

考虑储能寿命和参与调频服务的 风储联合运行优化策略

匡生, 王蓓蓓

(东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Optimization Strategy of Wind Storage Joint Operation Considering Energy Storage Life and Participating in Frequency Modulation Service

KUANG Sheng, WANG Beibei

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

摘要: 储能系统与风电场联合运行, 不但可跟踪风电场计划出力, 还可参与电网的辅助服务。以风储联合运行的总收益最大为目标, 考虑储能系统跟踪风电计划出力与参与电网二次调频服务, 建立风储联合运行的优化模型。该模型重点考虑了计及不同荷电状态下的储能寿命损耗和储能参与调频时向上调频电量与向下调频电量的平衡。基于实际风电场运行数据设计算例并进行仿真分析, 结果表明, 考虑储能寿命损耗和储能调频电量水平, 不仅可以合理衡量储能参与各项服务所带来的收益, 还可以充分发挥储能的作用并提高风储联合的收益。

关键词: 储能系统; 风力发电; 跟踪风电计划出力; 二次调频

ABSTRACT: The joint operation of the energy storage system and the wind farm can not only track the wind power schedule output, but also participate in ancillary service of the power grid. In order to maximize the total profit of the optimization of wind storage joint operation, the optimal model of wind storage joint operation was established considering the wind energy storage system tracking wind power schedule output and participating in the secondary frequency modulation service of the power grid. The model took into account the energy storage life loss under different state of charge, and the up-frequency modulation power and down-frequency modulation power balance when energy storage participated in frequency modulation. Based on the actual wind farm operation data, an example was designed and the simulation was carried out. The results show that considering the energy storage life loss level not only

measure the benefits of energy storage participating in various services, but also give full play to the role of energy storage and improve the benefits of wind storage joint operation.

KEY WORDS: energy storage system; wind power generator; tracking wind power schedule output; secondary frequency regulation

0 引言

风电是低碳、清洁、可持续的重要可再生能源, 同时与其他可再生能源相比具有技术较成熟、成本较低等优点, 积极开发利用风电对调整能源结构、减少环境污染、实现可持续发展等具有重要意义^[1-2]。风电等可再生能源参与市场竞争, 由于其固有的波动性和间歇性决定了其难以严格按照计划合同要求出力, 从而在市场竞争环节中难以与传统能源直接竞争。因此风电场必须提升风电预测的精度, 并利用相关配套设施平滑风电出力, 提高与调度计划出力的匹配度^[3]。目前, 除了对风电场自身进行优化设计外, 风电场与储能系统的联合运行受到了广泛关注^[4]。储能技术的发展为风电场并网参与市场竞争提供了可能, 但较高的储能成本使得风储联合运行减少弃风或进行套利收益难以在储能生命周期内得到回收^[5-6], 因此, 如何充分发挥储能系统在电网中的作用是提高储能系统的效益以及利用储能提高风电消纳能力的关键。

基金项目: 江苏省六大人才高峰项目(2015-ZNDW-003)。

Project Supported by Six Talents Summit in Jiangsu Province (2015-ZNDW-003).

目前,以跟踪计划出力和储能状态为目标研究储能系统的控制策略成为储能研究的热点。文献[7]利用储能功率输出调整并修正机组的发电计划以减少功率偏差。文献[8]提出采用电池储能的双时间尺度协调控制策略平抑风电出力波动,将其限制在允许的最大功率波动极限范围内。文献[9]将某区域的新能源及储能系统等效成一个在地理位置上分散但可统一调度管理的虚拟电厂,在考虑了系统的收益、成本等经济参数的基础上研究了储能系统运行方式。以上研究对于储能系统的处理都是作为风电场的一个附属系统,而不是作为一个独立的个体,致使储能系统无法直接进行市场交易以获取经济利益,因此在风储联合运行时,应将风电和储能作为2个市场参与实体进行研究。文献[10-11]研究了储能系统配合传统发电机组参与调频的控制策略,并验证了其有效性。文献[12]基于两阶段随机优化模型分析了风电长期运行区间内储能相较于电力购买协议的经济性,但其控制策略还是集中在储能作为独立个体参与调频市场,同时也没有考虑储能系统的寿命折损以及参与调频服务时的性能表现,对储能的价值存在过高的估计。文献[13]考虑储能用于减小弃风和参与电网二次调频服务,但并未考虑风电出力预测误差的影响,且计及储能调频表现时只考虑储能自身荷电状态(state of charge, SOC)的状况,而未从系统的角度进行考虑。

针对以上问题,本文依据我国风电运行的实际情况,研究考虑储能寿命和参与调频服务的风储联合运行优化策略。在跟踪计划出力之余利用储能的剩余调节空间参与调频服务,并定义储能调频电量平衡度,以反映储能系统调频性能表现并考虑其对调频补偿的影响,建立了风储联合运行的优化模型,算例分析结果表明,该模型可提高风储联合的收益并充分发挥储能的作用。

1 风储联合运行模式

常规的风储联合运行模式为:储能在风电富裕时充电,在风电匮乏时放电。此种运行模式不仅造成储能利用率降低,而且使得储能在不同时段剩余的向上或向下调节功率空间得不到充分利

用。若储能同时参与调频服务,则可充分发挥储能系统灵活性好、响应快的优点,提高储能系统的利用效率和运行收益,并可改善整个系统的调频效果。由于储能参与调频服务有容量和功率的限制,还存在储能自身的电量损耗,因此应合理地给储能分配参与跟踪计划出力和调频功率,并根据储能的SOC情况制定其充放电策略,从而更好地发挥储能系统的作用。

国内外针对调频资源的补偿都制定了具体的政策,如美国联邦能源管理委员会(federal energy regulatory commission, FERC)发布的FERC755号法令中规定,对调频资源补偿包含2个部分^[14]:一是参与调频服务的容量补偿;二是参与调频服务的电量补偿。其中,电量补偿反映提供调频辅助服务的实际贡献。同时,美国高等法院修订了FERC 745号法令,增强了储能资源相对于传统发电站的竞争力,为储能资源参与调频提供政策支持。在我国,各地区能源监管部门也制定了辅助服务的实施细则和补偿机制,但对储能参与调频的准入条件和补偿办法并不统一,存在很大分歧。本文在参考美国的调频补偿机制的基础上,区分向上和向下调频,并假设储能作为调频市场中的优质调频资源和价格接受者,即所报调频容量全部被电网调度机构所接受,并以15 min作为1个调频服务的周期和结算时段。

由于储能可以时刻参与调频服务,因此可根据风电出力的预测值和实际值以及储能的实时容量安排储能参与调频的运行策略。本文提出的风储联合运行包含以下步骤:

- 1) 由风电场预测得到次日每隔15 min的风电出力曲线(96点);
- 2) 根据国标风电波动率的规定,以及风电场申报给调度中心的出力值,由调度中心向风储联合体下发次日风电计划出力曲线;
- 3) 风储联合体综合考虑电价、储能成本、调频收益及考核惩罚等因素,优化出力方案。

需要说明的是,若实际出力与申报出力发生偏离,则根据偏离量的大小对风电场进行惩罚。由于风储联合体申报的出力基于对风电场的出力预测,因此可激励风电场提高对风电预测的精度。

2 储能跟踪计划出力和参与调频的优化模型

2.1 目标函数

为了平衡储能跟踪计划出力与参与调频服务,建立同时考虑跟踪风电出力和参与调频的风储联合优化模型,以最大化风储联合体的运行收益 W 。联合体优化运行的目标函数包括4个部分:风储联合上网电量收益 W_t^e 、出力偏离惩罚 W_t^d 、调频服务收益 W_t^{resp} 和寿命折损费用 W_t^c 。

$$\max W = \sum_t (W_t^e + W_t^{\text{resp}} - W_t^c - W_t^d) \quad (1)$$

2.1.1 风储联合上网电量收益

考虑风储联合运行总的上网功率,总电量收益计算如下:

$$W_t^e = c_t^e P_t \Delta t \quad (2)$$

$$P_t = P_t^w + P_t^d - P_t^c \quad (3)$$

式中: c_t^e 为时段 t 的风电上网电价; P_t 为风储联合体在时段 t 的总输出功率; P_t^w 为风电场在时段 t 的输出功率; P_t^d 和 P_t^c 分别为储能在时段 t 的放电功率和充电功率。

2.1.2 出力偏离惩罚

储能由于输出功率限制及同时参与调频市场,可能导致部分时段风储联合出力并不能满足风电计划出力曲线,因此考虑当风电出力未达到计划出力时,对未达到要求部分进行出力偏离惩罚,可表示为

$$W_t^d = c_t^d |P_t - P_t^{\text{wp}}| \quad (4)$$

式中: c_t^d 为时段 t 的单位出力偏离惩罚系数; P_t^{wp} 为时段 t 的风电计划出力。

2.1.3 调频服务收益

储能调频收益考虑储能参与向上、向下调频服务,包括调频容量收益和调频电量补偿收益,可表示为

$$W_t^{\text{resp}} = f(c_t^{\text{resp}} + mc_t^{\text{real}})(P_t^{\text{resp,up}} + P_t^{\text{resp,dw}}) \quad (5)$$

式中: f 为储能调频电量平衡度; c_t^{resp} 为时段 t 的调频容量价格; m 为调频实际使用电量系数; c_t^{real} 为时段 t 的调频电量价格; $P_t^{\text{resp,up}}$ 和 $P_t^{\text{resp,dw}}$ 分别为

时段 t 上报参与向上调频和向下调频的功率。

不论是美国电力辅助服务市场还是我国各地区电网的辅助服务补偿机制,都要求考核调频资源在调频过程中的表现,并通过性能指标来衡量。如果性能指标得分较低,所得到补偿将会减小甚至可能被取消参与调频服务的资格。因此,本文在优化模型中将考虑储能参与调频时的表现,并定义储能调频电量平衡度 f ,用于反映储能参与调频市场时的调频性能,可表示为

$$f = 1 - |P_t^{\text{resp,up}} / \bar{P}_d - P_t^{\text{resp,dw}} / \bar{P}_c| \quad (6)$$

式中 $\bar{P}_d$ 和 $\bar{P}_c$ 分别为储能系统放电、充电功率上限。式(6)考虑储能参与调频时的向上调频电量和向下调频电量的平衡,而不是储能自身还存在的充电容量和放电容量空间。

由式(6)可以看出 $f \in [0,1]$,其值越大,则储能双向调频越平衡,双向工作能力越强。当 $P_t^{\text{resp,up}} / \bar{P}_d = P_t^{\text{resp,dw}} / \bar{P}_c$ 时, $f=1$,双向调频能力最为平衡。特别地,当 f 计算值小于0.1时, f 取值为0.1。

2.1.4 寿命折损费用

储能寿命与其充放电循环次数相关,一般用循环充放电总电量来定义,因此,寿命折损与储能的充放电量成正比。同时,当储能处于较高的荷电状态放电时,对其使用寿命影响较小,反之则会加快其寿命衰减,如图1所示^[15-17]。将这种关系用寿命损耗系数 $\lambda(S(t))$ 进行表征:

$$\lambda(S(t)) = \begin{cases} 1.3, & 0 \leq S(t) \leq 0.5 \\ -1.5S(t) + 2.05, & 0.5 \leq S(t) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $S(t)$ 为储能在时段 t 的荷电状态。

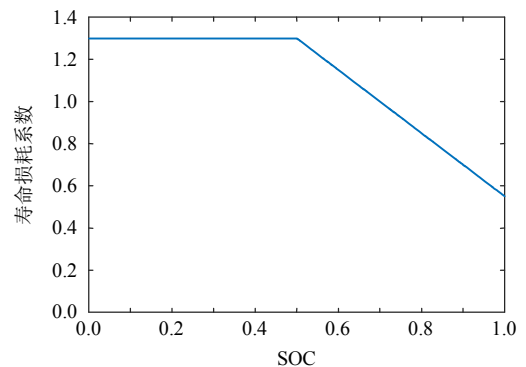


图1 寿命损耗系数与荷电状态关系曲线

Fig. 1 Relationship between life loss coefficient and SOC

令储能电池单位充放电电量的寿命折损费用为 c_t^c ，则寿命折损费用表示为

$$W_t^c = \lambda(S(t))c_t^c \Delta t |P_t^d - P_t^c + m(P_t^{\text{resp},\text{up}} - P_t^{\text{resp},\text{dw}})| \quad (8)$$

2.2 约束条件

2.2.1 功率约束

风电出力约束和风储总功率限值约束如下：

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^w \leq \bar{P}_t^w \\ 0 \leq P_t + P_t^{\text{resp},\text{up}} \leq \bar{P}_t \\ -\bar{P}_c \leq P_t - P_t^{\text{resp},\text{dw}} \leq \bar{P}_c \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\bar{P}_t^w$ 为风电场的输出功率上限； $\bar{P}_t$ 为风储联合体的总输出功率上限。

储能充放电功率约束及状态约束如下：

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^d \leq u_t^d \bar{P}_d \\ 0 \leq P_t^c \leq u_t^c \bar{P}_c \\ 0 \leq u_t^d + u_t^c \leq 1 \\ u_t^d, u_t^c \in \{0,1\} \end{cases} \quad (10)$$

式中 u_t^d 和 u_t^c 分别为储能在时段 t 放电和充电的 0-1 变量。该约束表明储能系统不可同时充放电。

储能参与调频时的功率约束如下：

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^d + P_t^{\text{resp},\text{up}} \leq \bar{P}_d \\ -\bar{P}_c \leq P_t^d - P_t^{\text{resp},\text{dw}} \leq \bar{P}_d \\ 0 \leq P_t^c + P_t^{\text{resp},\text{dw}} \leq \bar{P}_c \\ -\bar{P}_d \leq P_t^c - P_t^{\text{resp},\text{up}} \leq \bar{P}_c \\ 0 \leq P_t^{\text{resp},\text{up}} \leq \bar{P}_d \\ 0 \leq P_t^{\text{resp},\text{dw}} \leq \bar{P}_c \end{cases} \quad (11)$$

式(11)保证在参与调频服务时，储能的总功率输出值不得超过其功率限值，且值得注意的是，无论储能处于放电还是充电状态，都可以同时参与向上、向下调频服务。

2.2.2 储能容量约束

储能容量约束主要包括储能容量可持续约束和限制约束(SOC 约束)。容量可持续性约束要求储能运行周期前后容量一致，以保证储能可在长时间尺度内连续运行。

容量可持续性约束如下：

$$E_T = E_0 \quad (12)$$

式中： E_T 为储能运行周期结束后的电量； E_0 为储

能运行周期开始时的电量。

容量限值约束如下：

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (13)$$

$$E_t = (1 - \alpha)E_{t-1} - (P_t^d + mP_t^{\text{resp},\text{up}})\Delta t / \eta_d +$$

$$(P_t^c + mP_t^{\text{resp},\text{dw}})\eta_c \Delta t \quad (14)$$

式中： E_t 为储能系统在时段 t 的电量； $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为储能容量下限和上限； η_d 和 η_c 分别为储能电池的放电和充电效率； α 为储能的自放电率。

2.3 模型求解

采用通用的优化软件 GAMS23.8.2 和 Matlab R2018a 联合求解储能跟踪风电计划出力和参与调频的优化模型，其中 GAMS 中求解器采用的是 BOMMIN 算法。

3 算例分析

3.1 算例设置

风电数据取江苏南通某风电场 1 天内 96 点的预测数据及实际出力数据。风电电量价格参考国内风电上网电价 520 元/(MW·h) 计算，出力偏离惩罚系数则按风电上网电价的 2 倍即 1 040 元/(MW·h) 计算。储能调频容量价格按 20 元/MW 计算，调频里程价格按 15 元/MW 计算，调频实际使用电量系数为 0.05，并假定模型中的调频市场按 15 min 出清。

假设与风电联合运行的储能系统容量为 26 MW·h，初始储能电量为 13 MW·h，储能充放电功率上限为 10 MW，储能运行容量上、下限分别为 22 MW·h 和 4 MW·h，寿命折损费用按 100 元/(MW·h) 计算，储能充放电效率统一为 0.95，自放电率设为 0.01%。

3.2 计算结果与分析

对于储能参与调频服务给出的价格补偿，储能可同时用于跟踪计划出力和参与调频，利用其可用上调和下调功率区间获取更多收益。图 2 为采用传统方案^[13]和本文方案时储能参与前后的风电出力，图 3 为基于这 2 种方案的储能 SOC 运行曲线，表 1 为 2 种方案收益对比情况。

从图 2 可以看出，除在 25 时段由于储能的部分容量优先考虑参与调频服务而导致出力偏差外，采用本文提出的储能运行方案满足风电计划

曲线,所产生的出力偏离惩罚值也仅为 0.074 万元;而采用传统方案时,产生了几时段明显的出力偏离,除了部分时段考虑调频服务所产生的出力偏差外,通过图 3 可以看出,基于传统方案时,由于储能曲线在 14、57、61 时段,储能运行达到储能容量下限,限制了储能计划跟踪风电出力的能力,因此所产生的出力偏离惩罚值达 0.599 万元。同时,与传统方案的储能 SOC 相比,基于本文方案的储能 SOC 一直运行在较高水平,使得

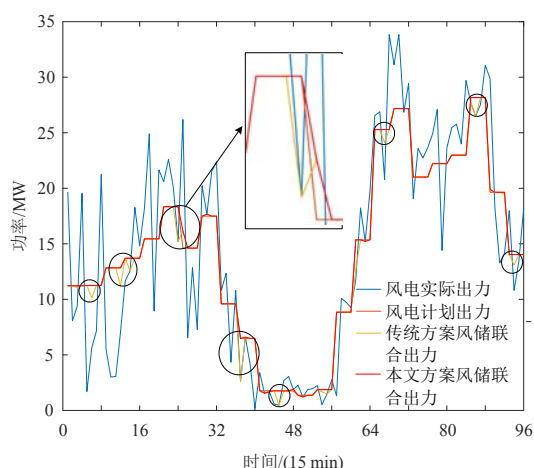


图2 储能参与前后的风电出力

Fig. 2 Wind power output before and after energy storage participation

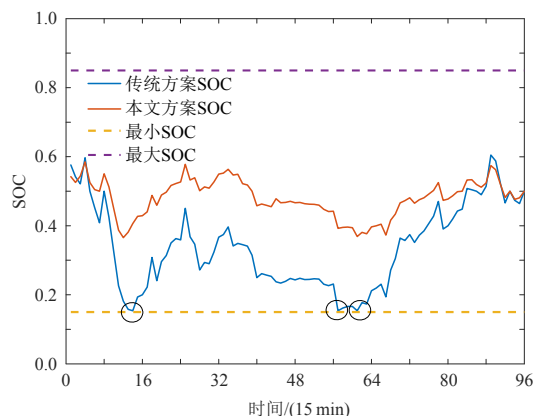


图3 储能 SOC

Fig. 3 Energy storage SOC

表1 收益对比

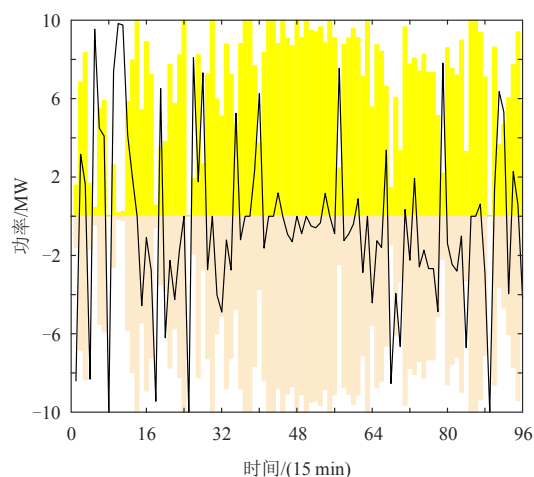
Tab. 1 Profit comparison

收益	传统方案	本文方案
风储上网电量收益 W_t^e	17.566	17.828
出力偏差惩罚 W_t^d	-0.599	-0.074
调频服务收益 W_t^{rsp}	2.789	2.084
储能折损费用 W_t^c	-1.000	-0.922
总收益	18.756	18.916

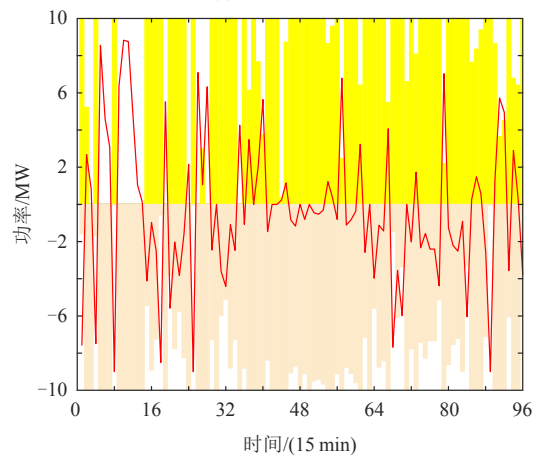
对应时刻储能的寿命折损系数较低,从而产生的储能折损费用为 0.922 万元,比采用传统方案所产生的储能折损费用降低了 7.8%,因此若储能折损系数及出力偏离系数更大时,采用本文方案得到的收益将会更加明显。

图 4 为基于传统方案和本文方案的储能资源参与调频服务的情况。在本文方案中,由于考虑储能的寿命折损及储能参与调频服务时的调频表现考核,使得即使储能参与调频服务,储能的实时充放电功率也并不是工作在满功率运行状态。

从图 4 可以看出,采用传统方案时,在 8、26、89 时段,由于储能跟踪计划出力达到储能本身出力峰值,此时储能未能提供调频服务。而采用本文方案时,由于考虑到调频服务的储能调频电量平衡度及储能在运行中的寿命折损,储能参



(a) 传统方案



(b) 本文方案

图4 储能参与调频服务

Fig. 4 Energy storage participate in frequency services

与调频服务的资源更加合理,虽然因对储能资源参与调频服务计及调频表现的衡量而在储能收益上少于传统方案,但由于其更加合理地调控储能资源参与跟踪计划出力和电网调频服务,反而使得风储联合系统整体的收益高于传统方案。

4 结论

为了提高风储联合运行的经济性,充分发挥储能系统快速调节功率的优势,首先分析了风电和储能联合运行的模式以及储能参与调频服务补偿机制,提出了利用储能同时跟踪风电计划出力和参与电网调频服务的策略。其次,以风储联合运行收益最大为目标,建立了储能跟踪计划出力和参与调频的优化模型。基于目前风电上网电价和调频服务价格进行仿真验证,结果表明所提方法相较于传统方法可显著提高风储联合运行的收益。然而,传统交易模式下储能和风电存在的多边交易矛盾冲突问题并未加以考虑,下一步将研究基于泛在电力物联网下区块链的共享储能运行策略。

参考文献

- [1] 童光毅. 关于当代能源转型方向的探讨[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 1-3.
- [2] 田世明, 梁文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 432-439.
- [4] 鹿婷, 贾继超, 彭晓涛. 一种考虑经济调度的风电场储能控制策略[J]. 分布式能源, 2019, 4(3): 40-49.
- [5] 王芝茗. 大规模风电储能联合系统运行与控制[M]. 中国电力出版社. 2016.
- [6] 殷志敏, 翁洁, 翁时乐, 等. 基于 DRTS 的风储联合并网功率波动特性及电能质量研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 62-67.
- [7] 黄杨, 胡伟, 闵勇, 等. 考虑日前计划的风储联合系统多目标协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4743-4751.
- [8] 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.
- [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] 文贤植, 张世海, 邓彤天, 等. 大容量电力储能调峰调频性能综述[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 487-492.
- [11] Jin C, Lu N, Lu S, et al. A coordinating algorithm for dispatching regulation services between slow and fast power regulating resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1043-1050.
- [12] Moreira, Marques R M. Business models for energy storage systems[D]. London: Imperial College London, 2015.
- [13] 胡泽春, 夏睿, 吴林林, 等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2251-2257.
- [14] 陈大字, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.
- [15] Jenkins D P, Fletcher J, Kane D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191-200.
- [16] 陈刚, 包宇庆, 张金龙, 等. 计及寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1495-1501.
- [17] Duggal I, Venkatesh B. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2110-2118.

收稿日期: 2019-09-26.

作者简介:



匡生

匡生(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统优化控制及经济性评估, kuangpusheng@hotmail.com;



王蓓蓓

王蓓蓓(1979), 女, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场与电力需求侧管理, wangbeibei@seu.edu.cn.

(责任编辑 尚彩娟)