

# 计及循环寿命的电网调频储能容量优化配置

傅金洲,何国鑫,杜 炜,张筱辰,耿 健

(南瑞集团有限公司,南京 211106)

**Optimal allocation of energy storage capacity in power grid frequency regulation considering cycle life**

*FU Jinzhou, HE Guoxin, DU Wei, ZHANG Xiaocheng, GENG Jian*

(NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**摘要:**针对储能电池参与电网调频时的容量配置问题,提出一种优化配置方法。综合考虑了储能电池的各项成本以及参与调频时可获得的收益,并且引入了储能电池的容量保持率模型,利用数值拟合的方法对不同放电深度给储能电池循环寿命造成的影响进行了定量分析与计算;同时基于区域控制误差信号,以储能运行特性和电网调频需求为约束条件,获取储能电池在调频过程中的出力序列,以此对储能的功率容量和能量容量进行优化配置。最后利用实际电网数据进行仿真验证,对不同放电深度下储能配置的技术与经济特性进行了对比分析,给出了使整体经济性最优的储能放电深度。仿真结果表明,所提配置方法可以灵活协调储能配置方案的经济性与技术性。

**关键词:**储能;电网调频;容量配置;循环寿命;经济性

**Abstract:** An optimal allocation method is proposed to solve the capacity allocation problem of energy storage batteries participated in power grid frequency regulation. Considering the various costs of energy storage and the benefits that can be obtained, the capacity retention rate model of energy storage is established. The influence of different depth of discharge on the cycle life of energy storage is analyzed and calculated using numerical analysis method. Based on the area control error signal, the power output sequence of the energy storage is obtained taking the energy storage operation characteristics and grid frequency regulation demand as constraints, so as to optimize the allocation of the power capacity and energy capacity of energy storage. Finally, the actual grid data are used to simulate and verify the technical and economic characteristics of energy storage allocation under different depth of discharge. The optimal depth of discharge for the overall economy is given. The results show that the proposed allocation method can flexibly coordinate the economy and technology of energy storage allocation scheme.

**Key words:** energy storage; power grid frequency regulation; capacity allocation; cycle life; economy

## 0 引言

目前,以化石能源为代表的传统能源日益枯竭,能源危机日益凸显。大规模开发和应用可再生能源是解决能源问题最有效的手段之一,并已成为当今世界各国的共识及发展趋势<sup>[1-3]</sup>。风电、光伏等可再生能源具有波动性、随机性与间歇性等特点,其大量接入将加大电网的调频压力<sup>[4]</sup>。与传统火电机组相比,储能电池参与电网调频的响应时间短、爬坡速度快,且具有很高的调节精度,可在无输出状态及满放电状态(或充电状态)之间灵活转换,动作准确率高<sup>[5-6]</sup>。因此,利用储能电池参与电网调频具有一定

的应用价值。如何利用储能的功率与能量容量进行科学合理的配置,是考虑储能电网综合规划的关键一环,直接影响储能技术的推广和应用。

相关学者对储能的容量优化配置方法进行了不少研究。文献[6]—文献[7]从储能电池的性能指标与经济指标出发,提出了一种储能电池的经济效益模型。文献[8]在此基础上考虑了放电深度(depth of discharge, DOD)和电池循环寿命的关系对经济效益的影响,在保证供电区域内重要负荷定时限独立供电的前提下,给出了不同DOD下储能电池的经济性评估模型。

在面向电网调频应用场景的储能电池容量配置问题上,文献[9]研究了储能电池参与一次调频对电网频率偏差以及联络线功率偏差的影响,并提出利用频率偏差的均方根和最大值作为调频效果指标来配置储能电池的容量。文献[10]构建了储能电池参与一次调频的全寿命周期技术经济模型,并提出了容量配置方法。文献[11]构建了储能电

收稿日期:2020-03-20;修回日期:2020-07-15

基金项目:国家电网公司科技项目“面向电网的储能电站优化配置及控制策略研究”

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation “Research on Optimal Configuration and Control Strategy of Energy Storage Power Station Facing Power Grid”

池参与二次调频的成本-效益计算模型,以储能的技术特性与调频需求为约束,给出了利用遗传算法辅助求解储能配置的方法流程,但没有考虑储能参与调频时频繁充放电对储能电池寿命的影响。文献[12]根据储能电池出力曲线统计每天的等效充放电循环次数,基于此在建立的储能经济性模型中加入了针对储能电池频繁动作对电池寿命影响的定量分析,但对不同DOD下储能电池的循环寿命变化对经济性带来的影响缺少对比分析。

本文以储能电池参与二次调频为研究场景,在构建储能的成本-效益计算模型时综合考虑了储能电池的频繁动作以及不同DOD对储能电池循环寿命的影响;并从区域控制误差信号的波动特性出发,以储能运行特性和电网调频需求为约束条件,获取储能电池在调频过程中出力的序列函数,对储能容量进行优化配置。最后利用实际电网数据进行算例验证,对不同DOD下储能配置的技术与经济特性进行了对比分析。

## 1 储能电池参与二次调频的成本-效益计算模型

### 1.1 储能电池成本分析

储能电池的成本主要由初始投资成本和运行维护成本两部分组成<sup>[10]</sup>。其中,初始投资成本包括功率容量成本和能量容量成本,能量容量成本与储能电池本体的投资相关,由储能电池额定容量 $E_{\text{rated}}$ 决定;功率容量成本与储能系统中储能变流器配置相关,由储能电池额定功率 $P_{\text{rated}}$ 决定。

忽略储能系统正常使用期内的设备更换成本,为便于分析,根据储能系统的使用寿命和基准收益率,可将储能系统的总投资成本在寿命期内进行成本分摊,与储能系统的年维护成本叠加,得到储能系统的费用年值,再将年值折算为日花费成本。

储能电池日花费成本 $C_{\text{day}}$ 由式(1)计算

$$C_{\text{day}} = \frac{(C_p P_{\text{rated}} + C_E E_{\text{rated}}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_m Q}{d_s} \quad (1)$$

式中: $C_p$ 为储能系统单位功率容量成本; $C_E$ 为储能系统单位能量容量成本; $n$ 为储能系统使用寿命年限; $r$ 为储能项目投资贴现率; $C_m$ 为储能系统单位运维成本; $Q$ 为储能系统年发电量; $d_s$ 为储能的年运行天数。

### 1.2 储能频繁动作对寿命的影响

储能电池参与调频时的出力特点表现为小幅度、频繁性与折返性,而动作频率过高会显著降低电

池的使用寿命,变相提高了储能装置的日花费成本,因此,有必要对储能频繁动作对使用寿命的影响进行定量分析。假设储能电池循环次数为 $k$ 次,利用雨流计数法统计出储能电池每天的等效充放电循环次数 $m$ <sup>[13-14]</sup>,得到储能电池的使用寿命 $n'$ ,如式(2)所示

$$n' = \frac{k}{md_s} \quad (2)$$

式中:用 $n'$ 对式(1)中的 $n$ 进行修正得到储能系统的实际成本。

此外,储能电池的循环次数主要取决于DOD,不同DOD下某型号磷酸铁锂电池循环充放电时的容量保持率如图1所示。

从图1中可以看出,低DOD下蓄电池循环寿命明显更高。对容量保持率 $\delta$ 与循环次数 $L$ 之间的关系采用多项式进行近似拟合,得到数学表达式为

$$\delta = 1 + B \cdot L + C \cdot L^2 + D \cdot L^3 \quad (3)$$

式中: $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为多项式拟合后所得系数。

参考《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》“蓄电池若经过了3次全核对性放电,容量均达不到额定容量的80%以上,可认为此组蓄电池使用年限已到”,由式(3)求得 $\delta$ 取80%时对应的循环次数代入式(2)即可进一步得出不同DOD下储能电池的实际使用寿命。

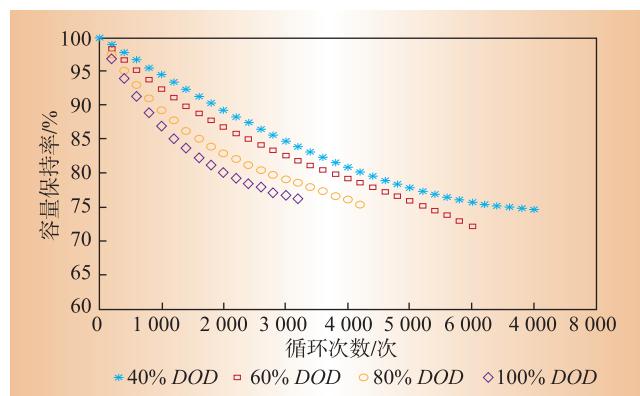


图1 不同DOD下蓄电池的容量保持率

Fig. 1 Capacity retention rate of battery under different DOD

### 1.3 储能参与调频的效益分析

储能参与调频的效益包括固定效益、静态效益、动态效益和环境效益<sup>[15-16]</sup>。固定效益包括储能实时电量效益和备用功率效益。

储能的实时电量效益是指在考察时段内通过充放电带来的净收益,计算公式如式(4)

$$B_{\text{ele}} = \sum R_{\text{ele},t} P_m(t) \Delta t \quad (4)$$

式中: $R_{\text{ele},t}$ 为储能电力电价; $\Delta t$ 为统计的时间间隔; $P_m(t)$ 为储能的充放电功率,根据“电源惯例”,放电时值为正,充电时值为负。

则 $P_m(t)$ 计算如式(5)

$$P_m(t) = \begin{cases} P(t) & P(t) \geq 0 \\ -P(t) & P(t) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P(t)$  为储能的出力序列。

备用功率是指储能功率介于最大充放电功率之间时具有的上下可调动裕量, 它可以作为电网的备用功率使用, 由此带来的收益即备用功率效益。储能上调是指其增加放电或减少充电, 下调是指其减少放电或增加充电, 上调、下调备用功率按式(6)、式(7)计算

$$P^{up}(t) = P_{rated} - P(t) \quad (6)$$

$$P^{dn}(t) = P_{rated} - (-P(t)) \quad (7)$$

多数情况下, 储能同时具有上、下调能力, 一般来说, 剩余容量过低时只用于下调, 过高时只用于上调。假设上、下调时间各占一半, 备用功率价格以小时清算, 每小时上备用为一个小时内的平均上备用, 下备用亦如此, 设上调备用电价为  $R_{up,t}$ , 下调备用电价为  $R_{dn,t}$  则每日备用功率收益如式(8)

$$B_{bk} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{24} [R_{up,t}(P_{rated} - P(t)) + R_{dn,t}(P(t) + P_{rated})] \quad (8)$$

静态效益、动态效益以及环境效益的计算较为复杂, 因此, 参考文献[9]的做法, 用固定效益作为储能参与调频的收益, 日收益计算如式(9)

$$B_{day} = B_{ele} + B_{bk} \quad (9)$$

综合考虑储能参与调频的成本与效益, 得到储能系统日净成本现值为

$$NET_{day} = C_{day} - B_{day} \quad (10)$$

## 2 调频场景下的储能配置模型

### 2.1 储能功率容量和能量容量配置通用方法

假设储能参与调频的时段以及起始时刻分别为  $T, t_0$ , 第  $t$  时段内储能出力为  $P(t)$ , 则储能的额定功率  $P_{rated}$  需要满足式(11)、式(12)、式(13)

$$P_{disch}^{\max} = \lceil \max_{t \in [t_0, t_0 + T]} [P(t)] \rceil \quad (11)$$

$$P_{ch}^{\max} = \lfloor \min_{t \in [t_0, t_0 + T]} [P(t)] \rfloor \quad (12)$$

$$P_{rated} \geq \max\left\{\frac{P_{disch}^{\max}}{\eta_{disch}}, P_{ch}^{\max} \eta_{ch}\right\} \quad (13)$$

式中:  $\eta_{ch}, \eta_{disch}$  分别为储能电池的充、放电效率;  $P_{disch}^{\max}, P_{ch}^{\max}$  分别为调频过程中需要储能提供或吸收的最大缺额、过剩功率。

从  $t_0$  时刻起至第  $t$  时刻, 调频动作需要储能电池提供或吸收的能量如式(14)

$$E(t) = \sum_{t=t_0}^t P(t) \Delta t \quad (14)$$

$E(t)$  大于零代表需要储能提供能量, 小于零代表需要储能吸收能量。

考虑到储能的寿命因素, 储能运行过程中, 储能的荷电状态  $SOC(t)$  需满足其上下限约束

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (15)$$

式中:  $SOC_{\max}, SOC_{\min}$  分别为储能荷电状态的上、下限值。

$$SOC(t) = SOC_{ref} - \frac{E(t)}{E_{rated}} \quad (16)$$

式中:  $SOC_{ref}$  为储能电池的初始荷电状态。

则储能电池额定容量  $E_{rated}$  需满足

$$E_{rated} = \frac{\max[E(t)] - \min[E(t)]}{DOD} \quad (17)$$

式中:  $DOD$  为储能电池的放电深度。

### 2.2 储能调频需求约束与调频效果指标

综合上节内容可知, 调频时段储能的出力序列  $P(t)$  直接决定了储能的功率容量配置与能量容量配置, 而  $P(t)$  的大小则取决于区域控制误差(area control error, ACE)的初始功率指令信号。在配置储能的过程中, 为了合理协调配置方案的经济与技术性能, 需要在配置模型中针对调频需求(即 ACE 信号)对储能出力的约束程度进行灵活调整, 因此引入调频需求约束如式(18)

$$|P(t) + ACE(t)| \leq \varepsilon \quad (18)$$

式中:  $\varepsilon$  即为储能出力与调频需求指令  $ACE(t)$  之间允许的最大偏差。

如前文所述, 储能出力  $P(t)$  依据电源惯例, 放电时为正, 充电时为负, 所以式(18)中为“+”号。

参考《华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》, 电网调频的性能指标如式(19)

$$K_p = K_1 K_2 K_3 \quad (19)$$

式中:  $K_1, K_2, K_3$  分别为调节速率指标、调节精度指标及响应时间指标。

由式(19)可知, 计算  $K_p$  需要储能响应 ACE 指令过程中完整的功率曲线, 而本文所提储能配置模型中并未涉及储能动作时的控制策略, 所求结果为储能每个时段的出力序列, 无法得到完整的输出功率曲线, 不适合用  $K_p$  指标评估调频效果。因此, 文献[9]利用频率偏差的均方根及其最大值作为调频效果的技术指标

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t_0}^{t_0+T} [\Delta f(t)]^2} \quad (20)$$

$$\Delta f_{\max} = \max[\Delta f(t)] \quad (21)$$

$$\Delta f_{\min} = \min[\Delta f(t)] \quad (22)$$

式中:  $N$  为调频过程中的总时段数;  $\Delta f(t)$  为频率偏差;  $\Delta f_{\max}$  为最大频率偏差;  $\Delta f_{\min}$  为最小频率偏差。

本文中的 ACE 采用不考虑联络线交换功率偏差要求的定频率控制模式<sup>[10]</sup>, 储能出力后的频率偏差如式(23)

$$\Delta f(t) = \frac{ACE(t) + P(t)}{B} \quad (23)$$

式中:  $B$  为电网的频率偏差系数。

### 3 算例分析

#### 3.1 场景参数

包含储能电站的某区域电网参数见表 1, 该电网某典型日的 ACE 数据见图 2(时段间隔 1 min)。储能电站所用磷酸铁锂电池的容量保持率如图 1, 某电力市场的储能电力电价、备用上调和下调电价分别见图 3—图 5<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 不同 DOD 下的调频效果分析

以调频效果指标  $J$  最优为目标, 基于式(18)的约束, 可得到储能参与二次调频时的出力序列。计算结果表明,  $\varepsilon$  取 7.26 MW 时, 频差均在死区范围内, 可作为满足二次调频需求的  $\varepsilon$  最大取值。

表 1 含储能电站的区域电网参数

Table 1 Regional power grid parameters with energy storage power stations

参数	数值
频率偏差系数 $B/(MW \cdot Hz^{-1})$	223.28
贴现率 $r/\%$	6
储能能量成本/(千元·MWh <sup>-1</sup> )	2 000
储能功率成本/(千元·MW <sup>-1</sup> )	3 500
储能充放电效率	0.95

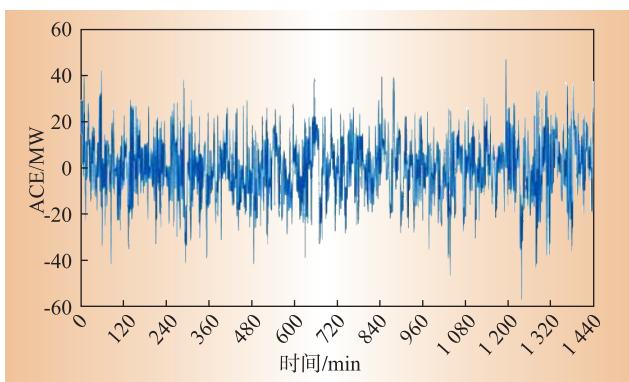


图 2 区域电网典型日 ACE 信号

Fig. 2 Typical daily ACE signals in regional power grid

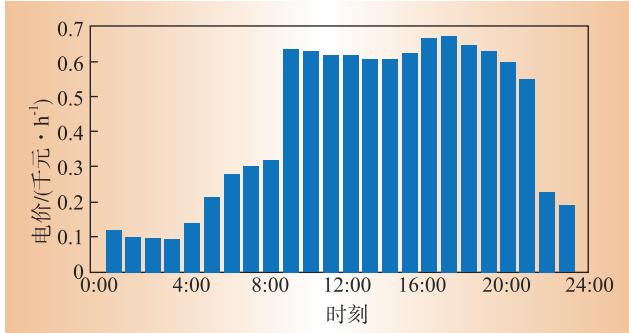


图 3 储能电力电价

Fig. 3 Power price of energy storage

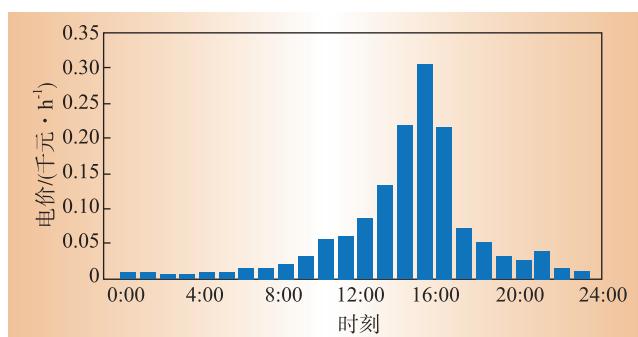


图 4 储能备用上调电价

Fig. 4 Reserve price up of energy storage

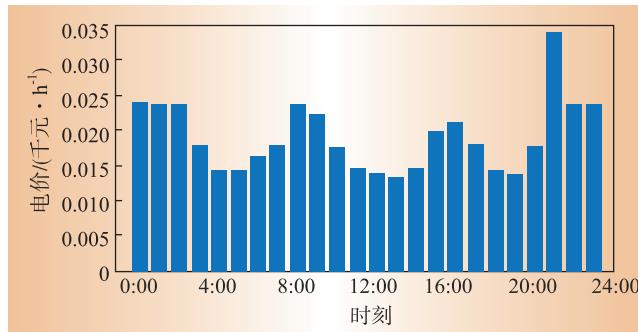


图 5 储能备用下调电价

Fig. 5 Reserve price down of energy storage

调频过程中储能功率出力  $P(t)$  如图 6, 先预设 DOD 为 80%, 由储能能量  $E(t)$  求得储能 SOC 的变化如图 7, 调频技术指标为  $J$  为 0.023 3,  $\Delta f_{\max}$  为 0.033,  $\Delta f_{\min}$  为 -0.033。

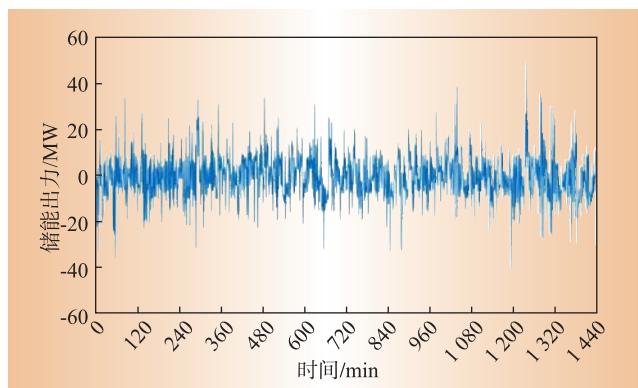


图 6 储能功率出力

Fig. 6 Power output of energy storage

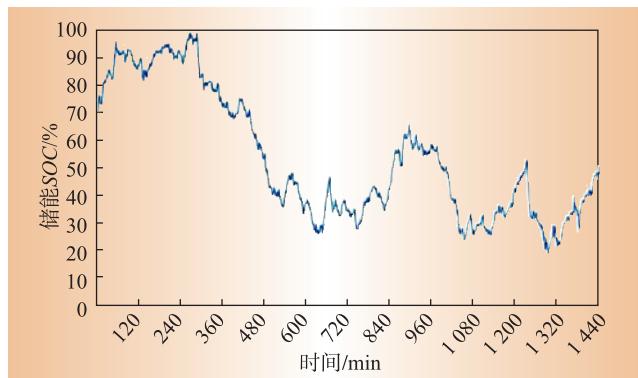


图 7 储能 SOC 变化

Fig. 7 SOC change of energy storage

对图1进行多项式拟合,得到式(3)中的参数B、C、D的拟合数值如表2所示。

表2 容量保持率数值拟合表

Table 2 Numerical fitting table of capacity retention rate

DOD /%	B	C	D
40	$-5.79 \times 10^{-5}$	$1.67 \times 10^{-9}$	$2.05 \times 10^{-13}$
60	$-8.94 \times 10^{-5}$	$1.37 \times 10^{-8}$	$-1.09 \times 10^{-12}$
80	$-1.36 \times 10^{-4}$	$3.13 \times 10^{-8}$	$-3.07 \times 10^{-12}$
100	$-1.71 \times 10^{-4}$	$4.46 \times 10^{-8}$	$-4.51 \times 10^{-12}$

根据前文所述,计算得各DOD下储能电池的循环寿命如表3所示。

表3 不同DOD下储能电池的循环寿命

Table 3 Cycle life of energy storage under different DOD

DOD /%	40	60	80	100
循环寿命/次	4 245	3 748	2 716	2 007

$\varepsilon$ 取7.26 MW时,各不同DOD下储能配置结果及经济指标对比如表4所示。

表4 经济指标对比

Table 4 Comparison of economic indicators

DOD /%	P <sub>rated</sub> /MW	E <sub>rated</sub> /MWh	C <sub>day</sub> /千元	B <sub>day</sub> /千元	NET <sub>day</sub> /千元
40		32.93	186.23		57.19
60		21.95	188.54		59.50
80	50.01	16.46	238.64	129.042	109.59
100		13.17	305.21		176.17

从配置结果可以看出,由于储能电池参与二次调频时对能量容量配置的需求较小,而对功率容量配置的需求较大,因此通过增大DOD来减少配置的储能容量的方式,所能够减少的投资成本相对有限。由于储能电池参与二次调频时频繁动作对电池寿命影响较大,当DOD从40%变为60%时,折算的日投资成本略有上升,而当DOD超过60%以后日投资成本开始急剧上升。可见随着DOD的增大,所需配置的储能电池容量不断降低,但日投资成本却反而呈现上升趋势。

因此,实际应用时选取DOD在40%~60%之间的电池,可使得整体经济性最优,且储能电池在工作过程中可以一直保持相对较高的剩余电量,在紧急情况下可以提供短时功率支撑。

### 3.3 不同 $\varepsilon$ 下的调频效果分析

取不同的 $\varepsilon$ 继续进行仿真计算,所得储能配置结果经济指标与调频技术指标如表5所示。

从表5中可以看出,随着 $\varepsilon$ 的减小,表明调频需求对储能出力的约束程度越强,调频

技术指标也不断提升。

从经济性的角度来看,约束程度越强,所需配置的储能额定功率容量与能量容量也越大,储能通过参与调频所能获取的日收益也相应提升。当 $\varepsilon$ 取5.51 MW时,储能系统日成本现值最低,即该取值为储能系统经济性与技术性的最佳平衡点,此后随着 $\varepsilon$ 的进一步减小,储能系统日成本现值不断增高。

因此,在配置储能时合理选择 $\varepsilon$ 的取值,可以灵活协调配置方案的经济性与技术性,满足实际工程应用中对经济性能与技术性能的不同需求。

此外,从表6中还可以看出,上节所得结论,即储能参与调频时的最优DOD选择,在不同的 $\varepsilon$ 取值下仍然适用。

## 4 结束语

本文以储能电池参与二次调频为研究场景,在构建储能的成本-效益模型时针对储能电池的循环寿命与DOD之间的关系进行了定量分析,提出了基于储能电池的容量保持率模型,并通过实际算例对比如分析了不同DOD及不同调频需求约束程度下储能参与调频的技术与经济特性,得出结论如下。

(1) 由于调频场景下对储能能量容量的需求相对较小,兼顾储能参与调频时的动作特性,选择较高DOD(40%~60%)的储能电池可使得整体经济性最优,而过高的DOD虽然可以减少所需配置的储能容量,但储能循环寿命的急剧减少使得折算后的日成本现值反而提高,不利于储能经济效益的发挥。

(2) 随着调频需求约束对储能出力的约束程度越来越强,调频技术指标也随之变优,而日成本现值呈现先减后增的趋势。通过调节约束程度的强弱,可协调配置方案的经济性与技术性,增强了配置的灵活性。

表5 不同 $\varepsilon$ 下的调频效果

Table 5 Frequency regulation effect under different  $\varepsilon$

$\varepsilon$ / MW	DOD / %	P <sub>rated</sub> / MW	E <sub>rated</sub> / MWh	C <sub>day</sub> / 千元	B <sub>day</sub> / 千元	NET <sub>day</sub> / 千元	J	$\Delta f_{\max}$	$\Delta f_{\min}$
5.51	40			34.63	183.14	53.56	0.021 0.025 -0.026	0.009 0.013 -0.012	0.003 0.005 -0.005
	60			23.09	184.99	55.42			
	80	51.82		17.32	233.46	132.58			
	100			13.85	297.98	103.89			
2.56	40			38.96	214.68	62.2	168.41	63.72	120.56
	60			25.97	216.19	54.49			
	80	54.77		19.48	273.04	152.47			
	100			15.58	348.71	120.56			
1.01	40			41.77	229	64.49	196.24	65.47	125.66
	60			27.85	229.98	164.51			
	80	56.32		20.89	290.16	125.66			
	100			16.71	370.36	205.86			

本文考虑了DOD对储能电池循环寿命的影响,但对储能在其全寿命周期内的容量衰减尚未展开深入分析与计算,故如何将其纳入考量获取更精确的配置结果有待进一步研究;同时,利用实时生成的ACE信号,研究如何优化传统调频机组与储能电站协同参加二次调频的调频策略,能够更好的发挥传统机组与储能电站各自的优势,也将是下一步的研究方向。**D**

## 参考文献:

- [1] 冯垛生,宋金莲.太阳能发电原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2007.  
FENG Duosheng, SONG Jinlian. Principle and application of solar power generation [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007.
- [2] 赵争鸣,刘建政,孙晓英.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科技出版社,2008.  
ZHAO Zhengming, LIU Jianzheng, SUN Xiaoying. Solar photovoltaic power generation and its application [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2008.
- [3] 周伏秋,蒋焱,邓良辰,等.能源变革新时代综合能源服务市场机遇[J].电力需求侧管理,2019,21(4):3-6.  
ZHOU Fuqiu, JIANG Yan, DENG Liangchen, et al. Comprehensive energy service market opportunities in the context of energy transformation [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):3-6.
- [4] 胡泽春,罗浩成.大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J].电力系统自动化,2018,42(8):2-15.  
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8):2-15.
- [5] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Utilising stored wind energy by hydro-pumped storage to provide frequency support at high levels of wind energy penetration [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12):1 485-1 497.
- [6] 丁明,徐宁舟,毕锐.用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J].电力系统自动化,2011,35(2):66-72.  
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2):66-72.
- [7] LEOU R C. An economic analysis model for the energy storage systems in a deregulated market. November 24-27, 2008[C]. Singapore:IEEE, 2008.
- [8] 孙鸣,桂旭.可向特定负荷时限独立供电的储能系统优化配置[J].电力系统自动化,2018,42(14):115-122.  
SUN Ming, GUI Xu. Optimal configuration of battery energy storage system providing independent power supply for specific load during certain time [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):115-122.
- [9] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Effect of autonomous distributed vehicle-to-grid (V2G) on power system frequency control. July 29-August 1, 2010[C]. Mangalore: IEEE, 2010.
- [10] 黄际元,李欣然,常敏,等.考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J].电工技术学报,2017(21):116-125.  
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017(21):116-125.
- [11] 汤杰,李欣然,黄际元,等.以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J].电工技术学报,2019,34(5):77-86.  
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5):77-86.
- [12] 陈丽娟,姜宇轩,汪春.改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J].电力自动化设备,2017,37(8):52-59.  
CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):52-59.
- [13] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等.电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J].电力系统自动化,2013,37(14):43-49.  
LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14):43-49.
- [14] 许珊,李扬.引导电动汽车有序充放电的峰谷电价时段优化模型[J].电力需求侧管理,2018,20(5):16-20.  
XU Shan, LI Yang. An optimization model of peak-valley price time interval for guiding the orderly charging and discharging of electric vehicles [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5):16-20.
- [15] YOU S, RASMUSSEN C N. Generic modelling framework for economic analysis of battery systems. January 23, 2012[C]. Edinburgh: IET, 2012.
- [16] FARES R L, MEYERS J P, WEBBER M E. A dynamic model-based estimate of the value of a vanadium redox flow battery for frequency regulation in Texas [J]. Applied Energy, 2014, 113:189-198.

## 作者简介:

傅金洲(1988),男,安徽合肥人,硕士,助理工程师,主要从事综合能源运行优化研究。

(责任编辑 郝洁)