

9-23-2022

The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage

Haifeng Yu

Economic & Technological Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China ; Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China

Jingjie Huang

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Shiyao Jiang

Economic & Technological Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China ; Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China

Yuhua Zhou

Economic & Technological Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China ; Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China

Haijun Liu

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Recommended Citation

Yu, Haifeng; Huang, Jingjie; Jiang, Shiyao; Zhou, Yuhua; Liu, Haijun; He, Jing; and Yang, Hongming (2022)

"The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 4, Article 17.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.017

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss4/17>

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.

The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage

Authors

Haifeng Yu, Jingjie Huang, Shiyao Jiang, Yuhua Zhou, Haijun Liu, Jing He, and Hongming Yang

计及储能使用年寿命的风电场 整体性储能配置

禹海峰^{1,2}, 黄婧杰³, 蒋诗谣^{1,2}, 周雨桦^{1,2},
刘海军³, 何 婧⁴, 杨洪明³

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:配置储能是解决风电出力反调峰性和随机波动性的有效方式。针对风电场储能配置较少考虑储能的实际使用寿命对储能成本的影响, 以及欠缺考虑风电并网的日前、日内阶段调度需求的整体性, 考虑电储能的使用寿命损耗特点, 建立实际使用寿命年值模型; 依据风电日前、日内阶段的调度需求特点, 初步确定应用蓄电池和超级电容来满足日前、日内阶段的调度需求; 在满足风电并网技术要求下, 考虑日前、日内阶段风电调度需求的整体性, 以风电场年运行收益为目标进行储能配置, 构建计及储能使用年寿命的风电场整体性储能优化配置模型。以某实际风电场为例进行仿真分析, 验证所提储能配置方法的有效性。该配置方法可有效利用风电并网过程中日前、日内需求关联的整体性, 可为风电实际工程储能配置应用提供一定指导。

关 键 词:储能配置; 新能源消纳; 风电并网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.017 中图分类号: TM614 文章编号: 1673-9140(2022)04-0152-09

The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage

YU Haifeng^{1,2}, HUANG Jingjie³, JIANG Shiyao^{1,2}, ZHOU Yuhua^{1,2},
LIU Haijun³, HE Jing⁴, YANG Hongming³

(1. Economic & Technological Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Deploying energy storage is an effective way to solve the problem of negative peak regulation and random fluctuation of wind power output. The impact of the actual service life of energy storage on the cost of energy storage and the integration of the day-day and day-day scheduling demands of wind power grid connection are seldom taken into account into the energy storage configuration of wind farms. This paper establishes the actual service life annual

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A2200004); 湖南省科技创新平台与人才计划(2019TP1053)

通信作者: 禹海峰(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事主电网规划、能源电力供应保障、新能源消纳和储能研究; E-mail: 444156926@qq.com

value model with the consideration of the characteristics of the service life loss of electric energy storage to. According to the scheduling demand characteristics of wind power in the day-day and day-day phases, battery and supercapacitor are preliminarily determined to meet the scheduling demand of day-day and day-day phases. In order to meet the requirements of wind power grid-connected technology, the energy storage allocation strategy was carried out with the goal of annual operating income of wind farm as the target, which take into account the integrity of wind power dispatching demand in the day-day and day-day phases. An optimal allocation model of integrated energy storage for wind farm was further established, which considers the annual service life of energy storage. An actual wind farm is taken as an example for simulation analysis, and the effectiveness of the proposed energy storage configuration method is verified. The configuration method in this paper can effectively utilize the integrality of day-day and day-day demand correlation in the process of wind power grid connection, and can provide some guidance for the application of energy storage configuration in actual wind power projects.

Key words: energy storage configuration; renewable energy consumption; wind power integration

中国风电快速持续增长,逐步进入风电大规模发展阶段,根据国家能源局已发数据显示,截至 2019 年底,全国风电累计装机达 2.1 亿 kW。然而,由于风电存在反调峰性、随机性和波动性等特征^[1],大规模风电发展带来了大量弃风、并网功率波动等问题^[2-3],从而给电力系统的可靠、安全运行带来负面影响。为此,国家和地区政府对风电并网做了一系列要求,例如在风电消纳方面,国家发改委和能源局联合印发了《清洁能源消纳行动计划(2018—2020)年》,要求 2020 年中国风电弃风率控制在 5% 左右。

为了解决风电快速发展所带来的负面影响,以及满足国家和地区政府对风电并网要求,电储能(储能)技术因具有双向快速电功率交互和电能时空迁移的能力,逐渐成为了当前的主流方案^[4-5]。但当前储能配置一次投资过大,且由于储能循环寿命短,导致储能配合风电并网方案的经济性较差^[6-7]。为此,根据风电并网的需求并结合不同类型电储能的技术特点,进行储能优化配置来提高风电并网储能配置的经济性显得尤为重要。

目前,关于储能配置的研究主要集中于利用储能促进风电消纳和平抑风功率的波动。在促进风电消纳方面,文献[8]采用火电厂侧配置储能来提升调峰火电机组的向下调峰能力,可有效促进系统对风电消纳;文献[9]考虑风电出力的时序特性,并以储能带来的电网多环节效益为目标制定了电网侧储能配置策略;文献[10]根据风电消纳需求特性展开储能应用研究,建立了储能额定功率与风电消纳需求关系模型。在平抑风功率波动方面,文献[11]研究

了不同平抑策略、不同置信度水平下风功率波动平抑的储能优化配置问题;文献[12]采用小波分解法对风电偏差功率进行分解,并利用能量型处理高频分量和功率型处理低频分量,给出了混合储能平抑风电场的储能优化配置方法。可知风电的电储能配置取得了许多成果,然而以上文献多针对弃风或风功率波动某一问题来配置储能,较少探讨弃风和风功率波动与对应调度阶段的联系。此外,较少考虑电储能实际使用状态对储能寿命的影响,即忽略了电储能实际使用状态对储能成本的影响。

因此,本文充分考虑电储能实际使用过程和状态对储能寿命的影响,并将电储能寿命的影响折算到电储能配置成本中,建立电储能实际使用寿命年值模型。此外,对弃风和风功率波动所对应的调度阶段进行分析,将提高风电消纳和平抑风功率波动的需求转换为日前、日内调度需求;依据当前国家或地区对风电并网的相关技术要求,考虑日前、日内调度需求的整体性,结合功率型电池和能量型电池的优缺点,以某风电场为研究背景,计及电储能实际使用过程和状态对电储能寿命的影响,以及风电消纳和风电偏差考核要求,并兼顾储能的投入,以年运行收益为目标进行风电场储能配置。

1 电储能实际使用寿命年值模型

1.1 电储能分类和充放电模型

1.1.1 电储能分类

电储能根据其物理特性可分为能量型和功率型两类储能^[13],不同类型的电储能有各自适合的应用

特点。能量型储能,例如蓄电池,其优势是单位成本较功率型低,但其频繁的进行充电转换会损害电池寿命,不利于电池的全寿命周期内的经济性;功率型储能,例如超级电容,因具有快速充放电转换能力,适用于抑制功率的频繁波动,但由于配置成本较高不适合大容量配置(为了表述方便,本文将能量型电池蓄电池标志为“1”;功率型电池超级电容标志为“2”)。

1.1.2 电储能充放电模型

1)功率模型。电储能的安全运行需要满足一定充放电功率约束,数学表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{1,t}^+, P_{1,t}^- \leq P_1^{\max} \\ 0 \leq P_{2,t}^+, P_{2,t}^- \leq P_2^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $P_{1,t}^+$ 、 $P_{1,t}^-$ 分别为蓄电池 t 时刻充、放电功率; $P_{2,t}^+$ 、 $P_{2,t}^-$ 分别为超级电容 t 时刻充、放电功率; $P_1^{\max}$ 、 $P_2^{\max}$ 分别为蓄电池和超级电容所配置功率量。

2)能量变化模型。电储能储存的能量为一定时间内放出/吸收能量的总和,其数学表达为

$$\begin{cases} E_{1,t} = E_{1,t-1} + \eta_1^+ P_{1,t-1}^+ - P_{1,t-1}^- / \eta_1^-, t \geq 2 \\ E_{2,t} = E_{2,t-1} + \eta_2^+ P_{2,t-1}^+ - P_{2,t-1}^- / \eta_2^-, t \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $E_{1,t}$ 、 $E_{2,t}$ 分别为 t 时刻蓄电池和超级电容蓄电量; η_1^+ 、 η_1^- 分别为蓄电池充、放电效率; η_2^+ 、 η_2^- 分别超级电容为充、放电效率。

在电储能的能量变化过程中,通常采用荷电状态 SOC 来描述电池的运行状态,其数学关系为

$$\begin{cases} S_{1,t} = \frac{E_{1,t}}{E_{1,\max}} \\ S_{2,t} = \frac{E_{2,t}}{E_{2,\max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $S_{1,t}$ 、 $S_{2,t}$ 分别为 t 时刻的蓄电池和超级电容的荷电状态; $E_{1,\max}$ 、 $E_{2,\max}$ 分别为所配置的蓄电池和超级电容容量。

为了保证储能的安全、长久运行,要求其荷电状态满足约束:

$$\begin{cases} S_1^{\text{low}} \leq S_{1,t} \leq S_1^{\text{up}} \\ S_2^{\text{low}} \leq S_{2,t} \leq S_2^{\text{up}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_{1,1} = S_{1,T} \\ S_{2,1} = S_{2,T} \end{cases} \quad (5)$$

式中 S_1^{low} 、 S_1^{up} 分别为蓄电池荷电状态的上、下限

制,分别取 0.1、0.9; S_2^{low} 、 S_2^{up} 分别为超级电容荷电状态的上、下限制,分别取 0.05、0.95。

1.2 电储能等效年使用年寿命

在常规应用环境下,储能的寿命受放电深度和循环寿命的影响,一般通过循环次数与放电深度试验关系来估算实际使用寿命,其中,放电深度为单次充放电过程中最大储电量与电池配置容量之比。具体关系为

$$B_{\text{Dod}} = f(D_{\text{od}}) \quad (6)$$

式中 B_{Dod} 为充放电深度为 D_{od} 所对应的循环次数,则每次循环对应的寿命损耗为 $1/B_{\text{Dod}}$,具体表达式可参考文献[14]。

则第 j 天放电深度与循环次数和单循环内的寿命损耗关系为

$$k_{1,j} = \sum_{s=1}^m \frac{1}{B_{\text{Dod},j,s}} \quad (7)$$

式中 $B_{\text{Dod},j,s}$ 为第 j 天第 s 次循环对应的充放深度; m 为第 j 天电储能充放电循环次数。

则可以推导出蓄电池的等效年使用寿命为

$$L_1 = \frac{1}{\sum_{j=1}^D k_{1,j}} \quad (8)$$

式中 D 为一年中的运行天数,不考虑检修停运的影响,取值 365。

在常规应用环境下,超级电容具有循环次数多、功率密度大的优势,其使用寿命主要受循环次数影响。超级电容的出厂循环次数为 M_2 ,取值 20 万次^[15],一年内第 j 天的超级电容使用转换次数为 $k_{2,j}$,则可以推导出超级电容的等效年使用寿命为

$$L_2 = \frac{M_2}{\sum_{j=1}^D k_{2,j}} \quad (9)$$

1.3 实际使用寿命下成本年值模型

配置储能包含的成本主要由电池本体购置、辅助设备、运行维护成本和回收残值所构成。

1)本体购置成本。

$$C_{i,\text{in}} = \lambda_{i,\text{E}} E_i^{\max} + \lambda_{i,\text{P}} P_i^{\max} \quad (10)$$

式中 $\lambda_{i,\text{E}}$ 、 $\lambda_{i,\text{P}}$ 分别为第 i 类电储能的单位容量、功率购置单价。

考虑货币时间价值的影响,电储能的主体购置成本年值为

$$C_{i,\text{in}}^y = \gamma_i C_{i,\text{in}} \quad (11)$$

$$\gamma_i = \frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1} \quad (12)$$

式中 r 为折现率,取值 0.08; L_i 为第 i 类电储能的实际使用年寿命。

2) 辅助设备成本。第 i 类电储能的辅助设备成本可描述为

$$C_{i,\text{sup}} = \lambda_{i,\text{E}}^{\text{sup}} E_i^{\text{max}} \quad (13)$$

式中 $\lambda_{i,\text{E}}^{\text{sup}}$ 为第 i 类电池辅助设备的单位容量价格。

同理,辅助设备成本的年值为

$$C_{i,\text{sup}}^y = \gamma_i C_{i,\text{sup}} \quad (14)$$

3) 运行维护成本。电储能的年运行维护成本由年固定运行维护成本 $C_{i,\text{fix}}^a$ 和年可变运行维护成本 $C_{i,\text{fix}}^b$ 组成,则第 i 类电池的运行维护成本可表述为

$$C_{i,\text{fix}}^y = C_{i,\text{fix}}^a + C_{i,\text{fix}}^b \quad (15)$$

年固定成本主要反映人力和管理的投入费用,其与日常的电池运行状态无关,主要受储能类型和所配置的功率有关。

$$C_{i,\text{fix}}^a = \gamma_{i,\text{fix}}^a P_i^{\text{max}} \quad (16)$$

式中 $\gamma_{i,\text{fix}}^a$ 为第 i 类电池的年固定运行维护成本系数。

年可变成本主要反映电池日常运行所需要的费用,受日常运行状态影响,主要由每天所处理的能量大小来刻画,考虑时间价值因素的影响,可表述为

$$C_{i,\text{fix}}^b = \sum_{j=1}^D \lambda_{i,\text{fix}}^b Y_{i,j} \frac{(1+r/D)^j - 1}{r/D(1+r/D)} \quad (17)$$

式中 $\lambda_{i,\text{fix}}^b$ 为第 i 类电池的单位充放电电量运行维护成本; $Y_{i,j}$ 为第 i 类电池第 j 天的充/放电量。

4) 回收残值。当电池储能的理论寿命结束时,可通过回收利用获得收益,其回收年值可表示为

$$C_{i,\text{rec}}^y = \gamma_i \kappa_{i,\text{rec}} C_{i,\text{in}} \quad (18)$$

式中 $\kappa_{i,\text{rec}}$ 为第 i 类储能的回收系数,取 0.15。

综上,电储能的配置在寿命周期内的成本年值可表述为

$$C_i^y = C_{i,\text{in}}^y + C_{i,\text{sup}}^y + C_{i,\text{fix}}^y - C_{i,\text{rec}}^y \quad (19)$$

2 风储系统日前—日内调度需求整体性储能配置方法

2.1 风储联发系统调度需求分析

风电场配置储能后组建成风储联发系统,相对于风电场而言,风储联发系统具有更高的灵活性,可

对风电场的出力进行调节,其典型结构如图 1 所示, P_{grid} 为风电和储能的联合出力, P_w 为风电场出力。

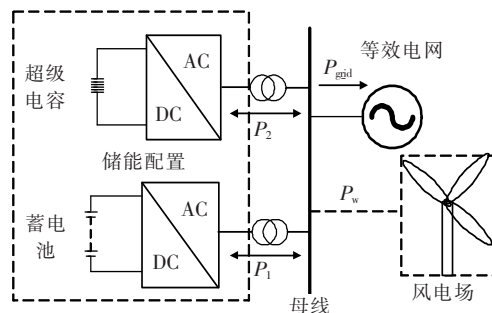


图 1 风储联合发电系统的结构

Figure 1 Structure of wind storage co-generation system

通过文 1.1 中对功率型和能量型电储能的分析,可知通常情况下蓄电池特性适合调节风电的“反调峰”特性,即应用于风电日前调度的上报计划调整,从而提升风电的消纳空间;超级电容特性适应于日内调度的风电波动所造成风电偏差调整,从而降低风电的偏差考核惩罚。

上述配置方式考虑了利用不同电储能的技术优缺点来针对性解决风电所面临的问题,但这种配置方式孤立了风电日前与日内调度需求内在关联的整体性。因此,在考虑上述应用基础上,本文将日前风电“反调峰性”储能配置与日内风电“波动性”储能配置作为一个整体进行配置,充分发挥不同类型电储能特性在确保风电并网的技术要求下,进一步提升储能配置方案的经济性。

2.2 考虑日前、日内调度需求整体性的风电场储能配置方法

2.2.1 日前阶段风电场储能配置

日前阶段主要解决风电场出力的“反调峰性”如图 2 所示,以某日风电场日前出力进行消纳示意,整个过程分为 2 个阶段:预申报和再申报阶段。

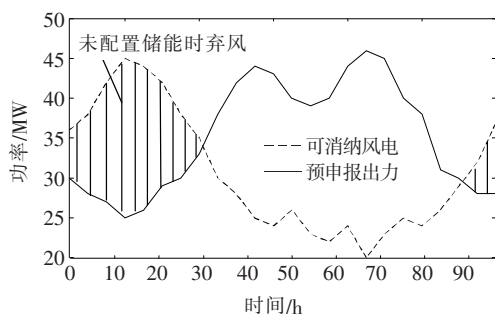


图 2 某月典型日的风电示意

Figure 2 Wind power diagram of a typical day of a month

预申报阶段:风电场将日前预测风电出力作为预申报出力向上级电网调度申报,上级调度部门在校验电网安全、可靠和经济等指标后向风电场下发可消纳风电。若不进行其他方式调节,风电出力“反调峰”性则会导致大量弃风(图 2)。

再申报阶段:风电场对风电消纳率进行核验,如果满足要求,则以预申报出力作为申报出力上报调度确定;如不满足要求,风电场依据可消纳风电与预申报出力的关系,在考虑经济性和风电消纳率要求的基础上,进行蓄电池配置,使得风电消纳满足要求,如图 3 所示。

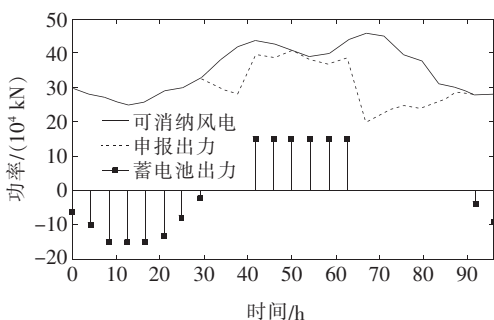


图 3 蓄电池配置效果示意

Figure 3 Battery configuration effect diagram

2.2.2 日内阶段风电场储能配置

日内阶段主要解决日前阶段结束后风电“波动性”导致的风电偏差问题,即实际风电出力为

$$P_{w,t}^s = P_{w,t}^0 + \Delta P_{w,t} \quad (20)$$

式中 $P_{w,t}^s$ 、 $P_{w,t}^0$ 、 $\Delta P_{w,t}$ 分别为 t 时刻风电实际出力、预测出力、预测偏差。

实际风储系统的出力与申报出力存在偏差,一般可以采用超级电容进行平抑偏差,即

$$P_{sb,t} = P_{w,t}^s - P_{qw,t} - P_{1,t}^{0,+} + P_{1,t}^{0,-} - P_{2,t}^{+} + P_{2,t}^{-} + \Delta P_{s,t} \quad (21)$$

式中 $P_{sb,t}$ 为 t 时刻经蓄电池调整后的上报出力; $P_{1,t}^{0,+}$ 、 $P_{1,t}^{0,-}$ 分别为日前蓄电池在 t 时刻的充、放电功率; $P_{2,t}^{+}$ 、 $P_{2,t}^{-}$ 分别为 t 时刻超级电容的充、放电功率; $P_{qw,t}$ 为 t 时刻弃风功率; $\Delta P_{s,t}$ 为调整措施实施后 t 时刻并网偏差。

但仅考虑超级电容单独平抑偏差会使得其所配置的容量较大,经济性不太可观。因此,本文充分考虑蓄电池与超级电容的配置,即蓄电池动作区间段可以优先修改蓄电池运行状态,消除偏差量;蓄电池未动作时段由所配置的超级电容来消除,如图 4 所示。

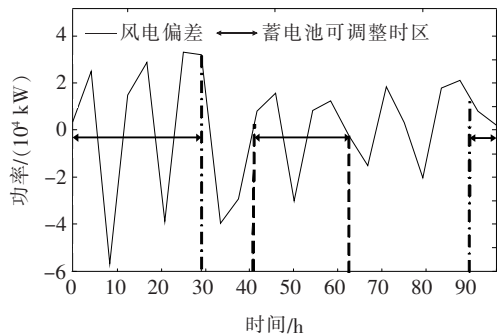


图 4 日内阶段蓄电池优先调整时区

Figure 4 The intraday phase battery has priority to adjust the time zone

当然,蓄电池参与偏差消除时需满足关系:

$$P_{sb,t} = P_{w,t}^s - P_{qw,t} - P_{1,t}^{s,+} + P_{1,t}^{s,-} - P_{2,t}^{+} + P_{2,t}^{-} + \Delta P_{s,t} \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_{1,t}^{s,+} = P_{1,t}^{0,+} + \Delta P_{1,t}^{+}, & |\Delta P_{1,t}^{+}| \leq |\Delta P_{w,t}| \\ P_{1,t}^{s,-} = P_{1,t}^{0,-} + \Delta P_{1,t}^{-}, & |\Delta P_{1,t}^{-}| \leq |\Delta P_{w,t}| \end{cases} \quad (23)$$

式中 $P_{1,t}^{s,+}$ 、 $P_{1,t}^{s,-}$ 分别为日内蓄电池调整出力后在 t 时刻的充、放电功率。

此外,为了保持蓄电池的使用寿命,蓄电池日内调整不改变充、放电状态,即满足:

$$\begin{cases} P_{1,t}^{s,+} \geq 0 \\ P_{1,t}^{s,-} \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

3 考虑调度需求整体性的风电场储能配置数学模型

风电场配置蓄电池和超级电容,在日前阶段可将风电进行时序转移,最终确定日前申报出力,可有效减少弃风惩罚,并带来相关收益;在日内阶段可消除风电偏差,从而降低不平衡电量惩罚成本。本文在考虑日前和日内对储能需求以及风电消纳和风电偏差考核要求基础上,兼顾储能的投资,以年运行收益为目标,具体目标函数为

$$\min C(P_1^{\max}, E_1^{\max}, P_2^{\max}, E_2^{\max}) =$$

$$C_{sd}^y - \sum_{i=1}^2 C_i^y + C_{qw}^y + C_{pc}^y \quad (25)$$

$$C_{qw}^y = \sum_{j=1}^D \sum_{t=1}^T k_{qw} \lambda_{grid,t} P_{qw,t,j} \Delta t \quad (26)$$

式中 C_{qw}^y 为年弃风惩罚成本; k_{qw} 为风电惩罚系数,取值 2; $\lambda_{grid,t}$ 为 t 时刻的风电上网单价; Δt 为采

样时长,取值 0.15 h。

$$C_{pc}^y = \sum_{j=1}^D \sum_{t=1}^T k_{pc} \lambda_{grid,t} (|\Delta P_{s,t,j}| - |\Delta P_{t,j}^{\min}|) \Delta t$$

(27)

式中 C_{pc}^y 为年并网偏差考核成本; k_{pc} 为偏差考核系数,取值 3; $\Delta P_{t,j}^{\min}$ 为第 j 天 t 时刻允许的偏差量,取预测出力的 2%。

$$C_{sd}^y = \sum_{j=1}^D \sum_{t=1}^T \lambda_{grid,t} (P_{sb,t,j}) \Delta t$$

(28)

式中 C_{sd}^y 为年售电收益; $\lambda_{grid,t}$ 为 t 时刻的风电上网单价。

为了满足弃风率在控制要求范围内,设置年弃风率约束:

$$1 - \frac{\sum_{j=1}^D \sum_{t=1}^T \min(P_{qw,t,j})}{\sum_{j=1}^D \sum_{t=1}^T P_{w,t,j}^0} \leq \gamma_{qfl}$$

(29)

式中 $P_{w,t,j}^0$ 、 $P_{w,t,j}^0$ 分别为第 j 天第 t 时刻的风电预测出力、可消纳风电; γ_{qfl} 为弃风控制水平,取 5%。

此外,本文约束还包括式(1)~(19)、式(22)~(24)。

4 算例分析

4.1 参数说明

选取中国中部某风电场进行电储能配置和相关分析,并以该风电场 2018 年整年的风电预测出力、可消纳风电和预测出力偏差作为数据样本。为了分析和模型求解方便,将数据以日为单元,应用 K-means 算法进行聚类^[16],并得到 4 类典型日(典型日 1~4 分别含聚类天数 55、135、35、140 d),如图 5、6 所示。

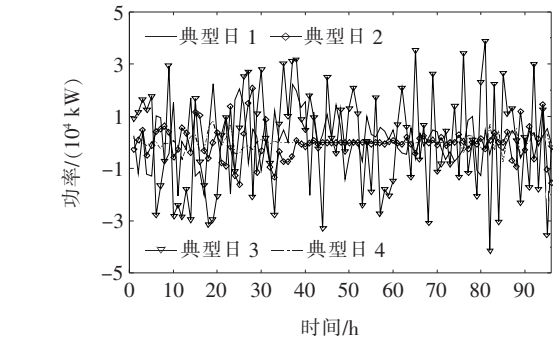


图 5 不同典型日的风电预测偏差量
Figure 5 Wind power forecast deviation of different typical days

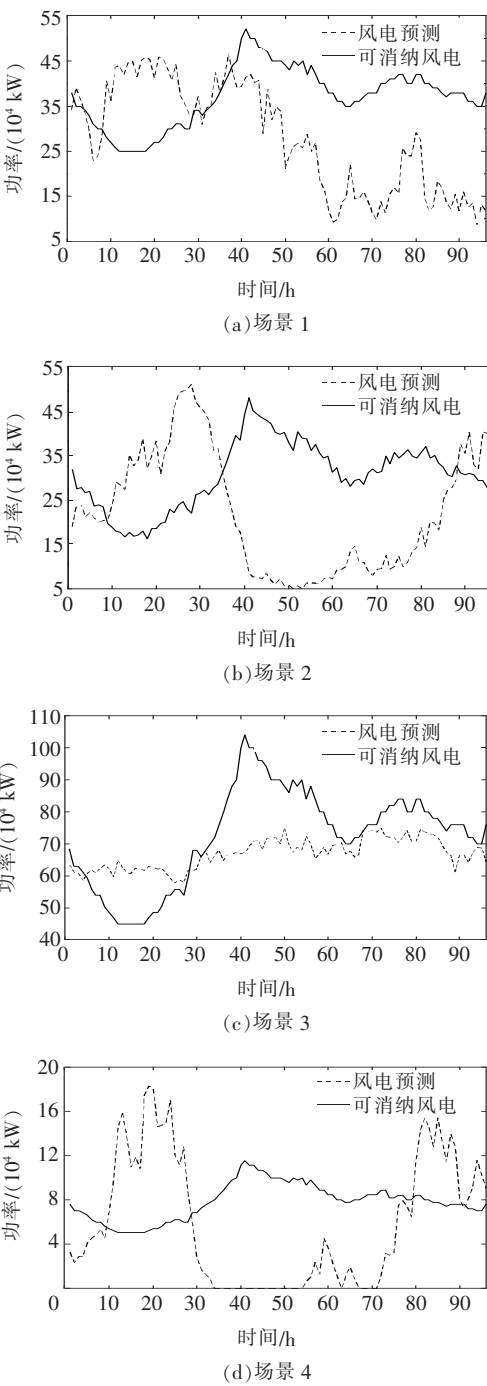


图 6 不同典型日的可消纳风电和预测出力
Figure 6 Different typical days can absorb wind power and forecast output

蓄电池选择铁锂蓄电池和超级电容,其相关参数如表 1 所示^[11,17];风电上网单价为 0.6 元/(kW·h)。

表 1 电储能的成本参数

Table 1	The cost parameters of electric energy storage				
电池类型	$\lambda_{i,E}$	$\lambda_{i,P}$	$\lambda_{i,E}^{sup}$	$\gamma_{i,fix}^a$	$\lambda_{i,fix}^b$
铁锂蓄电池	3 224	1 085	25	155	0.03
超级电容	7 475	1 300	36	254	0.00

4.2 方案设置

为便于对比所提电储能配置方案的有效性,共设计 4 个方案:

- 1)本文所提储能配置方案;
- 2)相比于方案 1,未考虑调度需求整体性;
- 3)相比于方案 1,未考虑实际使用寿命约束,但按照实际使用情况进行实际使用寿命年折算;
- 4)未配置储能方案。

4.3 方案分析

在 MATLABR2018a 中调用 fminunc 函数和编程求解各方案,结果如表 2 所示,可知方案 1 相比方案 2 可以有效延长超级电容的使用寿命,以及可降低超级电容功率和容量的配置,但由于方案 1 中的蓄电池在一定时段内需要兼顾风电消纳和偏差消除,其需配置的蓄电池功率和容量有所提高。将方案 1、3 对比可知,方案 3 未考虑使用寿命约束虽然可以降低蓄电池容量和功率的配置,但蓄电池运行在深度充放电状态,使得蓄电池实际使用寿命降低。将方案 1、2、3 与方案 4 比较,可知配置储能有效提高风电消纳水平。

表 2 不同方案储能配置结果

Table 2 Energy storage configuration results of different schemes							
方案	功率/MW		容量/(MW·h)		实际使用寿命/a		年弃风率/%
	蓄电池	超级电容	蓄电池	超级电容	蓄电池	超级电容	
1	162	9.6	475	28.8	8.0	16.0	5.00
2	155	15.8	460	49.0	7.8	12.0	5.00
3	145	9.6	432	28.8	6.2	15.2	5.00
4	—	—	—	—	—	—	9.62

各方案经济性比较如表 3 所示,可知配置储能方案(方案 1、2、3)比未配置储能方案(方案 4)能有效降低弃风惩罚成本和偏差考核成本,并提升了售电收益,但由于电储能配置成本过高,导致总的年运行收益降低,这表明如果目前选择电储能满足风电并网技术要求,需要一定程度上牺牲经济性为代价。结合表 1、3,对比方案 1、2 可知,在风电消纳和偏差消除相当的情况下,本文考虑日前一日内调度需求

整体性配置方案降低储能配置和年运行成本,验证本文配置电储能方案有效性;对比方案 1、3 可知,考虑实际使用寿命约束的电储能配置年运行成本更低,提高了年运行收益,验证了本文考虑实际使用寿命的有效性。

表 3 不同方案经济性比较

Table 3 Comparison of different program economic systems						万元
方案	成本/收益					
	售电收益	弃风惩罚成本	偏差考核成本	电储能配置年运行成本	年运行收益	
1	87 441	9 204	0	27 438	50 799	
2	87 441	9 204	0	29 211	49 026	
3	87 441	9 204	0	29 888	48 349	
4	83 207	17 672	4 542	0	60 993	

4.4 电储能价格对储能配置方案的影响分析

电储能价格会随着储能技术不断发展而降低,分析储能价格降低到不同情况下的风电场储能配置,以及储能配置后所带来经济、技术影响,具有一定指导意义。为了分析方便,选取方案 1 的储能配置方案为基础,假设其他参数不变,并引入储能单价折扣系数来模拟电储能价格降低水平。计算结果表明:超级电容配置情况不变,风电场经济技术如表 4 所示,蓄电池配置方式如图 7 所示。

表 4 不同储能单价下风电场经济技术分析

Table 4 Economic and technical analysis of wind farm under different energy storage unit price			
折扣比例	年弃风率/%	电储能配置年运行成本/万元	年运行收益/万元
0.9	5.00	24 695	53 542
0.8	5.00	21 951	56 286
0.7	5.00	19 207	59 030
0.6	4.70	15 640	62 597
0.5	4.00	14 350	63 887
0.4	3.60	12 598	63 211
0.3	1.90	11 226	69 889
0.2	0.50	10 187	75 057
0.1	0.40	5 094	82 860

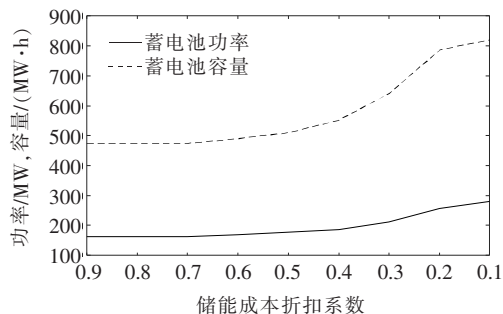


图 7 不同折扣下蓄电池配置情况

Figure 7 Battery configuration at different discounts

由表 4 和图 7 可知,当电储能成本折扣系数达到 0.6 时,配置储能方案相比于未配置储能方案才有经济上的优势。进一步分析可知,折扣系数在 0.9~0.7 之间时,储能配置方案主要受技术性约束(弃风率)和储能成本限制,这种情况下风电场是折损经济效益来满足技术要求的,可以制定相应补贴政策给予补贴和鼓励;当折扣系数小于等于 0.6 时,此时风电场储能配置不在受储能成本的绝对限制,风电场配置储能可实现技术和经济上的双赢,即在电储能使用寿命内可收回电储能成本的同时,还能在满足风电消纳最低要求上主动追求风电消纳。

5 结语

1) 风电场配置电储能时考虑实际使用寿命和日前一日内调度需要整体性,灵活利用蓄电池和超级电容两种电储能的性能和经济特点,相比于未考虑整体性和实际使用寿命配置方法,能有效降低电储能配置年运行成本,从而提升了配置方案的经济性。

2) 当前电储能价格下配置电储能消纳风电是以牺牲效益为代价的,为了提升方案的可行性和工程实用性,结合 P2G 等其他新型风电消纳方式值得进一步探讨。

3) 本文建模仅考虑了配置储能后的年运行成本,未考虑储能初始投资巨大带来的资本压力。为了解决初始投资的资本压力,商业模式方面值得探讨。

参考文献:

[1] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(8):2998-3007.

WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2020, 44 (8): 2998-3007.

[2] LI Z, ZHANG R, ZHANG L P, et al. Scheduling optimization of wind power system based on cogeneration[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(8): e12435.

[3] 尹琦琳,秦文萍,于浩,等.计及风电波动性和电动汽车随机性的电力现货市场交易模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(12):118-127.

YIN Qilin, QIN Wenping, YU Hao, et al. Transaction model for electricity spot market considering the volatility of wind power and the randomness of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (12): 118-127.

[4] 汪海蛟,江全元.应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J].电力系统自动化,2014,38(19):126-135.

WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.

[5] 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.

[6] 宋天昊,李柯江,韩肖清,等.储能系统参与多应用场景的协同运行策略[J].电力系统自动化,2021,45(19):43-51.

SONG Tianhao, LI Kejiang, HAN Xiaoqing, et al. Coordinated operation strategy of energy storage system participating in multiple application scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 43-51.

[7] 朱大锐,赵晓妮,段建东.考虑系统调峰特性的风光消纳优化[J].电网与清洁能源,2021,37(2):139-146.

ZHU Darui, ZHAO Xiaoni, DUAN Jiandong. Optimization of wind/ photovoltaic power consumption considering peak regulation characteristics[J]. Power System

- and Clean Energy, 2021, 37(2):139-146.
- [8] 王海华, 陆冉, 曹炜, 等. 规模风电并网条件下储能系统参与辅助调峰服务容量配置优化研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(6):42-49.
- WANG Haihua, LU Ran, CAO Wei, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system participating auxiliary peak regulation in large-scale wind power integration[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(6):42-49.
- [9] 彭穗, 龚贤夫, 刘新苗, 等. 计及直流调节能力的含风电电力系统储能优化配置[J]. 中国电力, 2022, 55(1):37-45.
- PENG Sui, GONG Xianfu, LIU Xinmiao, et al. Optimized energy storage configuration of wind power integrated power system considering DC regulation capacity[J]. Electric Power, 2022, 55(1):37-45.
- [10] 谢忠能, 王海云, 王维庆. 采用自适应 VMD 与能量管理控制的混合储能平抑风电波动策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10):87-94.
- XIE Zhongneng, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using adaptive VMD and energy management control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10):87-94.
- [11] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1):88-97.
- SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1):88-97.
- [12] 张鹏, 张峰, 梁军, 等. 采用小波包分解和模糊控制的风电机组储能优化配置[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):609-617.
- ZHANG Peng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2):609-617.
- [13] 陈亚爱, 林演康, 王赛, 等. 基于滤波分配法的混合储能优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19):4009-4018.
- CHEN Yaai, LIN Yankang, WANG Sai, et al. Optimal control strategy of hybrid energy storage based on filter allocation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19):4009-4018.
- [14] 唐夏菲, 吴献祥, 任青青, 等. 利用云储能租赁服务的风电场储能容量优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1):90-95.
- TANG Xiafei, WU Xianxiang, REN Qingqing, et al. Optimized configuration of energy storage capacity of wind farms using cloud energy storage leasing services[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):90-95.
- [15] 黎淑娟, 李欣然, 黄际元, 等. 基于层 IEE 分析法的调频用储能电源选型[J]. 电气应用, 2020, 39(10):20-25.
- LI Shujuan, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Selection of energy storage power supply for frequency regulation based on analytic hierarchy process[J]. Electro-technical Application, 2020, 39(10):20-25.
- [16] 方鑫, 殷俊, 蒋苏, 等. 基于等距 K-means 和 apriori 算法的配电网故障规律挖掘方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(10):99-104+125.
- FANG Xin, YIN Jun, JIANG Su, et al. Data mining algorithm for fault rules of distribution network based on combination of isometric K-means and apriori algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(10):99-104+125.
- [17] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8):2471-2476.
- XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2471-2476.