功率约束等,本节主要介绍储能约束。

储能电站参与系统功率平衡的贡献为放电功率减去充电功率,即

$$P_t^B = P_{i,t}^{\text{BOut}} - P_{i,t}^{\text{BIn}} \quad (2)$$

式中: $P_t^B$ 为储能电站*t*时刻对系统的功率贡献; $P_{i,t}^{\text{BOut}}$ 为第*i*个储能电站*t*时刻的放电功率; $P_{i,t}^{\text{BIn}}$ 为第*i*个储能电站*t*时刻的充电功率。

平衡约束为

$$\begin{cases} x_{i,t}^{\text{BIn}} P_i^{\text{BIn},\min} \leq P_{i,t}^{\text{BIn}} \leq x_{i,t}^{\text{BIn}} P_i^{\text{BIn},\max} \\ x_{i,t}^{\text{BOut}} P_i^{\text{BOut},\min} \leq P_{i,t}^{\text{BOut}} \leq x_{i,t}^{\text{BOut}} P_i^{\text{BOut},\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_{i,t}^{\text{BIn}}$ 为第*i*个储能电站*t*时刻是否充电的0-1变量,1表示储能处于充电状态,0表示储能未处于充电状态; $P_i^{\text{BIn},\min}$ 为最小充电功率; $P_i^{\text{BIn},\max}$ 为最大充电功率; $x_{i,t}^{\text{BOut}}$ 为第*i*个储能电站*t*时刻是否发电的0-1变量,1表示储能电站处于发电状态,0表示机组

未处于发电状态;  $P_i^{\text{BOut},\min}$  为最小发电功率;  $P_i^{\text{BOut},\max}$  为最大发电功率。

充放电状态整数变量约束为

$$0 \leq x_{i,t}^{\text{BIn}} + x_{i,t}^{\text{BOut}} \leq 1 \quad (4)$$

该式表示任意一个时刻,充电和放电的状态只能任选其一。

储能电站能量流动约束

$$E_{i,t+1} = E_{i,t} + (\eta_{\text{BIn}} P_{i,t}^{\text{BIn}} - \frac{P_{i,t}^{\text{BOut}}}{\eta_{\text{BOut}}}) \quad (5)$$

式中:  $E_{i,t}$  为第  $i$  个储能电站  $t$  时刻内部存储的电能;  $\eta_{\text{BIn}}$  为储能电站充电效率;  $\eta_{\text{BOut}}$  为储能电站放电效率。

储能电站能量约束

$$E_i^{\text{Min}} \leq E_{i,t} \leq E_i^{\text{Max}} \quad (6)$$

式中:  $E_i^{\text{Max}}$ 、 $E_i^{\text{Min}}$  分别为第  $i$  个储能电站内部存储的电能的最大值与最小值。

充电状态切换整数变量约束

$$\begin{cases} x_{i,t}^{\text{BIn}} - x_{i,t-1}^{\text{BIn}} = s_{i,t}^{\text{BIn},\text{up}} - s_{i,t}^{\text{BIn},\text{down}} \\ x_{i,t}^{\text{BOut}} - x_{i,t-1}^{\text{BOut}} = s_{i,t}^{\text{BOut},\text{up}} - s_{i,t}^{\text{BOut},\text{down}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $s_{i,t}^{\text{BIn},\text{up}}$  为第  $i$  个储能电站  $t$  时刻由非充电转换到充电的动作变量,1 表示由未充电切换到充电,0 表示没有这种状态变化;  $s_{i,t}^{\text{BIn},\text{down}}$  为第  $i$  个储能电站  $t$  时刻由充电转换到未充电的动作变量,1 表示由充电切换到未充电,0 表示没有这种状态变化; 类似地,  $s_{i,t}^{\text{BOut},\text{up}}$  为第  $i$  个储能电站  $t$  时刻由非放电转换到放电的动作变量,1 表示由未放电切换到放电,0 表示没有这种状态变化;  $s_{i,t}^{\text{BOut},\text{down}}$  为第  $i$  个储能电站  $t$  时刻由放电转换到未放电的动作变量,1 表示由放电切换到未放电,0 表示没有这种状态变化。

上述中的充电状态切换整数变量二者不可同时发生,故有约束

$$\begin{cases} 0 \leq s_{i,t}^{\text{BIn},\text{up}} + s_{i,t}^{\text{BIn},\text{down}} \leq 1 \\ 0 \leq s_{i,t}^{\text{BOut},\text{up}} + s_{i,t}^{\text{BOut},\text{down}} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 储能效益评估

高比例新能源系统中加入储能后可减少新能源弃电量,从而减少火电发电量及燃料消耗,折算成经济指标

$$E_{\text{ecc}} = \kappa(F_f - F_{f-\text{ess}}) \quad (9)$$

式中:  $E_{\text{ecc}}$  为储能加入前后节约的煤耗成本;  $F_f$  和  $F_{f-\text{ess}}$  分别为加入储能前后全年的耗煤量;  $\kappa$  为标煤单价。

储能电站投入运行后,系统可以减少常规电源装机容量,如图 2 所示,即计算在可靠性水平不变的情况下,储能电站投入运行后,可以降低的火电装机,折算成经济指标

$$E_{\text{rpp}} = C_{\text{in,g}} + C_{\text{om,g}} \quad (10)$$

$$C_{\text{in,g}} = CRF(r, Y_G) K_G (P_G - P_{G-\text{ess}}) \quad (11)$$

$$C_{\text{om,g}} = \eta K_G (P_G - P_{G-\text{ess}}) \quad (12)$$

$$CRF(r, Y_G) = \frac{r(1+r)^{Y_G}}{(1+r)^{Y_G} - 1} \quad (13)$$

式中:  $E_{\text{rpp}}$  为储能的容量替代效益;  $C_{\text{in,g}}$  和  $C_{\text{om,g}}$  分别为储能替代火电装机容量对应的年投资和年运行维护费;  $CRF(r, Y_G)$  为等年值系数;  $P_G$  和  $P_{G-\text{ess}}$  分别为储能加入前后系统的火电装机;  $K_G$  为火电的单位投资;  $\eta$  为火电的运行维护费率;  $r$  为基准折现率;  $Y_G$  为火电机组寿命。

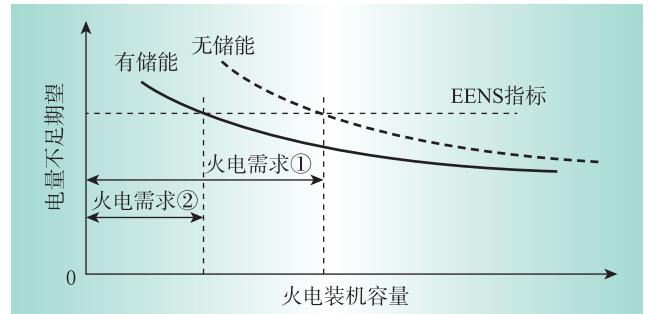


图 2 储能电站替代容量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the alternative capacity of energy storage station

电网中加入储能后系统的总效益为

$$E_{\text{ESS}} = E_{\text{ecc}} + E_{\text{rpp}} \quad (15)$$

储能电站的净收益为

$$F_{\text{ESS}} = E_{\text{ESS}} - C_{\text{ESS}} \quad (16)$$

式中:  $C_{\text{ESS}}$  为储能全生命周期的年成本费用,即

$$C_{\text{ESS}} = C_{\text{in}} + C_{\text{om}} \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{in}}$  为储能投资的等年值;  $C_{\text{om}}$  为储能的年运行维护成本,即

$$C_{\text{in}} = C(r, Y_G)[C_p P_{\text{ESS}} + C_e E_{\text{ESS}}] \quad (18)$$

$$C_{\text{om}} = K_0 P_{\text{ESS}} + K_m Q_{\text{ESS}} \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{ESS}}$ 、 $E_{\text{ESS}}$  分别为储能的功率和容量;  $C_p$ 、 $C_e$  分别为储能的功率和容量的单位投资;  $C(r, Y_G)$  为等年值系数;  $Y_G$  为储能寿命;  $K_0$  为储能的单位功率年运行维护成本系数;  $K_m$  为储能的单位容量年运行维护成本系数;  $Q_{\text{ESS}}$  为储能的年发电量。

可以看出,  $F_{\text{ESS}}$  有可能大于零、也有可能小于零。若  $F_{\text{ESS}}$  大于零,说明储能是有效益的;若  $F_{\text{ESS}}$  小于零,说明储能不经济。

### 3 算例

#### 3.1 研究基础

以我国西北某省区为算例,基础数据和技术经济指标如表1—表4所示。储能类型考虑抽蓄电站、压缩空气、电池储能3种型式,电池储能考虑铅酸电池、钠硫电池、液流电池和锂离子电池。

表1 西北某省区实际电网数据

Table 1 Actual grid data in northwest grid

类型	指标	数值
负荷	最大负荷/MW	28 500
	电量需求/亿kWh	1 850
	利用小时数/h	6 491
电源	光伏/MW	10 000
	风电/MW	20 000
	光热/MW	2 000
	水电/MW	10 650
	火电/MW	29 630
	外送/MW	8 000

表2 各类储能设备的效率

Table 2 Efficiency of various energy storage equipments

储能类型	效率/%	使用寿命/年	建设期/年	运行维护费率/%
抽蓄	75	30	7	2.50
压缩空气	40~70	30	2	2.00
铅酸电池	80	1	1	0.50
钠硫电池	85	8	1	0.50
液流电池	70	20	1	0.50
锂离子电池	90	7	1	0.50

表3 储能参数

Table 3 Energy storage parameters

	抽蓄	压缩	电池储能			
	空气	铅酸	钠硫	液流	锂离子	
功率投资/(元·kW <sup>-1</sup> )	5 500	7 100				
容量投资/(元·kWh <sup>-1</sup> )		1 200	7 000	8 000	3 000	
建设期/年	7	2	1	1	1	1
设备寿命/年	30	30				
设备寿命/次		280	2 500	12 000	2 000	
运维费率/%	2.50	2.00	0.50	0.50	0.50	0.50
效率/%	75	40	80	85	70	90

表4 经济测算指标

Table 4 Economic indexes

指标	取值
基准贴现率/%	6.50
发电煤耗/(g·kWh <sup>-1</sup> )	320
标准煤单价/(元·t <sup>-1</sup> )	800
火电造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	3 500
火电建设期/年	2
火电寿命/年	30
储能利用小时/h	1 000
运行维护费率/%	3

#### 3.2 储能容量需求分析

按新能源弃电率低于5%控制,逐步增加储能容量直至满足新能源弃电约束,如图3—图4所示,可以看出:

(1) 对于同一储能装机容量,随着储能时长的增加弃电率逐步降低;对于同一储能时长,随着储能装机容量的增长弃电率逐步降低;

(2) 储能装机容量小于3 000 MW,储能时长小于10 h,新能源弃电率难以降低至5%以下;储能装机容量大于3 000 MW,储能时长在10 h以内,新能源弃电率可能降低至5%以下。

通过储能需求分析,认为储能装机选择3 000 MW、储能时长8 h为基本的储能需求。

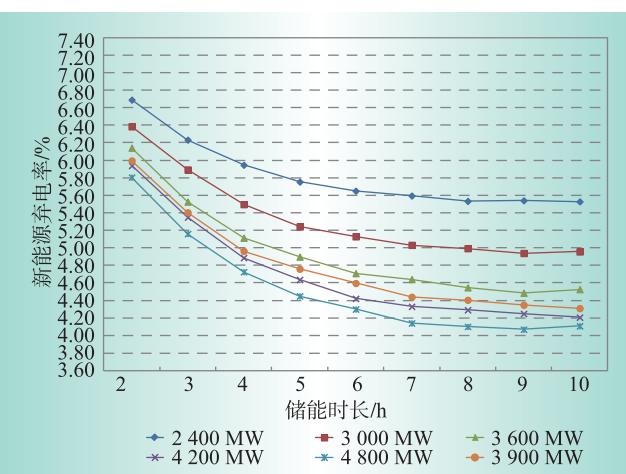


图3 储能与新能源弃电率关系

Fig. 3 Relationship of abandonment rate between energy storage and new energy

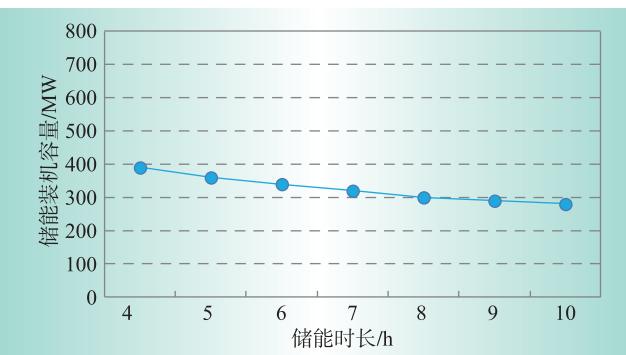


图4 储能容量需求

Fig. 4 Energy storage capacity requirements

#### 3.3 储能成本效益分析

测算不同类型的储能的效益,从而对不同储能类型进行排序。由于储能效益的发挥与储能运行方式相关,考虑3种储能策略:

运行策略1:该策略以尽量接纳新能源弃电量为目标,兼顾晚高峰负荷供电,即在系统发生弃电时储能电站即储电,当没有弃电发生时,根据需要预留一部分

电量,在负荷高峰时发电,其余电量即刻放电。该策略的优点是储放电时段清晰,缺点是基本不存在替代火电装机效应。

运行策略2:该策略在电网有新能源弃电发生时就储电,在系统不弃电且火电可继续压出力的时刻发电腾空,以便接纳下一时段的新能源弃电。该策略的优点是调度简单、易操作,储能电站能够充分利用,降低弃电率效果较好;缺点是储能系统频繁动作,在储/发之间来回切换,影响储能寿命,而且也无火电装机替代效益。

运行策略3:以全系统最优运行为目标,优化安排储能电站的工作位置。缺点是对调度运行技术要求较高,新能源出力预测不准可能导致系统运行存在风险。

以储能装机3 000 MW,储能时长8 h的电池储能(运行效率按90%)为例,通过生产模拟确定不同运行策略下的储能电站的电量效益和容量效益,如表5所示。可以看出:储能按策略1运行,系统新能源弃电率可降低约3.06%,弃电量减少约17.70亿kWh,火电发电量减少约13.09亿kWh,节约发电煤耗约39.73万t,替代火电装机效益为0;储能按策略2运行,系统新能源弃电率可降低约3.23%,弃电量减少约18.71亿kWh,火电发电量减少约13.86亿kWh,节约发电煤耗约42.04万t,替代火电装机效益为0;储能按策略3运行,系统新能源弃电率可降低约3.76%,弃电量减少约21.83亿kWh,火电发电量减少约17.57亿kWh,节约发电煤耗约53.32万t,可替代约2 000 MW火电装机。

表5 不同运行策略下的储能电站效益分析

Table 5 Benefit analysis of energy storage station under different operation strategies

	运行 策略1	运行 策略2	运行 策略3	
电量效益	火电发电量降低量/亿kWh	13.09	13.86	17.57
	火电煤耗减少量/万t	39.73	42.04	53.32
	新能源弃电量减少量/亿kWh	17.70	18.71	21.83
容量效益	新能源弃电下降率/%	3.06	3.23	3.76
	火电装机减少量/万kW	0	0	200

因此,运行策略3的容量效益和电量效益能得到最大的发挥,储能获得的效益也最大,以下仅按策略3对不同储能类型进行成本效益分析,如表6—表7所示,可以看出:

(1) 配置储能3 000 MW(8 h),新能源弃电率可降低约3.8%,弃电量减少约22亿kWh。从系统运行煤耗情况来看,抽蓄转换效率按75%,火电发电量减少约17.57亿kWh,节约发电煤耗约53.41万t;压缩空气转换效率按40%~70%,火电发电量减少约9.89亿~16.13亿kWh,节约发电煤耗约30.44万~51.15万t;电池

储能转换效率按70%~90%,火电发电量减少约16.13亿~20.79亿kWh,节约发电煤耗约51.15万~62.00万t;

(2) 装设3 000 MW储能电站,系统容量效益约2 000 MW,容量替代率约66.67%。

表6 储能电站电量效益分析

Table 6 Energy benefit analysis of energy storage stations

储能类型	储能 效率/%	火电发电量 降低/10 <sup>8</sup> kWh	煤耗 减少/ 10 <sup>4</sup> t	弃电 减少/ 10 <sup>8</sup> kWh	弃电率 降低/%
抽蓄	75	17.57	53.41	21.83	3.77
	40	9.89	30.44	21.27	3.68
	50	12.21	37.64	21.85	3.78
	60	14.18	44.92	21.44	3.71
	70	16.13	51.15	21.77	3.76
铅酸电池	80	18.94	58.73	21.78	3.76
钠硫电池	85	19.31	58.57	21.71	3.75
液流电池	70	16.13	51.15	21.77	3.76
锂电池	90	20.79	62.00	21.74	3.76

表7 储能电站容量效益分析

Table 7 Capacity benefit analysis of energy storage stations

类型	储能效率/%	减少火电装机容量/MW	替代率/%
抽蓄	75	2 000	66.67
	40	2 000	66.67
	50	2 000	66.67
	60	2 000	66.67
	70	2 000	66.67
铅酸电池	80	2 000	66.67
钠硫电池	85	2 000	66.67
液流电池	70	2 000	66.67
锂电池	90	2 000	66.67

储能成本效益分析结果如表8—表10所示。可以看出:

(1) 电池类储能效率基本在70%以上,电量效益较好,抽蓄电站效率在75%左右,电量效益次之,压缩空气效率较低,大多低于60%,电量效益最差。电池类储能中,锂离子电池效率最高(约90%),电量效益最大,液流电池效率最低,电量效益最小;

(2) 电池类储能单位投资较高,使用寿命较短,储能成本等年值较高,抽蓄电站和压缩空气使用寿命基本相当,压缩空气单位投资较高,储能成本等年值略高,抽蓄电站储能成本等年值最低。电池类储能中,锂离子电池储能成本等年值最低,传统铅酸电池储能成本等年值最高;

(3) 目前储能成本较高,对于不同型式的储能,系统净收益均为负值,经济性较差。对比不同型式的储能,抽蓄电站净效益最好,电池类净效益最差。电池类储能中锂离子电池的净效益最好,传统铅酸电池净效益最差。

表8 储能效益分析

Table 8 Benefit analysis of energy storage

	效率/%	节约煤耗/t	替代火电等年值/万元	运维费/万元	收益合计/万元
抽蓄	75	42 727	58 944	21 000	122 671
	40	24 348	58 944	21 000	104 292
压缩空气	50	30 115	58 944	21 000	110 059
	60	35 937	58 944	21 000	115 881
铅酸电池	70	40 918	58 944	21 000	120 862
	80	46 985	58 944	21 000	126 929
钠硫电池	85	46 855	58 944	21 000	126 799
液流电池	70	40 918	58 944	21 000	120 862
锂电池	90	49 596	58 944	21 000	129 540

注:火电单位投资按3 500元/kWh,建设期2年,使用寿命按30年,运行维护费率按3%。

表9 储能成本分析

Table 9 Cost analysis of energy storage

	效率/%	储能投资/亿元	等年值/亿元	运维费/亿元	年费用/亿元
抽蓄	75	165.0	20.9	4.1	25.0
	40	213.0	22.2	4.3	26.5
压缩空气	50	213.0	22.2	4.3	26.5
	60	213.0	22.2	4.3	26.5
铅酸电池	70	213.0	22.2	4.3	26.5
	80	288.0	328.1	1.4	329.5
钠硫电池	85	1 680.0	302.3	8.4	310.7
液流电池	70	1 920.0	195.2	9.6	204.8
锂电池	90	720.0	143.4	3.6	147.0

表10 储能净收益分析

Table 10 Profit analysis of energy storage

	效率/%	储能收益/亿元	年费用/亿元	净收益/亿元
抽蓄	75	12.3	25.0	-12.8
	40	10.4	26.5	-16.0
压缩空气	50	11.0	26.5	-15.4
	60	11.6	26.5	-14.9
铅酸电池	70	12.1	26.5	-14.4
	80	12.7	329.5	-316.8
钠硫电池	85	12.7	310.7	-298.0
液流电池	70	12.1	204.8	-192.7
锂电池	90	13.0	147.0	-134.1

## 4 结束语

(1) 基于分层优化的思想,采用双层决策模型,将长时间尺度的储能规划问题放在外层优化中求解,将短时间尺度的运行问题放在内层优化中求解,降低了优化问题的求解规模;

(2) 采用8 760 h生产仿真模拟程序,测算了高比例新能源系统中不同储能的容量效益和电量效益,考虑了储能电站的多种运行方式。对比了抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能的效益和成本;

(3) 目前储能成本较高,高比例新能源系统装设储能的效益不能抵扣高额的成本,经济性较差。对比不同型式的储能,抽蓄电站净效益最好,电池

类净效益最差。电池类储能中锂离子电池的净效益最好,传统铅酸电池净效益最差。

## 参考文献:

- [1] 孙振新,刘汉强,赵喆,等.储能经济性研究[J].中国电机工程学报,2013,33(S1):54-58.  
SUN Zhenxin, LIU Hanqiang, ZHAO Zhe, et al. Research on economical efficiency of energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1):54-58.
- [2] 刘冰,张静,李岱昕,等.储能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.
- [3] 丁逸行,徐青山,吕亚娟,等.考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J].电网技术,2019,43(4):1 179-1 186.  
DING Yixing, XU Qingshan, LÜ Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management [J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1 179-1 186.
- [4] 李建林,王上行,袁晓冬,等.江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J].电力系统自动化,2018,42(21):1-9,103,10-11.  
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21):1-9,103,10-11.
- [5] 李军徽,侯涛,穆钢,等.基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(19):63-79.  
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery [J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(19):63-79.
- [6] 黎淑娟,李欣然,黄际元,等.面向电网全调频过程的高倍率钛酸锂电池容量配置[J].高电压技术,2018,44(1):145-151.  
LI Shujuan, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity configuration of lithium titanate battery in whole grid frequency regulation based on rate characteristic [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1):145-151.
- [7] 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):2 533-2 543.  
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2 533-2 543.
- [8] 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(英文)[J].电网技术,2014,38(2):469-477.  
SHAN Maohua, LI Chenlong, LIANG Tingting, et al. A real-time optimal control strategy for battery energy storage system to smooth active output fluctuation of renewable

- [8] energy sources [J]. Power System Technology, 2014, 38(2):469–477.
- [9] 黄英, 刘宝柱, 王坤宇, 等. 考虑风电接纳能力的储输联合规划[J]. 电网技术, 2018, 42(5):1 480–1 489.  
HUANG Ying, LIU Baozhu, WANG Kunyu, et al. Joint planning of energy storage and transmission network considering wind power accommodation capability [J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1 480–1 489.
- [10] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6):1 189–1 196.  
LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6):1 189–1 196.
- [11] 朱寰, 程亮, 陈琛, 等. 多重应用场景下的电网侧储能需求评估方法[J]. 电力建设, 2019, 40(9):35–42.  
ZHU Huan, CHENG Liang, CHEN Chen, et al. Assessment method for grid-side storage demand under multiple application scenarios [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9):35–42.
- [12] 谢鹏, 蔡泽祥, 刘平, 等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24):7 126–7 136, 7 486.  
XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24):7 126–7 136, 7 486.
- [13] 李达, 姜鹤, 翁军华, 等. 工业用户侧电化学储能应用及其经济性分析[J]. 电器与能效管理技术, 2019(6):48–52.  
LI Da, JIANG He, WENG Junhua, et al. Application and economic analysis of industrial user-side electrochemical energy storage [J]. Low Voltage Apparatus, 2019(6):48–52.
- [14] 杨裕生, 程杰, 曹高萍. 规模储能装置经济效益的判断[J]. 电池, 2011, 41(1):19–21.  
YANG Yusheng, CHENG Jie, CAO Gaoping. A gauge for direct economic benefits of energy storage devices [J]. Battery Bimonthly, 2011, 41(1):19–21.
- [15] 曹敏, 徐杰彦, 巨健, 等. 用户侧储能设备参与电网辅助服务的技术经济性分析[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1):52–55.
- [16] CAO Min, XU Jieyan, JU Jian, et al. Technical and economic analysis of user side energy storage equipment participating in power grid ancillary services [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):52–55.
- [17] 刘坚. 储能技术经济性现状及商业化运行障碍[J]. 中国能源, 2017, 39(7):36–40.  
LIU Jian. Current situation of energy storage technology economy and obstacles to commercial operation [J]. Energy of China, 2017, 39(7):36–40.
- [18] ZHANG N, LU X, MCELROY M B, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage [J]. Applied Energy, 2016, 184:987–994.
- [19] JABR R A, DZAFIC I, PAL B C. Robust optimization of storage investment on transmission networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):531–539.
- [20] XIONG P, SINGH C. Optimal planning of storage in power systems integrated with wind power generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1):232–240.
- [21] DAVIES D M, VERDE M G, MNYSHENKO O, et al. Combined economic and technological evaluation of battery energy storage for grid applications [J]. Nature Energy, 2019, 4(1):42–50.
- [22] CONEJO A J, CHENG Y H, ZHANG N, et al. Long-term coordination of transmission and storage to integrate wind power [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1):36–43.

**作者简介:**

傅旭(1976),男,辽宁凌海人,博士,正高级工程师,注册咨询工程师,从事电力系统规划分析方面的研究工作;

李富春(1982),男,河南周口人,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

刘飞(1988),男,陕西咸阳人,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

张雨津(1991),男,陕西西安人,硕士,工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

杨欣(1991),女,陕西西安人,硕士,工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

吴雄(1986),男,湖南娄底人,博士,副教授,主要研究方向为电力系统规划、可靠性分析。

(责任编辑 曹阳)

(上接第22页)

- [10] SHENG Yan, YANG Jincheng, MA Shouda, et al. Research on optimal dispatching of integrated energy system based on demand-supply interaction [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(6):48–54.
- [11] 郭艳飞,任雪桂,鞠力,等. 基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4):121–128.  
GUO Yanfei, REN Xuegui, JU Li, et al. The comprehensive efficiency evaluation method for integrated energy system based on AHP [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4):121–128.
- [12] 赵晓东,杜小泽,曾鸣. 商业综合能源系统经济性分析[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4):87–92.  
ZHAO Xiaodong, DU Xiaoze, ZENG Ming. The influence of market electricity price signal on the economy of integrated energy system [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):87–92.
- [13] 陈建福,蔡元纪,李建标,等. 珠海能源互联网示范项目综合能源运营服务应用[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4):83–86, 92.  
CHEN Jianfu, CAI Yuanji, LI Jianbiao, et al. Operation and service applications of integrated energy system in Zhuhai energy Internet demonstration project [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):83–86, 92.

**作者简介:**

王坤(1990),男,河北邯郸人,硕士,工程师,主要从事综合能源节能分析工作。

(责任编辑 水鸽)