

8-20-2020

Optimized configuration of energy storage capacity of wind farms using cloud energy storage leasing services

Xiafei TANG

Hunan Collaborative Innovation Center for Clean Energy and Smart Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China

Xianxiang WU

Hunan Collaborative Innovation Center for Clean Energy and Smart Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China

Qingqing REN

State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd Pingxiang Power Supply Branch

Junbo CAO

State Grid Shandong Electric Power Company Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China

Boyang ZHOU

Hunan Collaborative Innovation Center for Clean Energy and Smart Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

TANG, Xiafei; WU, Xianxiang; REN, Qingqing; CAO, Junbo; ZHOU, Boyang; LI, Bin; and ZHOU, Renjun (2020) "Optimized configuration of energy storage capacity of wind farms using cloud energy storage leasing services," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 1, Article 11.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.01.011

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss1/11>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Optimized configuration of energy storage capacity of wind farms using cloud energy storage leasing services

Authors

Xiafei TANG, Xianxiang WU, Qingqing REN, Junbo CAO, Boyang ZHOU, Bin LI, and Renjun ZHOU

利用云储能租赁服务的风电场 储能容量优化配置

唐夏菲¹, 吴献祥¹, 任青青², 曹俊波³, 周博洋¹, 李 斌¹, 周任军¹

(1. 长沙理工大学湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心, 湖南 长沙 410004; 2. 国网江西省电力有限公司萍乡供电分公司, 江西 萍乡 337000; 3. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东 枣庄 277000)

摘 要:云储能聚合了大量分布式储能与集中式储能的控制信息, 风电场通过租赁云储能和自建实体储能可实现出力功率可控。为延长自建储能设备使用寿命, 设计了功率分配策略。以自建储能设备全寿命周期成本、云储能租赁费用、弃风惩罚成本、缺电惩罚成本最小为目标函数, 建立风电场自建储能与租赁云储能容量最优配置模型。仿真分析表明, 不同的云储能租赁单价, 将影响云储能利用和充放电结果, 从而影响自建储能的最优配置容量。云储能租赁和自建实体储能的合理配置, 具有良好有效的经济性和实用性。

关 键 词:云储能; 云储能容量优化; 风电波动平抑; 储能容量配置

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.011 中图分类号:TM614 文章编号:1673-9140(2020)01-0090-06

Optimized configuration of energy storage capacity of wind farms using cloud energy storage leasing services

TANG Xiafei¹, WU Xianxiang¹, REN Qingqing², CAO Junbo³,
ZHOU Boyang¹, LI Bin¹, ZHOU Renjun¹

(1. Hunan Collaborative Innovation Center for Clean Energy and Smart Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Pingxiang Power Supply Branch; 3. State Grid Shandong Electric Power Company Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China)

Abstract: Cloud energy storage can aggregate a large amount of distributed energy storage and centralized energy storage control information. The wind farm can realize the controllability of the output power by renting cloud energy storage and self-built physical energy storage. In order to extend the service life of self-built energy storage equipment, a power allocation strategy is designed. Based on the life cycle cost of self-built energy storage equipment, cloud energy storage energy lease cost, abandoned wind penalty cost, and minimum power shortage penalty cost, the optimal configuration model of the self-built energy storage and the leased cloud energy storage capacity is established for a wind farm. Simulation analysis shows that the energy rental unit prices of different cloud energy storage will affect the cloud energy storage energy utilization, charge and discharge results, thus affecting the optimal configuration capacity of self-built

收稿日期:2019-08-10; 修回日期:2019-09-02

基金项目:湖南省自然科学基金(2019JJ40302)

通信作者:周任军(1964-),女,博士,教授,主要从事电力系统优化、新能源接入系统、电力需求侧管理及分布式电源规划研究; E-mail: zrzj0731@163.com

energy storage. The reasonable allocation of cloud energy storage energy lease and self-built physical energy storage has good economy and practicality.

Key words: cloud energy storage; cloud energy storage capacity optimization; wind power fluctuations; storage capacity configuration

随着风电渗透率升高^[1],风电为电力系统输出大量低成本清洁能源的同时,其固有的波动性、间歇性对电力系统可靠性、稳定性的影响也在与日俱增^[2]。考虑风储联合系统的经济效益以及利用储能平抑风电功率波动的推广价值,研究风电场的储能容量优化配置意义重大^[3]。

在未来电力系统发展趋势下大量分布式电源与分布式储能协同运行^[4],大量分布式储能中必然存在储能容量的空置率。为此,文献[5]提出云储能(cloud energy storage, CES)的概念,而云储能提供商能够聚合这部分闲置储能容量并投资一部分集中式储能装置来提供储能租赁服务,将成为电力系统新态势。风电场可租赁云储能用于平抑风电功率波动,由此带来了新的储能容量配置问题,亟需研究租赁云储能容量与自建实体储能容量联合优化配置。

目前,关于风电场自建实体储能容量与租赁容量联合优化配置问题的研究鲜有报道,但实体储能的容量优化配置已有许多研究成果。文献[6]定义了风电场可调度性作为约束,计及放电过程蓄电池寿命减损建立了目标函数,实现了考虑蓄电池经济性的风电场可调度性;文献[7]提出了荷电状态分区模型对电池充放电功率实时调整,以风电场投资维护成本、运行成本、电池越限成本最小为目标函数实现风电波动平抑;文献[8]兼顾 1 min 和 10 min 的风电并网要求,构建了以越限惩罚、储能成本、限电损失成本最小为目标的储能配置模型;文献[9]以风—光—储系统投资主体在供电收入及全寿命周期成本下的收益最优为目标,计算风电、光伏、储能投资商在不同运营模式下的最优容量配置策略。

云储能作为电力系统储能服务工具,在不久的将来,均可能被风电场、需求侧等租赁,并和自建储能共同提供储能服务^[10]。为此,该文研究风电场自建储能与租赁云储能的容量最优配比。首先给出风电场自建储能与租赁云储能联合储能系统的架构以及风电场、自建储能系统、云储能系统三者的功率平衡关系,并刻画自建储能与云储能联合系统的充放电过程能量变化的数学描述;其次,为延长自建储能使用寿命,设计自建储能与云储能的功率分配策略,

即在云储能充放电优先的策略下,以自建储能的全寿命周期成本、云储能租赁费用、弃风惩罚成本、缺电惩罚成本最小为目标函数,构建风电场自建储能与租赁云储能容量最优配置模型,从而获取储能容量配置最优方案。

1 风电场配置自建储能与云储能的系统架构

1.1 云储能

云储能提供商能够聚合社会上闲置的分布式储能资源,根据用户对储能租赁的需求,同时投资建设一定量集中式储能资源^[11]。云储能将大量集中式和分布式储能资源出租给用户,用户可以购买一定时期内一定能量容量或功率容量的储能服务。云储能与用户通过通信系统与金融系统双向联系,依靠电网进行能量传输,其中通信系统传输速度几乎是实时的,用户使用云储能如同使用实体储能。

云储能实现了社会综合成本的降低^[12]。首先,多个云储能用户使用储能的行为上存在时间差异性与互补性,实际云储能的总功率容量与能量容量可以小于云储能所有用户的需求容量,从而节省投资成本;其次,云储能聚合社会上闲置的储能服务于有储能需求的用户,提高了资源利用效率,实现了综合成本的降低;再者,云储能投资大量集中式储能可以产生规模经济效益,享受较低的单位储能投资成本。

1.2 自建储能与云储能配置结构

风电场自建实体储能同时购买云储能的配置结构如图 1 所示,图中, $P_w(t)$ 、 $P_B(t)$ 分别为 t 时刻风电场原始出力、自建储能与云储能联合系统出力; $P(t)$ 为 t 时刻风电场与自建储能系统、云储能系统共同出力; $P_{own}(t)$ 、 $P_{rent}(t)$ 分别为 t 时刻自建储能系统、云储能系统出力。功率平衡关系为

$$P(t) = P_w(t) + P_B(t) \quad (1)$$

$$P_B(t) = P_{own}(t) + P_{rent}(t) \quad (2)$$

为降低传输过程的功率损耗,云储能提供商一般选择距离风电场较近的储能设备满足风电场充放电需求,因此该文近似认为云储能系统与风电场处

于同一电力系统节点。自建储能与云储能联合系统的充放电过程能量变化的数学描述如式(3)~(6)。

充电过程:

$$E_{own}(t) = E_{own}(t - \Delta t) + \eta_{own}^C P_{own}(t) \Delta t \quad (3)$$

$$E_{rent}(t) = E_{rent}(t - \Delta t) + \eta_{rent}^C P_{rent}(t) \Delta t \quad (4)$$

放电过程:

$$E_{own}(t) = E_{own}(t - \Delta t) + \frac{P_{own}(t)}{\eta_{own}^D} \Delta t \quad (5)$$

$$E_{rent}(t) = E_{rent}(t - \Delta t) + \frac{P_{rent}(t)}{\eta_{rent}^D} \Delta t \quad (6)$$

式中 Δt 为采样间隔; $E_{own}(t)$ 、 $E_{rent}(t)$ 分别为 t 时刻自建储能系统与云储能系统的剩余能量; η_{own}^C 、 η_{own}^D 分别为自建储能系统的充、放电效率; η_{rent}^C 、 η_{rent}^D 分别为云储能系统的充、放电效率。

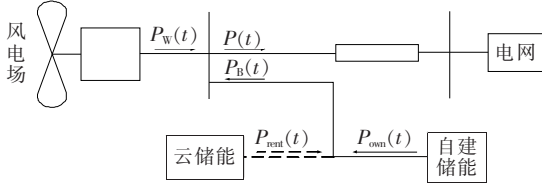


图1 风电场配置自建及云储能的系统架构

Figure 1 The system architecture of wind farm configuration, self-built energy storage, cloud energy storage

2 风电场自建储能与云储能容量最优配置

2.1 自建储能与云储能的功率分配策略

在风电场平抑风电功率波动过程中,当风电场原始出力 $P_w(t)$ 大于并网目标值 $P_{ref}(t)$ 时,即 $P_w(t) > P_{ref}(t)$ 时自建储能与云储能联合系统充电,当 $P_w(t) < P_{ref}(t)$ 时自建储能与云储能联合系统放电。

蓄电池由于其优越的能量密度成为目前应用最广泛的储能种类^[13],因此假设风电场自建储能种类为蓄电池。蓄电池的使用寿命主要受工作环境温度、充放电深度、充放电次数的影响^[14],减少蓄电池的充放电次数及深度可以延长蓄电池的使用寿命,从而减少风电场自建储能的全寿命周期成本。

该文设计的自建储能与云储能的功率分配策略为优先使用云储能满足充放电需求,当云储能以最大功率充放电仍无法满足需求时,剩余的充放电需求由自建储能满足。充放电过程为

当 $0 \leq |P_w(t) - P_{ref}(t)| \leq P_{rent}^{cap}$ 时:

$$\begin{cases} P_{own}(t) = 0 \\ P_{rent}(t) = |P_w(t) - P_{ref}(t)| \end{cases} \quad (7)$$

当 $P_{rent}^{cap} < |P_w(t) - P_{ref}(t)| \leq P_{own}^{cap} + P_{rent}^{cap}$ 时:

$$\begin{cases} P_{own}(t) = |P_w(t) - P_{ref}(t)| - P_{rent}(t) \\ P_{rent}(t) = P_{rent}^{cap} \end{cases} \quad (8)$$

当 $|P_w(t) - P_{ref}(t)| > P_{own}^{cap} + P_{rent}^{cap}$ 时:

$$\begin{cases} P_{own}(t) = P_{own}^{cap} \\ P_{rent}(t) = P_{rent}^{cap} \end{cases} \quad (9)$$

式中 P_{own}^{cap} 为待决策的自建储能的额定功率容量; P_{rent}^{cap} 为待决策的租赁云储能的额定功率容量。

2.2 目标函数

风电场储能容量优化的目标在于满足功率波动平滑的约束下,使总成本最少,包括自建储能成本、租赁云储能的成本、弃风惩罚成本、平滑功率短缺惩罚成本。其中,自建储能成本、租赁云储能成本为投入成本,弃风惩罚成本、平滑功率短缺惩罚成本为运行成本,通过调节投入成本与运行成本的相互制约关系,以最低的成本实现风电场最优经济运行。

$$\min(C_{own} + C_{rent} + C_{LT} + C_{ST}) \quad (10)$$

式中 C_{own} 、 C_{rent} 分别为风电场自建储能的全寿命周期成本、租赁云储能的成本; C_{LT} 、 C_{ST} 分别为风电场自建储能装置与租赁云储能后的弃风惩罚成本、平滑功率短缺惩罚成本。

1) 自建储能全寿命周期成本。

蓄电池的全寿命周期成本主要包含投资成本、运行维护成本。投资成本由额定功率容量、能量容量构成,并考虑贴现率影响,并且运行维护成本主要与储能电池的额定功率相关。即

$$C_{inv} = \frac{\delta(1+\delta)^y}{(1+\delta)^y - 1} (\rho_{pinv} P_{own}^{cap} + \rho_{einv} E_{own}^{cap}) \quad (11)$$

$$C_{om} = \frac{\delta(1+\delta)^y}{(1+\delta)^y - 1} \rho_{eom} P_{own}^{cap} \quad (12)$$

$$C_{own} = C_{inv} + C_{om} \quad (13)$$

式中 C_{inv} 、 C_{om} 分别为自建储能投资成本、运行维护成本; ρ_{pinv} 、 ρ_{einv} 分别为单位储能功率容量投资费用、单位储能能量容量投资费用; ρ_{eom} 为单位储能功率容量维护费用; δ 为贴现率; y 为自建储能的使用寿命; E_{own}^{cap} 为待决策的自建储能的能量容量。

2) 云储能租赁成本。

云储能提供商决定了单位云储能功率容量、能量容量的价格,风电场根据价格决策租赁功率容量、能量容量的大小,租赁成本为

$$C_{rent} = \lambda_1 P_{rent}^{cap} + \lambda_2 E_{rent}^{cap} \quad (14)$$

式中 λ_1, λ_2 分别为单位云储能功率容量、能量容量的每年的租赁费用; $E_{\text{rent}}^{\text{cap}}$ 为待决策的租赁云储能的能量容量。

3) 弃风惩罚成本。

当自建储能系统、云储能系统平抑功率不足时产生弃风,即

$$L_{\text{LT}} = \sum_{t=1}^{T_1} (P(t) - P_{\text{ref}}(t)) \Delta t \quad (15)$$

$$C_{\text{LT}} = \rho_L L_{\text{LT}} \quad (16)$$

式中 $L_{\text{LT}}, C_{\text{LT}}$ 为加装储能系统后该月弃风电量、惩罚成本; T_1 为弃风时刻数; ρ_L 为风电场弃风能量损失对应单价。

4) 平滑功率短缺损失成本。

$$L_{\text{ST}} = \sum_{t=1}^{T_2} (P_{\text{ref}}(t) - P(t)) \Delta t \quad (17)$$

$$C_{\text{ST}} = \rho_S L_{\text{ST}} \quad (18)$$

式中 $L_{\text{ST}}, C_{\text{ST}}$ 为平滑功率短缺电量、损失成本; T_2 为平滑功率短缺时刻数; ρ_S 为风电场平滑功率短缺能量对应单价。

2.3 约束

1) 自建储能系统与云储能系统最大充放电功率约束:

$$0 \leq P_{\text{own}}(t) \leq P_{\text{own}}^{\text{cap}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{\text{rent}}(t) \leq P_{\text{rent}}^{\text{cap}} \quad (20)$$

2) 自建储能系统与云储能系统最小电量以及最小荷电状态:

$$E_{\text{own}}^{\text{min}} \leq E_{\text{own}}(t) \leq E_{\text{own}}^{\text{cap}} \quad (21)$$

$$E_{\text{own}}^{\text{min}} = \text{SOC}_{\text{own}}^{\text{min}} E_{\text{own}}^{\text{cap}} \quad (22)$$

$$E_{\text{rent}}^{\text{min}} \leq E_{\text{rent}}(t) \leq E_{\text{rent}}^{\text{cap}} \quad (23)$$

$$E_{\text{rent}}^{\text{min}} = \text{SOC}_{\text{rent}}^{\text{min}} E_{\text{rent}}^{\text{cap}} \quad (24)$$

式中 $E_{\text{own}}^{\text{min}}, \text{SOC}_{\text{own}}^{\text{min}}$ 为风电场自建储能的最小电量、最小荷电状态; $E_{\text{rent}}^{\text{min}}, \text{SOC}_{\text{rent}}^{\text{min}}$ 为风电场租赁云储能的最小电量、最小荷电状态。

3 算例

3.1 基础数据及情景设置

为了验证该文方法的有效性,采用风电场某典型日的历史出力曲线进行仿真分析。该风电场装机容量为 200 MW,采样点数为 5 min,风电场实际运行数据如图 2 所示。自建储能单位储能功率容量投资费用 ρ_{pinv} 、单位储能能量容量投资费用 ρ_{einv} 分别

设定为 3 500 元/kW、1 000 元/(kW·h),单位储能功率容量维护费用 ρ_{com} 设定为 40 元/kW,使用寿命 y 设定为 10 年。自建储能系统与云储能系统的初始荷电状态均设定为 20%,最小荷电状态 $\text{SOC}_{\text{own}}^{\text{min}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{rent}}^{\text{min}}$ 均设定为 10%。自建储能系统的充放电效率 $\eta_{\text{own}}^{\text{C}}, \eta_{\text{own}}^{\text{D}}$ 与云储能系统的充放电效率 $\eta_{\text{rent}}^{\text{C}}, \eta_{\text{rent}}^{\text{D}}$ 均设定为 96%。设置弃风能量损失对应单价 ρ_L 、平滑功率短缺能量对应单价 ρ_S 均为 450 元/(MW·h),贴现率为 3%。

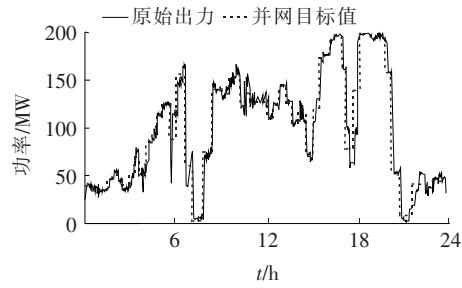


图 2 风电场原始出力曲线及并网期望曲线

Figure 2 Curves of wind farm original output and grid-connected expected power

单位云储能功率容量年租赁费用 λ_1 及能量容量年租赁费用 λ_2 的数值均由云储能提供商设定。在云储能提供商不同定价策略下,随 λ_1, λ_2 数值变化风电场自建储能及租赁云储能的最优容量、投资运行成本等均会发生改变,因此设定 3 组 λ_1, λ_2 数据,如表 1 所示。

表 1 仿真场景设置

Table 1 Simulation scene settings

情景	λ_1 /(元/kW)	λ_2 /(元/kW·h)
1	280	110
2	360	160
3	440	210

3.2 自建与云储能系统容量配置方案

利用遗传算法求得仿真结果,其中,3 种情景下自建与云储能容量配置方案如表 2 所示,可以看到,在情景 1、情景 2 中,风电场自建储能同时租赁一部分云储能。其中,情景 1 的自建储能功率容量与能量容量较情景 2 少了 3 MW、2 MW·h,而情景 1 的云储能租赁功率容量与能量容量较情景 2 多了 5 MW、3 MW·h,说明云储能租赁单价 λ_1, λ_2 越低,风电场自建储能的功率容量与能量容量越小,租赁云储能的功率容量与能量容量越大。而在情景 3 中,当云储能租赁容量单价 λ_1, λ_2 过高时,风电场不租赁云储能,仅自建储能。

表 2 自建与云储能容量配置方案

Table 2 Self-built and cloud energy storage capacity configuration schemes

情景	自建储能		云储能		联合储能	
	功率/ MW	能量/ (MW·h)	功率/ MW	能量/ (MW·h)	功率/ MW	能量/ (MW·h)
1	8	7	17	23	25	30
2	11	14	12	15	23	29
3	20	27	0	0	20	27

3.3 自建与云储能系统部分时刻充放电功率

情景 1 下自建储能与云储能的部分时刻充放电曲线如图 3 所示,其中储能设备出力为正时表示充电,为负时表示放电。因情景 1 中联合储能系统功率容量为 25 MW,所以当风电场原始出力与并网目标值差值大于 25 MW 时将发生弃风,图 3 中阴影部分所示为弃风电量。当风电场原始出力与并网目标值差值小于 25 MW 时,将发生平滑功率短缺惩罚。

另外,从图中可以看出在 7:00 至 8:00 之间,风电场原始出力与并网目标值差值较小,大部分时刻自建储能的功率输出为 0,风电场优先使用云储能平抑风电功率波动。如图 3 所示,6:00 时刻附近存在弃风现象,自建储能以最大功率充电。所以仅当云储能出力不足以平抑风电功率波动时,使用自建储能充放电,大大减少了自建储能的充放电次数与深度。

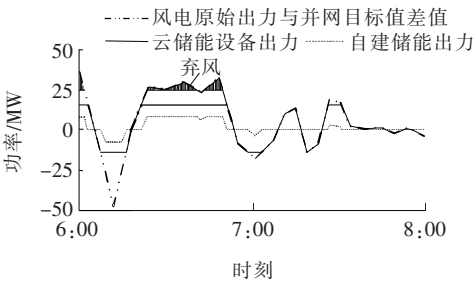


图 3 情景 1 部分时刻自建与云储能系统充放电功率

Figure 3 Charging and discharging power of self-built and cloud energy storage system in part of scenario one

3.4 成本对比

假设某月内所有天数均按图 2 典型日风电场出力曲线计算,可得到该月 3 种场景下的风电场总成本对比,如表 3 所示。可以看到情景 1 中,虽然云储能租赁单价 λ_1 、 λ_2 较低,但是风电场配置云储能的容量较大,导致云储能租赁成本较情景 2 多了 4.69

万元。另外,由于情景 1 联合储能系统功率及能量容量均大于情景 2,可以看到弃风与平滑功率短缺惩罚成本较情景 2 少了 9.3 万元。云储能租赁单价 λ_1 、 λ_2 对风电场成本影响较大,如表 3 所示情景 2 较情景 1 总成本增加了 22.65 万元,情景 3 较情景 1 总成本增加了 27.54 万元。

表 3 3 种情景下的成本对比

Table 3 Cost comparison in three scenarios 万元

情景	自建储能成本	云储能租赁成本	弃风与平滑功率短缺惩罚成本	储能系统总成本	总成本
1	36.76	59.92	83.44	96.68	180.12
2	54.80	55.23	92.74	110.03	202.77
3	101.14	0	106.52	101.14	207.66

4 结语

1)利用云储能租赁服务可平抑风电波动,最优储能容量配置模型可解得自建储能与云储能最优容量配比。

2)不同的云储能租赁单价,将影响云储能利用和充放电结果,从而影响自建储能的最优配置容量及风电场总成本。

3)设计的自建储能与云储能功率分配策略,能够大大减少自建储能充放电次数与深度。

4)云储能租赁单价较低情况下,云储能租赁和自建实体储能的合理配置,具有良好有效的经济性和实用性。云储能租赁单价较高情况下,风电场仅自建储能更具经济性。

参考文献:

[1] 张高航,李凤婷,周强,等. 考虑风电并网友好性的日前分层调度计划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 118-124.

ZHANG Gaohang, LI Fengting, ZHOU Qiang, et al. Day-ahead hierarchical dispatching model considering friendliness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 118-124.

[2] 周任军,孙嘉赣,张浩,等. 考虑双重市场的含风电电力系统双层随机优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 15-21.

ZHOU Renjun, SUN Jiagan, ZHANG Hao, et al. Bi-

- level stochastic programming and dispatch of wind integrated power system considering dual market[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 15-21.
- [3] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3470-3479.
- XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. An overview of operation and configuration of energy storage systems for smoothing wind power outputs[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3470-3479.
- [4] 和萍,武欣欣,陈婕,等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 20-27.
- HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generation[J]. Journal of electric power science and technology, 2019, 34(1): 20-27.
- [5] LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: A business case study[J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [6] 施琳,罗毅,涂光瑜,等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.
- Shi Lin, LUO Yi, Tu Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.
- [7] 张熙,张峰,巩乃奇,等. 基于荷电状态动态调整的储能电站容量规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 20-25.
- ZHANG Xi, ZHANG Feng, GONG Naiqi, et al. BESS capacity planning based on dynamic SOC adjustment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (11): 20-25.
- [8] 甘伟,郭剑波,艾小猛,等. 应用于风电场出力平滑的多尺度多指标储能配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 92-99.
- GAN Wei, GUO Jianbo, AI Xiaomeng, et al. Multi-scale multi-index sizing of energy storage applied to fluctuation mitigation of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 92-99.
- [9] 郭洋,吴峰,许庆强,等. 风-光-储系统在不同运营模式下的最优容量配置策略及考虑网损补贴的经济性分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 26-33.
- GUO Yang, WU Feng, XU Qingqiang, et al. Optimal capacity allocation strategy for wind-pv-es system with different operation modes and its economic analysis considering network loss subsidy[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 26-33.
- [10] 康重庆,刘静琨,张宁. 未来电力系统储能的新形态:云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8+16.
- KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning, et al. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8+16.
- [11] 刘静琨,张宁,康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371+3663.
- LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371+3663.
- [12] Broering H, Madlener R. Simulation and evaluation of the economic merit of cloud energy storage for prosumers: the case of germany[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 3507-3514.
- [13] Farzin H, Fotuhi-Firuzabad M, Moeini-Aghtaie M. A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 7(4): 1730-1738.
- [14] 姚方,王佳伟,文福拴,等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.
- YAO Fang, WANG Jiawei, WEN Fushuan, et al. Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered [J]. Journal of electric power science and technology, 2019, 34(1): 37-46.
- [15] LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 5512-5521.