

考虑风电不确定性的海上风电场混合储能容量优化

陆秋瑜¹, 杨银国¹, 陈俊生¹, 刘洋¹, 刘念², 曹飞², 刘伟召²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广州 510600; 2. 北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100086)

摘要: 为减少海上风电的间歇性和波动性对电网的冲击, 常引入储能装置平抑其输出功率波动。为响应低碳发展进程并考虑到风电的不确定性使得基于某一典型风电出力场景的储能容量配置方法具有局限性, 综合考虑海上风电场的售电收益、碳交易收益及储能系统的各项成本, 提出一种考虑风电不确定性的海上风电场混合储能系统容量配置方法。采用随机机会约束规划法处理海上风电出力的不确定性, 利用小波包分解方法对锂电池与超级电容进行功率分配, 将分配方案与经济评价相结合, 并建立风储系统优化运行模型, 以系统日净收益最大为目标, 对其容量进行优化配置。以国内某海上风电场实测数据为例进行仿真, 验证了所提方案的有效性和经济性, 同时系统采用混合储能比单一储能更具有优越性。

关键词: 海上风电; 平抑波动; 不确定性; 碳交易收益; 小波包分解; 混合储能; 容量优化

Hybrid Energy Storage Capacity Optimization of Offshore Wind Farms Considering Wind Power Uncertainty

LU Qiuyu¹, YANG Yinguo¹, CHEN Junsheng¹, LIU Yang¹, LIU Nian², CAO Fei², LIU Weizhao²

(1. Power Dispatching and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Beijing Sifang Jibao Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: To reduce the impact of intermittency and volatility of offshore wind power on the power grid, energy storage devices are often introduced to smooth out its output power fluctuations. In response to the low-carbon development process and considering the uncertainty of wind power, the capacity allocation method for energy storage based on a typical wind power output scenario has limitations. Taking into account the electricity sales revenue, carbon trading revenue, and various costs of the energy storage system of offshore wind farms, a capacity allocation method for hybrid energy storage system of offshore wind farm considering wind power uncertainty is proposed. The random opportunity constrained programming method is adopted to deal with the uncertainty of offshore wind power output, and wavelet packet decomposition method is used to allocate power between lithium batteries and supercapacitors, the allocation scheme is combined with economic evaluation to establish an optimized operation model for wind and energy storage system, with the goal of maximizing the daily net profit of the system, optimizing its capacity configuration. Taking the measured data of a domestic offshore wind farm as an example for simulation, the effectiveness and economy of the proposed scheme are verified. At the same time, the system adopting hybrid energy storage is more superior than single energy storage.

Key words: offshore wind power; stabilize fluctuations; uncertainty; carbon trading income; wavelet packet decomposition; hybrid energy storage; capacity optimization

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2166207); 中国南方电网有限责任公司科技项目(03600KK52200049, GDKJXM20201978)。

Foundation item: Supported by the the National Natural Science Foundation of China (U2166207); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(03600KK52200049, GDKJXM20201978).

0 引言

近年来,随着“30·60”目标的提出我国可再生能源发展持续向好。海上风能因其高能量潜力而备受关注,由于海上风电和用电负荷空间的布置存在差异以及跨海传输容量受阻及固有的间歇性和波动性等因素^[1-2],大面积集中并网给电网的安全运营造成很大的挑战,同时也导致弃风率较高,如何降低风电功率波动对电网产生的负面影响从而提高风能利用水平成为人们日益关注的问题。

目前,常采用储能系统平抑风电输出功率波动,使风电变得“可控、可调”^[3-4],但储能系统的接入会增加运营商的投入成本,因此需要对储能系统的容量配置开展研究。文献[5]从电池储能对风电渗透的角度出发提出了一种考虑运行约束的双约束闭环控制策略,基于所提出的控制策略确定了锂电池的经济规模。文献[6]提出考虑电池充电状态(state of charging, SOC)均衡及收益的功率分配策略,旨在进一步降低风电并网波动率。文献[7]提出了一种考虑电池运行状态的储能容量配置方法,旨在优化电池的成本和延长其使用寿命。以上研究仅采用单一储能来稳定风电并网波动,未充分考虑到风能在不同时间尺度上的波动特性。一般而言,短时间尺度的风电波动对储能的响应速度、充放电次数和功率密度有较高要求,而长时间尺度的波动则对储能的能量密度和持续充放电时间有更高需求。目前,单一储能介质难以全面满足这些要求。因此,本文提出采用由锂电池和超级电容组成的混合储能设备来应对此挑战,从而有效平抑风电输出功率的波动。

国内学者针对混合储能系统在平抑风电出力波动方面的作用开展了较多研究,文献[8]采用自适应小波变换与HHT变换实现了对风电功率的平抑与混合储能的容量配置。文献[9]为解决风电场在黑启动过程中的波动问题以达到最大化补偿黑启动功率缺额为目的,建立了储能容量配置模型。文献[10]利用小波包方法对风电原始信号进行分解,将低频信号直接并网,再利用高斯分布对高频信号进行数理概率统计,得出混合储能的容量分配。上述文献均未考虑储能的接入对运营商带来的投资成本增加。文献[11]将WPD-LPF、灰色关联度以及模糊控制相结合,提出了风电并网功率获取和储能功率分配的方法,降低了储能的需求量,提高了系统运行经济

性。文献[12-13]综合考虑储能成本和波动平抑效果来确定储能的容量配置。上述文献仅考虑了储能带来的成本问题,未考虑加入储能后风电场的净收益,而且都是基于某一典型的风电出力数据去研究储能的容量配置,未考虑到风电的不确定性对储能容量优化的影响。文献[14]采用概率预测方法对风电的不确定性进行量化。采用多元Copula函数生成大量风电出力场景并采用k均值聚类算法对生成场景进行削减,并获得了几种包含概率信息的典型场景。但该方法所生成的风电出力场景样本较少,并不能较全面地涵盖风电可能出现的所有情况,无法准确地描述现实情况。相比之下,随机机会约束规划法在处理风电不确定性问题上所包含的风电场景较为广泛,适应性更高。此外上述研究均未考虑将风电场参与碳交易市场进行获利,其投资参考价值没有充分考虑未来中国低碳电力市场交易的发展趋势。

综上,本文提出了一种考虑风电不确定性的海上风电场混合储能容量配置方法。为响应低碳发展进程,该方法在求解混合储能最优配置容量时将风电场的碳收益考虑在内。针对海上风电的不确定性使得基于某一典型风电出力场景的储能容量配置方法具有局限性的问题,采用随机机会约束规划法来处理风电的不确定性,提出了一种基于小波包分解的混合储能功率分配策略,将分配策略与经济评价相结合,选取风储系统日净收益最大的功率分配方案,完成了储能的最优容量配置。

1 海上风电随机出力模型

与一般能源相比,海上风能表现出显著的随机性和波动性,呈现出截然不同的特征。为了更好地模拟海上风电出力,本文将风电的实际出力表示为预测值与随机波动之和^[15],计算公式如下。

$$P_w(t) = P_w^{\text{pre}}(t) + P_w^u(t) \quad (1)$$

式中: $P_w(t)$ 为 t 时刻海上风电实际出力; $P_w^{\text{pre}}(t)$ 为 t 时刻风电预测值; $P_w^u(t)$ 为 t 时刻风电出力波动。

根据现有新能源预测技术^[16-17],风电出力的波动服从正态分布,其均值 $\mu=0$, 标准差 σ_{wt} 如下。

$$\sigma_{wt} = 0.2P_w^{\text{pre}}(t) + 0.02V_{wt} \quad (2)$$

式中 V_{wt} 为海上风电场装机容量。

海上风电实际出力所需满足的约束为:

$$0 \leq P_w(t) \leq V_{wt} \quad (3)$$

2 海上风电波动平抑策略

2.1 风储系统并网结构

海上风电场储能并网系统结构如图1所示。

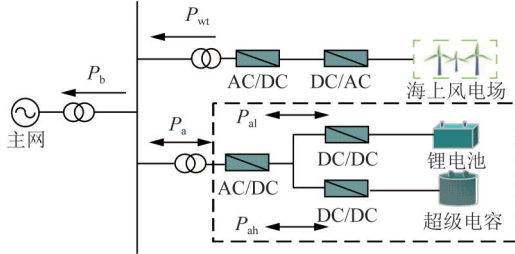


图1 风储并网系统结构

Fig. 1 Structure of wind storage grid connected system

图1中 $P_a(t)$ 为风电高频波动功率, $P_b(t)$ 为风电并网功率, $P_{al}(t)$ 、 $P_{ah}(t)$ 分别为锂电池和超级电容对应的平抑功率。

$$P_w(t) = P_a(t) + P_b(t) \quad (4)$$

$$P_a(t) = P_{al}(t) + P_{ah}(t) \quad (5)$$

2.2 小波包方法分解海上风电功率

本文采用小波包分解技术对海上风电输出功率进行了细致分析,将其分解成高频波动成分和符合国际标准的低频并网成分。小波包分析方法是小波变换的改进型,相比小波变换,它不仅能对信号的低频部分进行分解,同样也能对高频信号进一步分解,是一种应用更广泛的信号分解方法^[17]。其原理如图2所示,从上到下分别为初始数据1层、2层、3层分解后的分量。 S_0 为原始数据, S_{11} 和 d_{12} 分别为 S_0 进行1层分解的低频和低频分量, S_{21} 为 S_0 进行2层分解的低频分量, d_{22} 、 d_{23} 、 d_{24} 为 S_0 对应的高频分量,频率由左向右依次增加。同理依次由上到下将各层信号分量进行分解。

表1为现行国家标准^[18]对于不同时间尺度下风电场输出有功功率波动值的最大限制,是否满足该标准要求需要通过计算每个分解层的低频分量所对应的

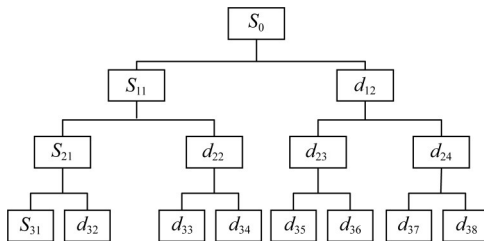


图2 小波包分解原理图

Fig. 2 Principle diagram of wavelet packet decomposition

有功功率波动值 ΔP 来确定。如果 ΔP 满足标准要求,则停止分解;否则,需要继续增加分解层数,直至风电低频分量对应的有功功率满足并网要求。同时,对应的高频波动功率采用储能系统进行处理。

表1 风电场并网标准

Tab. 1 Wind farm grid connection standard

风电装机容量/MW	有功功率变化最大值/MW	
	1 min	10 min
<30	3	10
30 ~ 150	装机容量的 1/10	装机容量的 1/3
>150	15	50

2.3 基于小波包分解的混合储能功率分配策略

通过小波包分解海上风电功率得到满足并网要求的低频分量和需要储能平抑的高频波动分量。将风电高频波动分量中的高频段数 m 作为混合储能功率分配的分界点。考虑到锂电池充放电速率低,且频繁充放电会加速其衰减老化,难以满足短时波动较快的功率需求,故将风电高频波动分量中频率较低的部分 $P_{al}(t)$ 分配给锂电池,有助于延长其寿命;同时将频率较高的部分 $P_{ah}(t)$ 分配给超级电容,发挥其循环寿命长的优势。其过程如下。

$$P_b(t) = P_{db6, 2^0}^w(t) \quad (6)$$

$$P_{al}(t) = P_{db6, 2^1: m}^w(t) \quad (7)$$

$$P_{ah}(t) = P_{db6, m+1: 2^n}^w(t) \quad (8)$$

式中: $db6$ 为小波基; 2^0 、 $(2^1: m)$ 、 $(2^0: 2^n)$ 为3种频带区间、其中 m 为高频段数、 n 为分解层数; $P_{db6, 2^0}^w(t)$ 、 $P_{db6, 2^1: m}^w(t)$ 、 $P_{db6, m+1: 2^n}^w(t)$ 为小波包分解海上风电功率在3种频段下重构后对应的功率。

3 风储系统优化运行模型

3.1 混合储能系统数学模型

锂电池和超级电容从开始到 t 时刻累计的充放电电量 $Q_{Ba}(t)$ 、 $Q_{sc}(t)$ 分别为:

$$\begin{cases} Q_{Ba}(t) = \eta_{Ba} \sum_{t=1}^T P_{Bach}(t) X_{Ba}(t) \Delta t - \frac{\sum_{t=1}^T P_{Badis}(t) Y_{Ba}(t) \Delta t}{\eta_{Ba}} \\ Q_{sc}(t) = \eta_{sc} \sum_{t=1}^T P_{sach}(t) X_{sc}(t) \Delta t - \frac{\sum_{t=1}^T P_{scdis}(t) Y_{sc}(t) \Delta t}{\eta_{sc}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: T 为系统运行时间; $X_{Ba}(t)$ 和 $Y_{Ba}(t)$ 分别为 t

时刻锂电池的充放电状态； $X_{sc}(t)$ 和 $Y_{sc}(t)$ 分别为 t 时刻超级电容的充放电状态； $P_{Bach}(t)$ 和 $P_{Badis}(t)$ 分别为 t 时刻锂电池的充放电功率； $P_{scch}(t)$ 和 $P_{scdis}(t)$ 分别为 t 时刻超级电容的充放电功率； a 为投入的锂电池数量； b 为投入的超级电容数量； η_{Ba} 和 η_{sc} 分别为锂电池和超级电容通过变流器后的充放电效率； Δt 为累计求和的每个时间间隔的长度。

则锂电池和超级电容在 t 时刻的荷电状态(state of charge, SOC)的值 $S_{Ba}^{SOC}(t)$ 、 $S_{Sc}^{SOC}(t)$ 分别为：

$$S_{Ba}^{SOC}(t) = S_{Ba}^{SOC}(0) + \frac{Q_{Ba}(t)}{aE_{Ba}} \quad (10)$$

$$S_{Sc}^{SOC}(t) = S_{Sc}^{SOC}(0) + \frac{Q_{sc}(t)}{bE_{sc}} \quad (11)$$

式中： $S_{Ba}^{SOC}(0)$ 为锂电池初始时刻的SOC值； $S_{Sc}^{SOC}(0)$ 为超级电容初始时刻的SOC值； E_{Ba} 、 E_{sc} 分别为锂电池和超级电容的容量。

3.2 目标函数

本文以海上风电场混合储能系统日净收益最大为优化目标，目标函数 $\max(I)$ 为：

$$\max(I) = f_s + f_c - f_{Ba} - f_{sc} - f_p \quad (12)$$

式中： f_s 为海上风电场日售电收益； f_c 为海上风电场日碳交易收益； f_{Ba} 为锂电池的日投入成本，包括日投资成本和日运维成本； f_{sc} 为超级电容的日投入成本； f_p 为波动性惩罚成本，指储能不能完全补充或吸收风电高频波动功率所产生的惩罚成本。

f_s 的计算公式为：

$$f_s = \sum_{t=1}^T c_s P_b(t) \Delta t \quad (13)$$

式中 c_s 为海上风电场上网电价。

碳排放交易机制是一种为发电企业分配碳排放配额方案。在碳交易中企业拥有自由交易碳排放配额的权力。一旦其实际碳排放量低于分配的额度它们将卖出多余配额并从中获得利润^[19]。尤其是风电场，因为其碳排放量可忽略不计，因此火力发电公司能够通过向风电场作出有关碳减排的补偿交易以满足自身碳排放量配额要求^[20]。借助碳排放交易机制企业得以管控碳排放，并因此获得经济奖励，这一举措还能够刺激清洁能源的推广，进而减少温室气体的释放。海上风电场的碳收益 f_c 为：

$$f_c = \sum_{t=1}^T c_c \lambda P_b(t) \Delta t \quad (14)$$

式中： c_c 为碳交易价格； λ 为单位电量碳排放配额。

f_{Ba} 的计算公式为：

$$f_{Ba} = ac_{Baint} \frac{1}{365} \frac{\rho(1+\rho)^{l_{Ba}}}{(1+\rho)^{l_{Ba}} - 1} + \sum_{t=1}^T c_{Baope} (P_{Bach}(t) + P_{Badis}(t)) \Delta t \quad (15)$$

式中： c_{Baint} 为锂电池单位器件成本； l_{Ba} 为锂电池的使用年限； c_{Baope} 为锂电池充放电运维成本。

$$f_{sc} = bc_{Scint} \frac{1}{365} \frac{\rho(1+\rho)^{l_{Sc}}}{(1+\rho)^{l_{Sc}} - 1} + \sum_{t=1}^T c_{Scope} (S_{scch}(t) + P_{scdis}(t)) \Delta t \quad (16)$$

式中： c_{Scint} 为超级电容单位器件成本； ρ 为折现率； l_{Sc} 为超级电容的使用年限； c_{Scope} 为超级电容充放电运维成本。

f_p 的计算公式为：

$$f_p = \phi_1 [X_{Ba}(t)(P_{al}(t) - P_{Bach}(t)) + X_{Sc}(t)(P_{ah}(t) - P_{scch}(t))] \Delta t + \phi_2 [Y_{Ba}(t)(|P_{al}(t)| - P_{Badis}(t)) + Y_{Sc}(t)(|P_{ah}(t)| - P_{scdis}(t))] \Delta t \quad (17)$$

式中： ϕ_1 为储能不能完全吸收风电高频波动功率对应的弃风惩罚系数； ϕ_2 为储能不能完全补充风电高频波动功率对应的缺电惩罚系数。

3.3 约束条件

1) 锂电池约束

$$\begin{cases} S_{Ba}^{\min} \leq S_{Ba}^{SOC}(t) \leq S_{Ba}^{\max} \\ X_{Ba}(t)Y_{Ba}(t) = 0 \\ X_{Ba}(t), Y_{Ba}(t) \in \{0, 1\} \\ 0 \leq P_{Bach}(t) \leq aP_{Ba}^{\max} \\ 0 \leq P_{Badis}(t) \leq aP_{Ba}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $S_{Ba}^{\max}$ 和 $S_{Ba}^{\min}$ 分别为锂电池荷电状态的上下限； $P_{Ba}^{\max}$ 为锂电池单位器件最大功率。鉴于锂电池不可能同时处于充电和放电状态，引入了充放电状态的约束。此外，为了防止锂电池过度充电或放电，本文增设了充放电功率和SOC值的约束条件。

海上风电场配置的锂电池的总额定功率为 $aP_{Ba}^{\max}$ ，则其总额定功率应满足 $P_{al}(t)$ 在运行时间 T 内对应的最大过剩功率或最小缺额功率，考虑锂电池经过变流器后的充放电效率，可得：

$$aP_{Ba}^{\max} = \max \left\{ \max(P_{al})\eta_{Ba}, \frac{|\min(P_{al})|}{\eta_{Ba}} \right\} \quad (19)$$

海上风电场配置的锂电池总额定容量为 aE_{Ba} ，

则根据式(10)和式(18)的SOC值约束可得:

$$\begin{cases} S_{Ba}^{SOC}(0) + \frac{\max_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{aE_{Ba}} \leq S_{Ba}^{\max} \\ S_{Ba}^{SOC}(0) + \frac{\min_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{aE_{Ba}} \geq S_{Ba}^{\min} \end{cases} \quad (20)$$

$$aE_{Ba} \geq \max \left\{ \frac{\max_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{S_{Ba}^{\max} - S_{Ba}^{SOC}(0)}, \frac{-\min_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{S_{Ba}^{SOC}(0) - S_{Ba}^{\min}} \right\} \quad (21)$$

当式(21)满足等号条件且 $S_{Ba}^{SOC}(0)$ 取式(22)时,此时配置的锂电池额定容量最小。

$$S_{Ba}^{SOC}(0) = \frac{[\max_{t \in T} Q_{Ba}(t)] S_{Ba}^{\min} - [\min_{t \in T} Q_{Ba}(t)] S_{Ba}^{\max}}{\max_{t \in T} Q_{Ba}(t) - \min_{t \in T} Q_{Ba}(t)} \quad (22)$$

由式(19)和(21)可得出海上风电场投入的锂电池数量 a 的约束为:

$$a \geq \max \left\{ \frac{1}{P_{Ba}^{\max}} \max \left\{ \max(P_a) \eta_{Ba}, \frac{|\min(P_{al})|}{\eta_{Ba}} \right\}, \frac{1}{E_{Ba}} \max \left\{ \frac{\max_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{S_{Ba}^{\max} - S_{Ba}(0)}, \frac{-\min_{t \in T} Q_{Ba}(t)}{S_{Ba}(0) - S_{Ba}^{\min}} \right\} \right\} \quad (23)$$

2) 超级电容器约束

超级电容与锂电池相似,也受到SOC值、充放电状态以及充放电功率的约束。约束条件为:

$$\begin{cases} S_{Sc}^{\min} \leq S_{Sc}(t) \leq S_{Sc}^{\max} \\ X_{Sc}(t) Y_{Sc}(t) = 0 \\ X_{Sc}(t), Y_{Sc}(t) \in \{0, 1\} \\ 0 \leq P_{Scch}(t) \leq bP_{Sc}^{\max} \\ 0 \leq P_{Scdis}(t) \leq bP_{Sc}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{Sc}^{\max}$ 和 $S_{Sc}^{\min}$ 分别为超级电容荷电状态的上下限; $P_{Sc}^{\max}$ 为超级电容单位器件最大功率。

与上述锂电池处理方法一样,可得出超级电容的数量 b 的约束为:

$$b \geq \max \left\{ \frac{1}{P_{Sc}^{\max}} \max \left\{ \max(P_{ah}) \eta_{Sc}, \frac{|\min(P_{ah})|}{\eta_{Sc}} \right\}, \frac{1}{E_{Sc}} \max \left\{ \frac{\max_{t \in T} Q_{Sc}(t)}{S_{Sc}^{\max} - S_{Sc}(0)}, \frac{-\min_{t \in T} Q_{Sc}(t)}{S_{Sc}(0) - S_{Sc}^{\min}} \right\} \right\} \quad (25)$$

3) 并网功率波动约束

平抑后的海上风电并网功率需满足功率波动,约束如下。

$$\begin{cases} |P_b(t) - P_b(t-1)| \leq \lambda_1 \\ |P_b(t) - P_b(t-10)| \leq \lambda_{10} \end{cases} \quad (26)$$

式中 λ_1 、 λ_{10} 分别为现行国家标准规定的风电场在1 min和10 min时间尺度下并网输出的有功功率波动的最大限值。

3.4 随机机会约束规划法

机会约束规划法^[21]是一种处理含有随机变量问题的方法,它使用概率的形式来满足约束条件。相对于传统的规划方法,该方法容许系统在一定程度上不符合约束条件,但要求约束条件成立的概率不低于预先设定的置信水平。这种方法在处理新能源不确定性问题上适用性很高,因为它能够较为全面地考虑系统可能存在的随机性,并提供一定的容错能力。一般机会约束规划模型为:

$$\begin{cases} \max f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \\ \text{s. t. } P_r\{g_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0\} \geq \alpha, i = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为决策向量; $\boldsymbol{\xi}$ 为随机向量; $f(\cdot)$ 为目标函数; $P_r\{\cdot\}$ 为约束条件成立的概率; α 为置信度; q 为约束函数的数量。

由于风电输出具有随机性,因此很难完全符合式(26)中的并网功率波动约束条件。基于上述方法采用海上风电随机出力模型对海上风电出力场景进行一定次数的随机模拟,使得在随机模拟风电出力场景的过程中其并网功率波动约束条件成立的概率不低于预设的置信度。故结合实际情况建立机会约束规划模型为:

$$\min P_r \left\{ \begin{cases} |P_b(t) - P_b(t-1)| \leq \lambda_1 \\ |P_b(t) - P_b(t-10)| \leq \lambda_{10} \end{cases} \right\} \geq \alpha \quad (28)$$

3.5 模型求解流程

本文将随机机会约束规划法与粒子群算法相结合来求解海上风电场混合储能系统容量优化模型。详细过程如下。

步骤1: 输入系统和优化算法所需参数,设定置信度、最大迭代次数等,初始化粒子的位置和速度;

步骤2: 采用海上风电出力模型对风电出力的波动进行随机模拟,并采用蒙特卡罗模拟采样方法对风电出力波动进行抽样,再加上确定的海上风电预测值得到一天的海上风电实际功率;

步骤3: 利用步骤2得到的海上风电实际功率,

进行 n 层小波包分解, 以获得高频波动和低频波动的并网分量;

步骤 4: 本文将上述过程视为一次随机模拟。本文设定了随机模拟的次数, 即 $d=1, 2, \dots, D$ 。然后, 本文利用式(28)对所生成的粒子进行筛选, 以确保在 D 次随机模拟过程中种群满足并网功率波动约束条件的概率不低于预设的置信水平;

步骤 5: 随机模拟 D 次后输出满足要求的风电实际功率及其对应的低频并网功率和高频波动功率, 将风电高频波动功率的高频段数量 m 作为混合储能功率分配的分界点, 将分配方案与海上风电场储能系统的经济效益相结合, 通过比较不同分界点下风储能系统的日净收益, 选出全局净收益最大时对应的风电实际功率及混合储能功率分配的最优分界点;

步骤 6: 更新粒子的速度和位置, 重复上述过程, 在进行迭代更新的过程中计算种群的适应度直至算法达到最大迭代次数。最终输出全局最优值, 并确定混合储能的配置容量。

4 算例仿真

4.1 算例参数

本文以某海上风电场为例对风储系统的储能容量配置展开研究。风电场的装机容量为 350 MW。根据图 3 显示的典型预测功率数据, 采样时间间隔为 1 min, 总持续时间为 1 d。

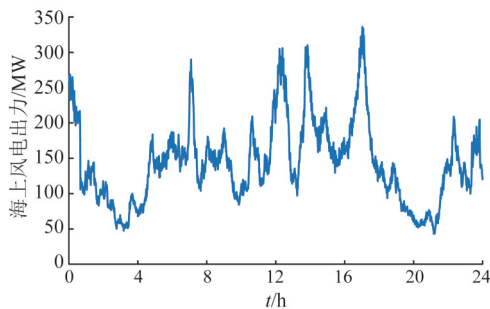


图 3 海上风电场预测功率

Fig. 3 Forecast powers of offshore wind farm

本文所采用的碳交易价格为 50 元/t, 单位电量碳排放配额^[22]为 0.57 kg/(kWh), 海上风电上网电价^[23]为 0.575 元/(kWh)。置信度 $\alpha=95\%$, 粒子群算法的惯性权重 $\omega=1$, 学习因子 $c_1=c_2=2$ 。算法最大迭代次数 $k_{\max}$ 设置为 1 500 次, 考虑到随着随机模

拟次数的增大其计算难度也会相应增大, 故将随机模拟次数 D 设置为 100 次。本文所建立的模型求解环境为: 操作系统为 Windows10, CPU 为 i5-12400F, 主频为 2.50 GHz, 内存为 16.0 GB, 仿真软件为 MATLAB R2021b。单元储能设备及其他参数^[22, 24-25]如表 2 所示。

表 2 系统仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of the system

设备	参数	数值
锂电池	最大功率 $P_{Ba}^{\max}/\text{kW}$	6
	容量 E_{Ba}/kWh	12
	$[S_{Ba}^{\min}, S_{Ba}^{\max}]$	$[0.3, 0.8]$
	充放电效率 η_{Ba}	0.8
	寿命 l_{Ba}/a	10
	价格 $c_{Ba\text{int}}/\text{元}$	18 000
超级电容	运维成本 $c_{Baope}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.007
	最大功率 $P_{Sc}^{\max}/\text{kW}$	217
	容量 E_{Sc}/kWh	0.136
	$[S_{Sc}^{\min}, S_{Sc}^{\max}]$	$[0.1, 0.95]$
	充放电效率 η_{Sc}	0.98
	寿命 l_{Sc}/a	15
惩罚系数	价格 $c_{Scint}/\text{元}$	16 800
	运维成本 $c_{Scope}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.05
	$\Phi_1/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.12
	$\Phi_2/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.096

4.2 仿真分析

当海上风电场采用混合储能系统, 由仿真可知, 当分解层数 $n=5$ 时对海上风电出力进行 100 次随机模拟, 其并网功率波动约束成立的概率不低于预设的 95% 的置信度。100 次随机模拟下其风电高频波动功率在不同高频段数量 m 下的风储系统净收益结果如图 4 所示。

由图 4 中数据可知, 当风储系统的净收益最大

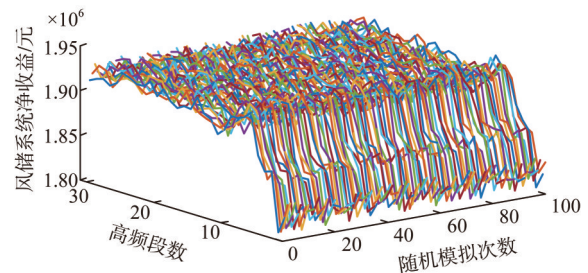


图 4 混合储能功率分配方案

Fig. 4 Power allocation scheme of hybrid energy storage

时混合储能功率分界点 $m=9$, 对应的海上风电实际功率与低频并网功率如图5所示, 其海上风电并网功率在1 min和10 min时的波动值满足国家规定的并网要求, 如图6所示, 此时海上风电实际功率对应的高频波动分量如图7所示。

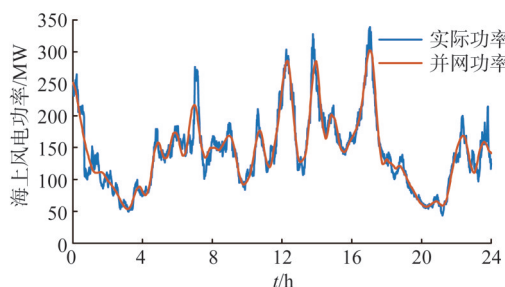
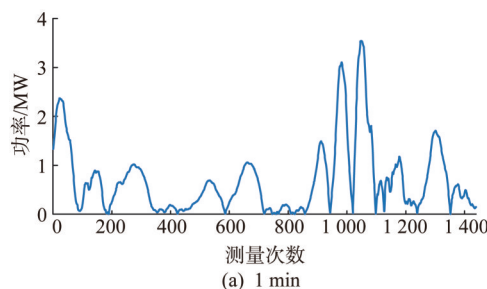
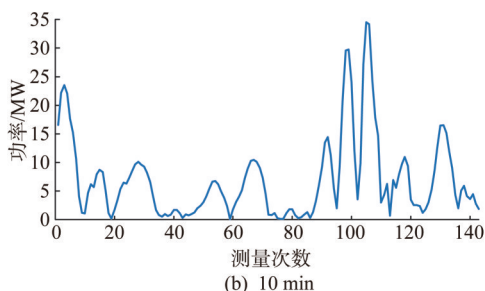


图5 海上风电实际功率与并网功率

Fig. 5 Actual powers and grid connected powers of offshore wind farm



(a) 1 min



(b) 10 min

图6 并网功率波动量

Fig. 6 Fluctuation of grid connected powers

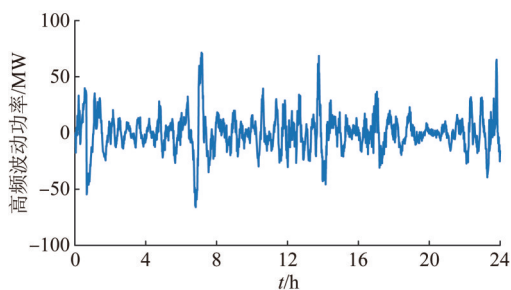


图7 海上风电高频波动功率

Fig. 7 High frequency fluctuation powers of offshore wind farm

本文首先采用单一储能装置参与上述海上风电高频波动功率的平抑任务, 即仅使用锂电池或超级电容, 然后再使用由锂电池和超级电容构成的混合储能系统参与上述任务。得到3种场景下算法的收敛曲线如图8所示, 可以看出要迭代1500次左右, 3种情况对应的风储系统净收益均达到稳定。不同情况下对应的仿真结果见表3。

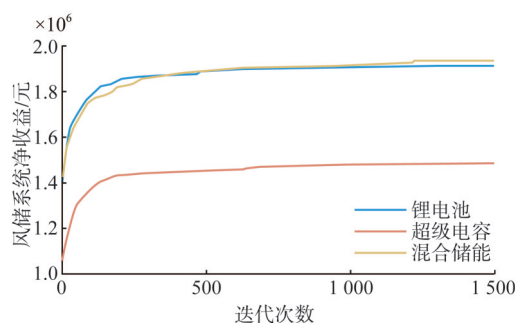


图8 算法收敛曲线

Fig. 8 Algorithm convergence curves

表3 不同场景下仿真结果

Tab. 3 Simulation results in different scenarios

场景	锂电池/件	超级电容/件	碳收益/万元	风储系统净收益/万元
锂电池	14 892	0	9.84	191.33
超级电容	0	107 820	9.84	148.57
混合储能	9 694	9 765	9.84	193.76

由表3可知, 海上风电场一天的碳收益为9.84万元, 具有很好的低碳经济效益。当海上风电场使用锂电池作为储能装置时的日净收益为191.33万元, 使用混合储能装置参与风电平抑任务时的日净收益为193.76万元, 收益增长了1.27%; 使用超级电容作为储能装置时的日净收益为148.57万元, 可知采用混合储能系统时收益增长了30.42%。说明采用混合储能系统与单一储能相比可以有效提高风储系统的净收益。

图9和图10分别为海上风电场使用单一储能与使用混合储能场景下锂电池和超级电容的SOC值比较。由图9可知, 混合储能场景下由于超级电容能平抑风电高频波动功率中频率较高的部分, 故锂电池的充放电频率明显低于单一储能场景下, 这有助于延长其使用寿命, 同时单一储能场景下锂电池的SOC值变化范围在0.3~0.6之间, 而采用混合储能场景下锂电池的SOC值变化范围在0.3~0.8之

间, 锂电池能量利用率也明显得到提高。由图 10 可以看出, 系统采用混合储能时超级电容的 SOC 值曲线明显比单一储能更稠密, 相较于后者, 超级电容处于充放电状态更加充分, 其利用率也大幅度提高, 节省了储能投入。

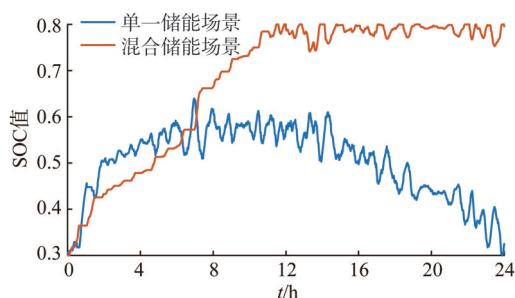


图9 锂电池 SOC 值

Fig. 9 SOC values of lithium batteries

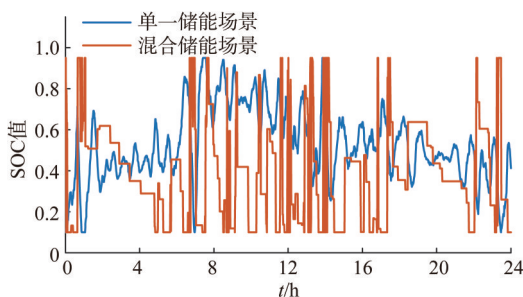


图 10 超级电容 SOC 值

Fig. 10 SOC values of supercapacitors

4.3 风电不确定性对风储系统经济性的影响

本文采用随机机会约束规划法来研究风电的不确定性对海上风电场混合储能系统经济性的影响。置信度的高低反映了海上风电场输出功率满足并网要求的能力。随着置信度的提高系统会施加更严格的约束条件, 当置信度为 1 时意味着海上风电的所有不确定出力的并网功率波动量都满足国标要求。表 4 为不同置信度的风储系统调度结果。

由表 4 可知, 随着置信度的增加风电出力波动区间范围变大, 意味着海上风电出力进行一定次数的随机模拟所满足的风电低频并网功率波动约束情况集增大, 风电不确定性引起的波动性惩罚成本随之变大, 由此导致弃风率增大, 风电场并网功率减少, 售电收益减少, 碳交易收益也随之减少, 从而导致风储系统的净收益降低。

表 4 不同置信度的风储系统调度结果

Tab. 4 Scheduling results of wind and energy storage systems

with different confidence levels				万元
置信度	售电收益	碳收益	波动性惩罚成本	风储系统净收益
0.60	202.49	10.34	0.64	197.21
0.65	201.99	10.25	0.71	196.72
0.70	201.51	10.18	0.78	196.22
0.75	201.01	10.11	0.84	195.73
0.80	200.52	10.04	0.91	195.24
0.85	200.02	9.98	0.98	194.74
0.90	199.53	9.94	1.05	194.25
0.95	199.04	9.81	1.24	193.76

5 结论

本文综合考虑海上风电场的售电收益、碳交易收益及储能系统的各项成本, 提出了一种考虑风电不确定性的海上风电场混合储能系统容量配置方法, 得出结论如下。

1) 海上风电场使用混合储能装置其日净收益比仅采用锂电池或超级电容分别增长了 1.27% 和 30.42%。此外, 锂电池与超级电容组成的混合储能系统可以充分发挥两者的互补优势, 不仅有助于延长锂电池的使用寿命, 还能显著提高两者的利用率。因此, 采用混合储能系统参与风电高频波动功率的平抑任务比单一储能具有更好的经济性和优越性。

2) 利用随机机会约束规划方法应对海上风电出力的不确定性, 通过调整不同的置信度水平来评估风电不确定性对风储系统经济收益的影响。当置信度变大时系统的波动性惩罚成本变大, 导致弃风率增大, 风电场并网功率减少, 售电收益减少, 碳交易收益随之减少, 从而导致风储系统的净收益降低。

参考文献

- [1] 刘阳, 蒋李晋, 谷青发, 等. 限出力下风电集群弃风功率的快速协调分配方法[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 457-464.
LIU Yang, JIANG Lijin, GU Qingfa, et al. Fast coordinated distribution method for curtailed wind power among clustered wind farms with limited output [J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 457-464.
- [2] 胡小康, 王中权, 蔡晓, 等. 考虑最低惯量需求的海上风电与海岛微网频率交互控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 80-90.
HU Xiaokang, WANG Zhongquan, QI Xiao, et al. Interaction

- frequency regulation strategy between offshore wind farm and island microgrids considering minimum inertia requirement [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 80–90.
- [3] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(1): 304–316.
- [4] 张丹, 常东旭, 曾丕江, 等. 含高比例新能源和小水电的孤网频率稳定特性及涉网参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 11–18.
- ZHANG Dan, CHANG Dongxu, ZENG Pijiang, et al. Frequency stability characteristics and optimization of grid-rated parameters for isolated grids with high proportion of new energy and small hydropower [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 11–18.
- [5] CAO M, XU Q, QIN X, et al. Battery energy storage sizing based on a model predictive control strategy with operational constraints to smooth the wind power[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(115): 105471. 1–105471.10.
- [6] 余洋, 陈东阳, 吴玉威, 等. 风电波动平抑下考虑SOC均衡及收益的电池储能功率分配策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1714–1723.
- YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Power allocation strategy considering soc balance and income for battery energy storage in smoothing wind power fluctuations [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1714–1723.
- [7] 张小莲, 陈冲, 张仰飞, 等. 考虑电池运行状态的风电场储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 199–207.
- ZHANG Xiaolian, CHEN Chong, ZHANG Yangfei, et al. Optimal configuration of wind farm energy storage capacity considering battery operation state [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 199–207.
- [8] 唐杰, 姜有华. 基于自适应小波变换与HHT的混合储能容量配置[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 224–230.
- TANG Jie, JIANG Youhua. Hybrid energy storage capacity allocation based on adaptive wavelet transform and HHT [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 224–230.
- [9] 闫来清, 曹丽源, 薛太林, 等. 风电场黑启动储能容量优化配置: 一种考虑储能运行策略的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 131–139.
- YAN Laiqing, CAO Liyuan, XUE Tailin, et al. Optimal configuration of wind farm black start energy storage capacity: a method considering energy storage operation strategy [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 131–139.
- [10] 焦东东, 陈洁, 付菊霞, 等. 平抑风电功率波动的储能容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 66–73.
- JIAO Dongdong, CHEN Jie, FU Juxia, et al. Configuration of energy storage capacity for suppressing fluctuation of wind power [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 66–73.
- [11] 王苏蓬, 张新慧, 张军, 等. 基于WPD-LPF和灰色关联度的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1241–1248.
- WANG Supong, ZHANG Xinhui, ZHANG Jun, et al. Wind power fluctuation control strategy based on WPD-LPF and gray correlation [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(9): 1241–1248.
- [12] 宋伟业, 刘灵玥, 阎洁, 等. 基于深度强化学习的海上风电集群自进化功率平滑控制方法[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 36–46.
- SONG Weiye, LIU Lingyue, YAN Jie, et al. Self-evolving power smooth control method for offshore wind power cluster based on deep reinforcement learning [J]. Electric Power, 2023, 56(3): 36–46.
- [13] 王苏蓬, 张新慧, 吴文浩, 等. 用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 16–23.
- WANG Supong, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 16–23.
- [14] 钱韦廷, 赵长飞, 万灿, 等. 基于概率预测的混合储能平抑风电波动随机优化调控方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 18–27.
- QIAN Weiting, ZHAO Changfei, WAN Can, et al. Stochastic optimal regulation method based on probabilistic prediction for hybrid energy storage to smooth wind power fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 18–27.
- [15] 张靠社, 冯培基, 张刚, 等. 考虑机会约束的多能源微电网双层优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 41–48.
- HANG Kaoshe, FENG Peiji, ZHANG Gang, et al. Bi-level optimization configuration method for multienergy microgrid considering chance constraints [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 41–48.
- [16] 丁明, 林玉娟. 考虑风光荷不确定性的随机生产模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2937–2944.
- DING Ming, LIN Yujuan. Probabilistic production simulation considering randomness of renewable wind power [J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(10): 2937–2944.
- [17] WU Y P, WU W B. Analysis of wavelet decomposition properties of wind turbine signal [J]. Energy Reports, 2021(7): 873–879.
- [18] 中国电力科学研究院. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T19963.1—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [19] 胡珺, 方祺, 龙文滨. 碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率—基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J]. 经济研究, 2023, 58(4): 77–94.
- HU Jun, FANG Qi, LONG Wenbin. Carbon emission regulation, corporate emission reduction incentives and total factor productivity: a natural experiment based on China's carbon emission trading system [J]. Economic Research Journal, 2023, 58(4): 77–94.
- [20] 叶浩劫, 谢丽蓉, 邓佳桐, 等. 考虑碳交易机制的风-火协调低碳优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 106–112.
- YE Haojie, XIE Lirong, DENG Jiatong, et al. Wind-fire coordinated low-carbon optimal dispatch considering carbon trading mechanism [J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(6): 106–112.
- [21] 王智冬, 姜素华, 范臻, 等. 基于机会约束规划的含大规模风电电力系统阻塞调度优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 147–154.
- WANG Zhidong, LOU Suhua, FAN Zhen, et al. Chance-constrained programming based congestion dispatching optimization of power system with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 147–154.
- [22] 陈崇德, 郭强, 宋子秋, 等. 计及碳收益的风电场混合储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 22–33.
- CHEN Chongde, GUO Qiang, SONG Ziqiu, et al. Optimal