DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.119 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

基于极值理论的储能基础响应能力配置

白雪婷
(北京智盟信通科技有限公司智能诊断事业部，北京 100176)

摘要：聚焦储能配置研究，针对分布式光伏出力数据不完备、数据质量差等痛点问题，提出了基于极值理论的储能基础响应能力配置方法。首先，提出了基于广义极值分布的分布式光伏出力概率性分析方法，并对不同极值颗粒度下的功率数据进行拟合分析；其次，面向减少弃光率和常态化平滑波动两大目标，基于对分布式光伏出力重现期和重现水平的分析计算，提出了储能基础响应能力配置方法；最后，以某地区分布式光伏电站出力数据进行算例仿真，验证了所提方法的可行性和可推广性。结果表明，广义极值分布能实现对分布式光伏出力分布的良好拟合，且对数据精度的依赖性较小。同时，所提方法给出的储能基础响应能力的配置结果，与中国部分省份对于光伏项目配储容量的最低要求不谋而合。

关键词：分布式光伏；广义极值分布；储能；重现期；重现水平

Configuration of Basic Responsiveness Capability of Energy Storage Based on Extreme Value Theory

BAI Xueting
(Intelligent Diagnostic Department, Beijing Zhimeng Information and Telecommunication Technology Company, Beijing 100176, China)

Abstract: With a focus on the research of energy storage configuration and aimed at the problems such as incomplete data and poor data quality of distributed photovoltaic output, a configuration method for the basic responsiveness capability of energy storage based on the extreme value theory is proposed. First, a probabilistic analysis method for distributed photovoltaic output based on generalized extreme value distribution is put forward, and the power data under different granularities of extreme value is fitted and analyzed. Second, with two goals of reducing the photovoltaic abandonment rate and smoothing the output fluctuation normally, the configuration method for the basic responsiveness capability of energy storage is proposed based on the return period and return level of distributed photovoltaic output. Finally, the feasibility and extensibility of the proposed method are verified by simulations of an example based on the output data of a distributed photovoltaic power station in a certain area. Results show that the generalized extreme value distribution can achieve a good fitting of distributed photovoltaic output distribution, and the dependence on data accuracy is minor. Meanwhile, the configuration results of the basic responsiveness capability of energy storage given by the proposed method agree with the minimum storage capacity requirements for photovoltaic projects in some provinces of China.

Keywords: Distributed photovoltaic; generalized extreme value distribution; energy storage; return period; return level

随着“双碳”目标的推进，分布式能源在电网中的接入率显著提升，其固有的不确定性所引发的出力随机波动[1]，为电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战，减少“弃光率”“弃风率”成为重要的研究课题[2]。由于储能技术具备分布式能源并网优化能力，可有效改善间歇式电源的运行性能[3]，因此其大规模发展应用成为必然趋势[4]。

对于可再生能源的储能配置确定方法，主要集中在平滑功率波动、电压稳定等方面，包括总容量

收稿日期：2023-09-21；**修回日期**：2023-12-02；**录用日期**：2024-01-02；**网络首发日期**：2024-04-26

配置和混合储能容量分配 2 个角度的研究[5-6]。文献[7]聚焦光伏出力运行场景，提出了考虑弃光率、波动率、输送容量等不同光伏工况评估指标影响下的光储优化配置方法；文献[8]关注电压质量问题，提出了分布式储能参与电压暂降治理的配置与运行策略。针对可再生能源不确定性的储能基础运行容量(备用容量)配置的研究，多位学者围绕补偿功率预测误差展开[9-10]。然而，误差补偿式优化配置方法与预测算法的类型及算法模型的预测精度强相关，该配置方法的可靠性和可解释性存在争议。与电力负荷类似，光伏出力存在不确定性，但不同于负荷功率数据采集终端的大规模安装及数据治理工作的持续推进，在分布式光伏电站井喷式发展背景下，光伏出力存在数据不完备、异常数据多等问题。绝大多数分布式光伏出力预测方法、储能配置方法对功率数据的数量和质量都提出了较高的要求，这与分布式光伏出力现状存在一定矛盾，因此，选择 1 个数据依赖性较小的方法，依托对分布式光伏出力特性评估进行储能基础响应能力配置是本文的主要目标。

极值理论的提出旨在针对较少发生但具有潜在重大影响的极端事件进行研究，基于极值理论，无需获取分布式光伏出力的全量数据，仅依托功率极值数据即可实现分布式光伏出力分布特性的整体刻画。极值理论最初的应用主要集中在气象学、交通、金融等领域[11-14]。近年来，极值理论在电力系统中的应用越来越多，众多学者在电力负荷、停电损失事故、风电频率、输电线路等领域进行了一定的探索[15-18]。文献[19]基于广义 Pareto 分布构建了负荷极值分布模型，并进一步分析研究了气象因素对负荷的影响；文献[20]通过量化高比例风电并网系统的频率变化极值时间，提出了风机的虚拟惯量控制策略；文献[21]利用超阈值模型实现了对中国电网停电损失风险的有效评估，解决了停电损失负荷样本数据稀少的问题；文献[22]聚焦强风雨荷载冲击对输电线路的影响，提出了基于多维极值分布的风偏放电实时概率预测模型。目前鲜有学者将极值理论应用在储能运行能力评估及容量配置方面。

本文着眼储能配置研究，针对分布式光伏出力数据不完备、数据质量差这一痛点问题，提出了基于极值理论的储能基础响应能力配置方法。首先，基于极值理论对分布式光伏出力进行广义极值分布拟合，选取合适颗粒度的极值数据，实现对分布式光伏出力的概率性分析；其次，提出了减少弃光率和常态化平滑出力两大目标，基于对分布式光伏出力重现期和重现水平的研究分析，提出了储能基础响应能力配置方法；最后，采用某分布式光伏电站数据进行了方法验证，并通过调研证明了方法的可推广性和结果的合理性。

1 基于广义极值理论的分布式光伏出力概率性分析

1.1 广义极值理论

1928 年，Fisher 和 Tippet 提出了极值类型定理，根据定理，若存在$\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$为 1 组独立且同分布的变量，则变量的峰值 M_n=max(x_1, x_2, $\cdots$, x_n)。若存在$\{a_n>0\}$和$\{b_n\}$使得对应关系式成立，则认为 $H(x)$满足极值分布，即

$$\lim_{n\to\infty}\Pr\left(\frac{M_n-b_n}{a_n}\leqslant x\right)=H(x)\qquad x\in\mathbf{R}\tag{1}$$

引入位置参数、尺度参数、形状参数对$H(x)$进行描述，则$H(x)$为广义极值GEV(generalized extreme value)分布，表达式为

$$f(x)=\begin{cases}H(x;\mu,\sigma,\xi)=\exp\left[-\left(1+\xi\dfrac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right]\\ 1+\xi\dfrac{x-\mu}{\sigma}>0\end{cases}\tag{2}$$

式中：μ 为位置参数，表示分布的中心；σ 为尺度参数，表示相对于中心的偏差大小，反映变量总体分布的分散程度；ξ 为形状参数，决定极值分布的尾部形状，反映极值分布的类型。

根据尾部特征，极值分布分为 3 种基本类型：

当 ξ=0 即为厚尾时，为极值Ⅰ型分布，也称为 Gumbel 型极值分布；当 ξ>0 即为肥尾时，为极值Ⅱ型分布，也称为 Fréchet 型极值分布；当 ξ<0 即为截尾时，为极值Ⅲ型分布，也称为 Weibull 型极值分布。相应地，变量极值的概率密度分布函数为

$$f(x)=\begin{cases}\left[\dfrac{\xi(x-\mu)}{\sigma}+1\right]^{-\frac{\xi+1}{\xi}}\mathrm{e}^{-\left[\frac{\xi(x-\mu)}{\sigma}+1\right]^{-\frac{1}{\xi}}} \\ \qquad \dfrac{\xi(x-\mu)}{\sigma}+1>0 \\ 0 \qquad \dfrac{\xi(x-\mu)}{\sigma}+1\leqslant 0\end{cases} \tag{3}$$

针对分布函数参数估计方法的选择，本文采用极大似然估计法。有研究表明，参数估计技术对广义极值分布参数大小的影响可忽略不计[23]，因此，考虑到极大似然估计法的无偏和渐近正态的优良性质，本文采用极大似然估计法进行参数估计。

1.2 分布式光伏出力重现水平和重现期

设光伏出力{P_1, P_2,⋯, P_n}为 1 组独立且同分布的变量，当电网中光伏出力的峰值 M_n=max(P_1, P_2,⋯, P_n)满足广义极值分布时，则可用 GEV 分布函数来表示光伏出力极值的总体分布特征。首先对功率数据进行初始化处理，以获取光伏出力的样本极值序列。本文采用的数据集中，数据采样精度为 5 min，则若以 30 min 为统计区间，则每个区间内的功率样本数为 6，则第 n 个区间内的光伏出力极大值可表示为

$$\begin{cases}P_n^{\max}=\max(P_k) \\ k\in\{6(n-1),6(n-1)+1,\cdots,6n-1\}\end{cases} \tag{4}$$

式中，P_k为统计区间内的第 k 个 5 min 采样时刻的分布式光伏出力大小，MW。同理可进行 15 min、1 h 等统计尺度的数据初始化工作。

通俗来讲，重现期与频率有着共通之处，用来表示某一事件重复出现的平均时间间隔。值得注意的是，重现期具有统计平均意义，不可认为在某时间间隔内必然出现一次。类比水文工程中的重现水平和重现期概念，本文引入分布式光伏出力重现水平和分布式光伏出力重现期。将分布式光伏出力重现期记为 T，则相应的重现水平记为 P_T，定义为 T 时期内分布式光伏出力的最大值，同时认为，在 T 时期内，分布式光伏出力超过 P_T 的概率为 p=1/T。

本文提出的光储系统储能基础运行响应能力配置方法的应用前提为在实际工程中，对分布式光伏发电功率变化引起的小概率事件承受能力的评估，因此利用分位数回归法，以 p(0<p<1)分位数实现对极值样本的分布式光伏发电功率重现水平 P_T的估计，以分位数函数定义重现水平，分别表示为

$$P_p=\inf\{p:H(p)\geqslant p\} \tag{5}$$

$$P_p=H^{-1}(p)=\begin{cases}\mu-\sigma\ln[-\ln(1-p)] & \xi=0 \\ \mu+\dfrac{\sigma\{-1+[\ln(1-p)]^{-\xi}\}}{\xi} & \xi\neq 0\end{cases} \tag{6}$$

式中，P_p为分布式光伏出力极端事件的重现水平，是 p 极值分位点处对应的值，MW。T=1/p 为重现期，与重现水平 P_p一一对应，h。

1.3 储能基础响应能力配置

基于广义极值理论，本文可从概率分布角度进行分布式光伏出力的总体分布特征的刻画，然而，光伏出力极值也可分为“常态”和“极端态”2 种情形。当分布式光伏出力极值处于分布的“极端态”时，储能基础响应能力才能发挥真正的作用。因此，本文聚焦的储能基础响应能力即聚焦光伏出力极值的“极端态”。一方面，聚焦分布式光伏出力的不确定性，储能基础响应能力旨在发生小概率大功率(高重现水平)事件时进行功率逆补偿，从而有效减少弃光率；另一方面，在发生常态化(日内 3~6 h)出力波动事件时进行出力平滑补偿。

以减少弃光率为目标，本文以发生极端概率事件与小概率大功率(高重现水平)事件下的分布式光伏出力差额来确定储能逆补偿所需的基础响应能力，其中极端概率记为 m，小概率记为 n，则储能逆补偿基础响应能力可表示为

$$P_{\mathrm{ces}}=P_m^p-P_n^p \tag{7}$$

式中：P_{ces} 为功率逆补偿差额，即储能逆补偿基础响应能力，MW；P_m^P 为 m 概率下的分布式光伏出力重现水平，MW；P_n^P 为 n 概率下的分布式光伏出力重现水平，MW。

以平滑光储系统整体出力为目标，本文考虑面向常态化(日内 3~6 h)出力波动事件，则以常态化管理时段对应的重现期内的最大分布式光伏出力重现水平与储能运行时长覆盖范围内的最大出力重现水平所对应的功率差额，来确定平滑出力的储能基础响应能力。经调研，常规的需求响应项目和有序用电项目的单次执行时长约为 3 h，而忽略地区差异，当前中国各省的有效日照小时数约 6 h，因此本文考虑的常态化出力平滑的重现期考虑时长为日内 3~6 h。常态化管理对应的储能平滑出力基础响应能力 P_{des} 可表示为

$$P_{des} = P_{t+l}^T - P_t^T \tag{8}$$

式中：P_t^T 为 t 重现期对应的分布式光伏出力重现水平，MW；P_{t+l}^T 为 $t+l$ 重现期对应的分布式光伏出力重现水平，MW；l 为储能系统的连续运行时长，本文拟设定时长为 2 h。

因此，本文配置的储能基础响应能力 P_{es} 取逆补偿响应能力 P_{ces} 和平滑出力响应能力 P_{des} 中的最大值，表达式为

$$P_{es} = \max(P_{ces}, P_{des}) \tag{9}$$

2 算例分析

在整县制光伏推进背景下，分布式光伏装机容量井喷式发展，本文选取中国东部某地区的某分布式屋顶光伏电站 2019 年的发电功率数据集进行算例分析。该电站的额定装机容量为 5.3 MW，功率数据采集的时间间隔为 5 min，则单日功率样本数为 288 个。

2.1 分布式光伏出力广义极值分布拟合分析

首先，进行分布式光伏发电功率数据初始化，本文所用数据集的采样时间间隔为 5 min，则每小时内的原始样本数量为 12 个。根据式(4)，若以 1 h 为单个区间，则单日内区间数为 24 个，将全年分布式光伏出力数据划分为 8 760 个区间，其中单个区间内的功率数据极值取每小时采样功率数据集中的最大值，则通过逐小时功率数据的初始化，可获取全年的小时级极值样本序列。同理可获取不同区间长度下的极值样本集。

考虑到不同地区的功率采样精度不同，可初始化获取 15 min、30 min、1 h 3 种不同区间长度下的功率数据极值样本序列。假设所构成的序列均满足广义极值分布，进行 GEV 分布拟合，拟合曲线如图 1 所示。

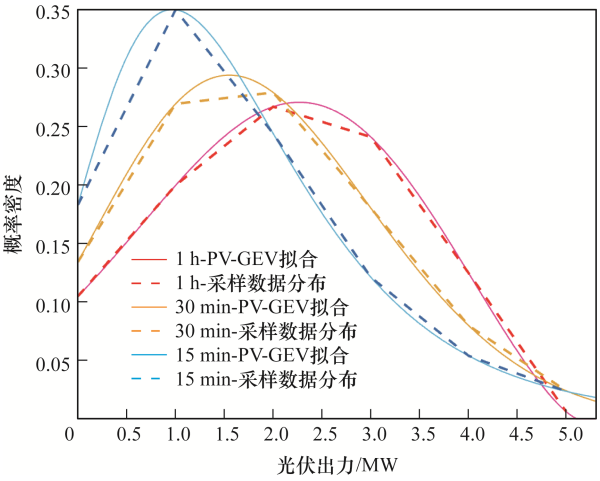


图 1 分布式光伏出力的 GEV 分布拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of GEV distribution for distributed photovoltaic output

为评估不同区间长度下 GEV 分布函数的拟合效果，本文采用概率(*P-P*)图进行分布函数拟合效果的判断。图 2 为不同颗粒度下的 GEV 分布拟合效果诊断，当 x 的分布函数为 $H(x;\ \mu,\ \sigma,\ \xi)$时，其 *P-P* 图应近似为直线。

由图 2 可见，1 h 颗粒度下的分布式光伏出力数据 GEV 分布拟合相对更优，这表明了 GEV 分布在进行光伏出力特性分析上的数据包容度较大，验证了该方法相较于其他概率分布模型具备较大的小样本数据分析优势，也侧面体现出其在数据采集精度较差的地区具备一定的推广优势。采用极大似然估计法进行分布式光伏出力 GEV 分布拟合的参数见表 1。

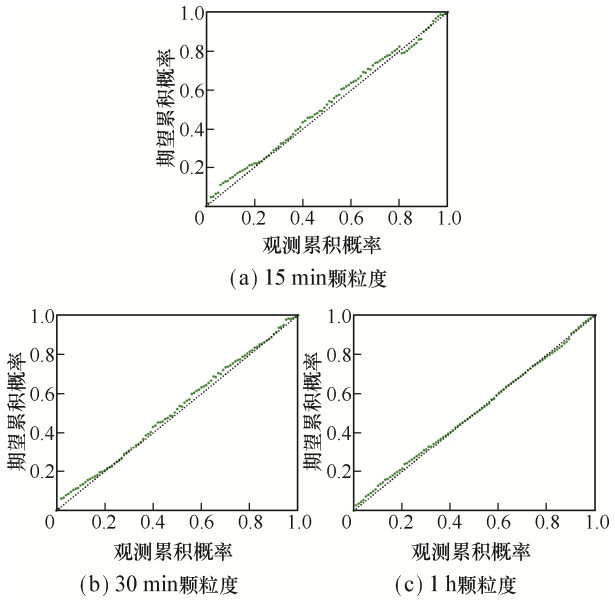


图 2　GEV 分布拟合效果诊断

Fig. 2 Diagnostic of fitting effect on GEV distribution

表 1　分布式光伏出力的 GEV 分布参数

Tab. 1 GEV distribution parameters of distributed photovoltaic output

参数	估计值
ξ	−0.419 5
σ	1.504 6
μ	1.535 1

根据表 1 可知，分布式光伏出力 GEV 分布的形状参数 ξ 为负，呈现出截尾特征，表明光伏发电功率极值数据服从Ⅲ型极值分布，对应于 1 个有界的 Weibull 分布，符合其有上限的特性，即光伏发电功率不可能超过其相对基值(即对应电站的额定容量)。

2.2　分布式光伏出力重现水平与重现期计算分析

基于 1 h 极值数据颗粒度下的分布式光伏出力 GEV 分布拟合结果，结合表 1 中估计的拟合参数值，根据式(6)绘制分布式光伏出力重现水平变化曲线，如图 3 所示。

从图 3 可以直观地看到，分布式光伏出力在 p 值较小时具备更高的重现水平。0.05 极值分位点处对应的分布式光伏出力重现水平为 4.11 MW，即相应重现期内发生 4.11 MW 这一大功率事件的概率为 0.05；0.10 极值分位点处对应的分布式光伏出力重现水平为 3.74 MW；0.20 极值分位点处对应的分布式光伏出力重现水平为 3.20 MW。此外，极端小概率 0.01 分位点处对应的分布式光伏出力重现水平为 4.63 MW。从减少弃光率的目标考虑，需重点关注小概率与分布式光伏出力重现水平的相关性。为研究重现期与重现水平的相关关系，绘制图 4 进行进一步分析。

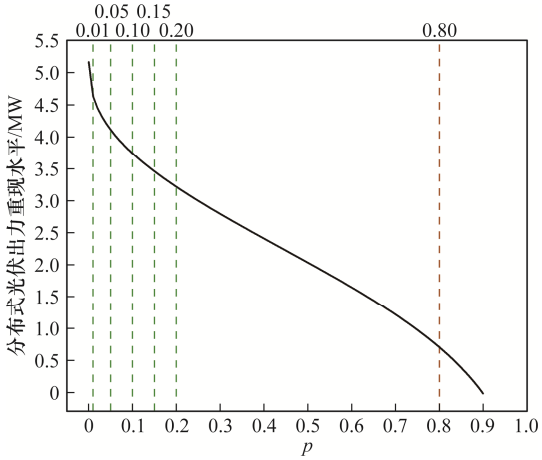


图 3　分布式光伏出力的重现水平变化曲线

Fig. 3 Return level curves of distributed photovoltaic output

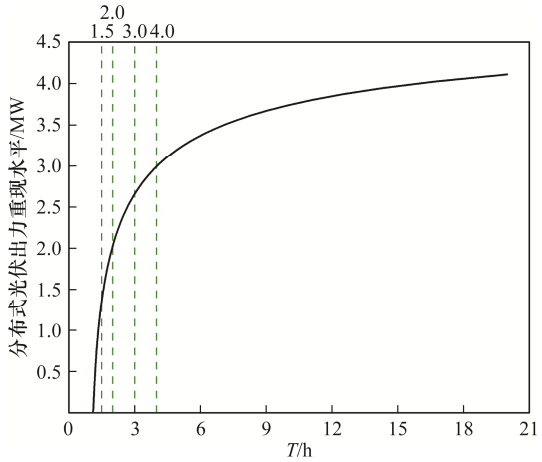


图 4　分布式光伏出力的重现期变化曲线

Fig. 4 Return period curves of distributed photovoltaic output

观察图 4 可知，不同于概率与重现水平的相关关系，随着重现期的增大，分布式光伏出力重现水平增加的速度存在明显由快变缓的过程，急速变化期在 0~2 h 之间，快速变化期在 2~4 h 之间，在 4 h 后进入缓慢变化期。具体地，由图 4 可见，1.5 h

重现期下的分布式光伏出力重现水平为 0.67 MW；2.0 h 重现期下的对应重现水平为 2.03 MW，2.5 h 重现期下为 2.40 MW，3.0 h 重现期下为 2.66 MW，4.0 h 重现期下为 2.99 MW，6.0 h 重现期下为 3.38 MW。以平滑光储系统整体出力为目标考虑，重点关注快速变化期内的重现期与重现水平相关关系。

2.3 储能基础响应能力计算分析

聚焦减少弃光率这一目标，本文首先设定极端概率 m=0.01，则 P_m^p 为 0.01 概率下的光伏出力重现水平，则根据式(7)，储能逆补偿基础响应能力 P_{ces} 由 P_n 决定。绘制 n 与 P_{ces} 的变化关系，如图 5 所示。聚焦常态化平滑出力波动这一目标，本文拟定连续放电时长为 2 h，根据式(8)，储能平滑出力基础响应能力 P_{des} 由重现期 t 决定。绘制 P_{des} 与 t 的变化关系曲线，如图 6 所示。

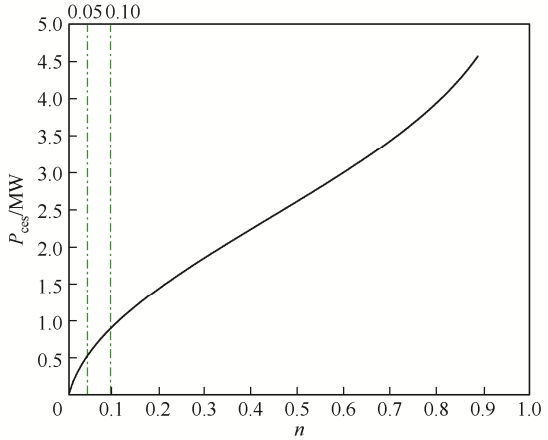


图 5 储能逆补偿基础响应能力与概率相关关系曲线

Fig. 5 Curve of correlation between basic responsiveness capability of energy storage for inversing compensation and probability

观察图 5 可知，若储能面向分布式光伏出力重现概率低于 0.05 的大功率事件进行逆补偿基础响应能力配置，则响应能力为 0.52 MW；若概率选定为 0.10，则认为在发生重现概率低于 0.10 的小概率大功率事件时，储能逆补偿基础响应发挥作用，响应能力为 0.89 MW。观察图 6 可知，随着 t 的增大，系统所需的储能平滑出力基础响应能力的减小呈现明显由快变缓的过程，拐点约位于 3 h，急速变化期在 0~2 h 之间，快速变化期在 2~4 h 之间，在 4 h 后进入缓慢变化期。2.0 h 重现期下为 0.97 MW，拐点处 3.0 h 重现期下为 0.53 MW，4.0 h 重现期下为 0.38 MW。

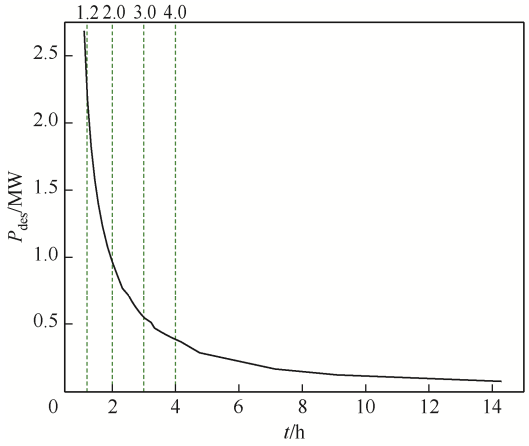


图 6 储能平滑出力基础响应能力与重现期相关关系曲线

Fig. 6 Curve of correlation between basic responsiveness capability of energy storage for smoothing output and return period

本文聚焦的储能基础响应能力旨在发生小概率大功率(高重现水平)事件时进行功率逆补偿，从而有效减少弃光率，在发生常态化(日内 3~6 h)出力波动事件时进行出力平滑补偿。因此，结合图 5 和图 6，面向出力概率低于 0.05 的小概率大功率事件和重现期大于 3 h 对应的常态化出力波动事件，进行储能基础响应能力配置。根据式(9)，该电站的储能基础响应能力可定为 0.53 MW，约为该电站光伏装机容量的 10%。有研究表明，比较面向光伏不同工况出力与全年出力的储能系统配置结果，在容量和功率上都相差不大，这也侧面验证了本文提出的基于极值理论的面向分布式光伏的储能基础响应能力配置方法在气象类型、运行工况等不同场景下有较高的适应性，具备一定的工程推广复制价值。将本文所提方法与基于工况分类提出的储能优化配置结果进行对比，分析结果见表 2。从表 2 中可知，聚焦于经济性等多要素下的储能优化配置容量大于本文提出的储能基础响应能力配置，某种程度上说明了 2 种方法结论的有效性，即本文提出的 10%为可靠性引导下的基础能力要求，应为储能配置的下限标准。

表 2　不同的储能配置方法分析

Tab. 2 Analysis of different energy storage configuration methods

核心方法	基于极值理论		基于光伏工况分类	
光伏电站容量/MW	5.3		50.0	
考虑要素	小概率大功率事件	常态化出力波动事件	运行稳定性	经济性
具体要求	功率逆补偿	出力平滑补偿	弃光率 5%	投资回报率 3.42%
容量配置结果/MW	0.53		14.00	
容量配置百分比/%	10		28	
特点	可靠性引导下的基础响应能力配置		多因素考虑下的容量优化配置	
优势	数据兼容性高	工程推广复制性强	要素考虑全面	

此外，根据调研可知，该结论与中国部分省份对于光伏项目配储容量的最低要求不谋而合，典型省份的储能容量配置要求见表 3。

表 3　中国部分省份对于光伏项目储能容量的配置要求

Tab. 3 Configuration requirements of energy storage capacity for photovoltaic projects in some provinces of China

省份	时间	城市	光伏配储最低容量要求
宁夏	2022/01/13	—	10%
四川	2022/12/06	—	10%
贵州	2023/05/23	—	10%
江苏	2022/05/08	苏州	8%
	2022/10/11	无锡	8%
浙江	2021/12/21	杭州	10%
	2022/05/11	永康	10%
	2021/12/16	绍兴	10%
	2021/09/23	义乌	10%

3　结论

在分布式光伏出力数据不完备、数据质量差的背景下，本文聚焦储能容量配置这一课题，面向减少弃光率和常态化平滑出力两大需求，提出了基于极值理论的储能基础响应能力配置方法，选取某地区分布式光伏电站进行算例分析，结论如下。

(1)广义极值分布可以较好地描述分布式光伏出力数据极值分布情况，支撑对分布式光伏出力的概率性分析。

(2)1 h 颗粒度的极值数据相较于 30 min 和 15 min 更具广义极值分布拟合优势，因此，基于极值理论的分布式光伏出力分布刻画方法对于数据的依赖性相对较低，在当前的分布式光伏数据现状下具备较强的可行性和推广性。

(3)基于分布式光伏出力重现水平和重现期进行储能基础响应能力配置，结果表明，当储能基础响应能力达到分布式光伏电站装机容量的 10%时，一方面可在发生小概率大功率事件时进行功率逆补偿有效减少弃光率，另一方面可有效实现常态化(日内 3~6 h)出力波动事件的出力平滑补偿。调研表明，该结论与中国大部分省份对于光伏项目配储容量的最低要求不谋而合。

参考文献：

[1] 谭文娟, 陈燕东, 杨苓, 等. 光储直流微网能量协调控制方法[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 76-85.
Tan Wenjuan, Chen Yandong, Yang Ling, et al. Energy coordinated control method for DC microgrid with photovoltaic [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 76-85. (in Chinese)

[2] 杨立滨, 曹阳, 魏韡, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 45-52.
Yang Libin, Cao Yang, Wei Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 45-52. (in Chinese)

[3] 谢志佳, 李建林, 程伟, 等. 基于混合储能系统的风电跟踪目标出力优化控制[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 28-34.
Xie Zhijia, Li Jianlin, Cheng Wei, et al. Optimal control of wind power tracking dispatching plan based on hybrid energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2018,

16(4): 28-34. (in Chinese)

[4] 李建林, 李雅欣, 周喜超. 电网侧储能技术研究综述[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 77-84.
Li Jianlin, Li Yaxin, Zhou Xichao. Summary of research on grid-side energy storage technology [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 77-84. (in Chinese)

[5] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13, 24.
Han Xiaojuan, Chen Yueyan, Zhang Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13, 24. (in Chinese)

[6] 李志强, 李赛, 王凡凯. 平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略[J]. 现代电力, 2020, 37(6): 646-653.
Li Zhiqiang, Li Sai, Wang Fankai. Adaptive control strategy of hybrid energy storage system for mitigating wind power fluctuations [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(6): 646-653. (in Chinese)

[7] 杨夯, 郭宜果, 李哲. 计及光伏工况的集中式发电场景下储能优化配置[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 116-126.
Yang Hang, Guo Yiguo, Li Zhe. Optimal allocation of energy storage in centralized power generation scenarios considering photovoltaic working conditions [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 116-126. (in Chinese)

[8] 马兴, 李俊杰, 黎博, 等. 分布式储能参与电压暂降补偿的优化配置与控制策略[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(5): 64-71.
Ma Xing, Li Junjie, Li Bo, et al. Optimal allocation and control strategy of distributed energy storage system for compensating voltage sag [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2019, 40(5): 64-71. (in Chinese)

[9] 毛志宇. 光伏发电中储能系统的容量配置及运行技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
Mao Zhiyu. Research on capacity allocation and operation technology of energy storage system for photovoltaic power generation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)

[10] Bludszuweit H, Dominguez-Navarro J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1651-1658.

[11] 欧书彬. 非仿射随机波动率模型的极值期权定价[D]. 桂林: 广西师范大学, 2023.
Ou Shubin. Extremum options pricing under a non-affine stochastic volatility model [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2023. (in Chinese)

[12] 唐莉, 杨冰冰, 魏希, 等. 气候变化对江西省主汛期降雨极值时空差异的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(1): 53-63.
Tang Li, Yang Bingbing, Wei Xi, et al. Study on the impact of climate change on the extreme rainfall distribution in main flood season of Jiangxi province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 53-63. (in Chinese)

[13] 杜飞, 胡庆芳, 王银堂, 等. MSWEP 对江苏省太湖流域日降水量和极值降水量的表征能力解析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 167-175.
Du Fei, Hu Qingfang, Wang Yintang, et al. Validation of MSWEP daily and extreme precipitation of the Taihu Lake Basin in Jiangsu province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 167-175. (in Chinese)

[14] 焦美菊, 郝建名, 陈露丹, 等. 基于长期监测的车辆荷载效应时变极值预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(6): 105-111.
Jiao Meiju, Hao Jianming, Chen Ludan, et al. Time-variant extreme value prediction of vehicle load effect based on long-term monitoring [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(6): 105-111. (in Chinese)

[15] 于群, 石良, 曹娜, 等. 广义极值理论在大停电事故损失负荷预测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 71-77.
Yu Qun, Shi Liang, Cao Na, et al. Application of generalized extreme value distribution in predicting power loss of large-scale blackouts [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 71-77. (in Chinese)

[16] 李杨. 运行风机荷载极值统计外推方法和经验公式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Li Yang. Statistical extrapolation methods and empirical

formulae for estimating extreme loads on operating wind turbine [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)

[17] 吴涵, 王瑾辉, 苗安康, 等. 基于广义极值分布的线路负载率指标及计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 773-783.
Wu Han, Wang Jinhui, Miao Ankang, et al. Feeder burden rate and calculation method based on generalized extreme value distribution [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 773-783. (in Chinese)

[18] 陈淼, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于故障前行波极值时间的柔性直流线路单端量保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3742-3757.
Chen Miao, Jia Ke, Yao Kunpeng, et al. Single-ended protection method of flexible DC line based on extremum time of fault forward traveling wave [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3742-3757. (in Chinese)

[19] 李妮妮, 徐付霞. 电力负荷量及气象影响因素的极值模型分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 99-106.
Li Nini, Xu Fuxia. Extreme value model analysis of power load and meteorological influencing factors [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2022, 38(1): 99-106. (in Chinese)

[20] 张祥宇, 金召展, 付媛, 等. 基于频率变化极值时间的风电虚拟惯量约束与支撑控制[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2491-2504.
Zhang Xiangyu, Jin Zhaozhan, Fu Yuan, et al. Virtual inertia constrain and support control of wind turbines based on variable frequency limit time [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2491-2504. (in Chinese)

[21] 于群, 肖松青, 曹娜, 等. 基于超阈值模型的中国电网停电事故极值风险分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 157-166, 175.
Yu Qun, Xiao Songqing, Cao Na, et al. Extreme value risk analysis of blackout in China power grid based on over threshold model [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(6): 157-166, 175. (in Chinese)

[22] 邓红雷, 周晨, 夏桥, 等. 基于多维极值分布的风雨荷载下输电线路风偏放电概率分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 67-75.
Deng Honglei, Zhou Chen, Xia Qiao, et al. Probability analysis of windage yaw discharge under wind and rain loads based on the multidimensional extreme value distribution [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 67-75. (in Chinese)

[23] Trainer T. Limits to solar thermal energy set by intermittency and low DNI: Implications from meteorological data [J]. Energy Policy, 2013, 63: 910-917.



白雪婷

作者简介：

白雪婷(1995—)，女，通信作者，本科，工程师。研究方向：新能源及储能规划优化研究，电网主设备健康管理研究与应用。E-mail：15612631272@163.com。

(责任编辑：耿越)