

面向新能源高渗透系统调峰和调频的系统级 储能容量需求分析

王 森,李凤婷,张高航,尹纯亚,李 源
(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:高渗透新能源的强不确定性及火电机组占比的逐步减小使得系统灵活性资源不足,系统级储能可高效缓解系统的调峰和调频压力。为此,从系统角度提出了一种面向新能源高渗透系统调峰和调频的系统级储能需求容量确定方法。基于分位数回归分析和高斯混合模型聚类,提出了一种刻画净负荷不确定性的场景集生成方法;基于生成的场景集,建立了一种无储能容量约束的常规火电机组与储能联合优化运行模型,以获取最优运行时储能参与调峰和调频的功率;为了同时兼顾储能利用率和系统运行成本,构建了基于储能电量偏离程度、运行成本增长率指标的储能功率修正模型,并确定储能需求功率和容量,进而分析新能源渗透率、储能功率和容量与满足需求的置信度水平三者之间的关系。算例仿真结果表明,所提方法能够有效确定新能源高渗透系统调峰和调频对储能的需求容量。

关键词:高渗透新能源;储能系统;分位数回归分析;不确定场景集;调峰;调频;联合优化

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202304005

0 引言

在低碳背景下,新型电力系统中的新能源渗透率大幅提升,增加了电力系统的不确定性,同时火电机组的逐步退役导致灵活性资源不足,使得系统的调峰、调频压力剧增^[1]。储能作为优质的灵活性资源,其参与系统调峰、调频可有效提升系统应对不确定性的能力^[2]。目前,在相关政策的支持下,储能在新能源场站级已得到了广泛的应用,主要侧重于平抑场站出力波动、提升新能源可调度能力、配合新能源场站参与调峰和调频等场景^[3-4],储能的服务对象为场站,对于其参与系统调峰、调频、备用等方面的考虑较少,不易充分发挥储能的作用,而系统级储能的配置能弥补上述不足且具有较好的经济性^[5-6]。因此,面对新能源高渗透系统调峰、调频压力逐渐严峻及场站储能经济性较低的窘境,从系统级视角评估储能需求容量,为系统级储能配置提供依据具有重要的理论意义和应用价值。

电力系统的调峰、调频能力由灵活性资源予以支撑,而灵活性资源的容量需求取决于电源、负荷功率的不确定性。已有较多关于电源、负荷功率不确定性的研究:文献[7]基于高斯随机分布概率模型分别对风、光、负荷预测误差的不确定性进行了描述;文献[8]采用正态分布模型描述负荷的不确定性,采用Beta分布模型描述光伏系统的随机性。上述研究

基于参数概率预测模型对不确定性进行刻画,但误差较大且适用性较差。对此,文献[9]提出了一种基于主成分分析与核密度估计的风电概率分布模糊集构建方法,对风电出力的不确定性进行了有效表征;文献[10]提出了一种耦合分位数回归分析(quantile regression analysis, QRA)、降维聚类技术的新能源组合出力场景集成方法,用于刻画新能源出力的不确定性。上述非参数概率预测模型在不确定性刻画方面具有较好的适用性,但均需对数据进行降维处理,增加了计算流程且不能确保数据的完整性。

目前利用储能提升系统调节能力的研究已成为热点^[2,11-13]:文献[2]和文献[12]分别对储能参与系统调峰、调频的潜力进行了评估;文献[13]考虑电网的频率支撑需求,提出了一种储能配置方法。利用储能单独参与系统调峰或调频并不能最大化储能收益^[14],但关于储能同时参与调峰、调频的研究较少。文献[14]考虑储能退化、负荷及调节需求不确定性等因素,发现同时利用储能进行调峰和调频的收益大于储能单独调峰与单独调频的收益之和。文献[15]提出了储能同时参与调峰与调频市场的运营策略,实现了储能配置与运营效益的综合最优。储能参与系统调峰、调频的效果与其容量密不可分,目前对系统级储能容量需求的研究较少。文献[16-17]研究了新能源渗透率提高与储能容量需求之间的关系,其中:文献[16]发现储能容量需求随着可再生能源渗透率的增加而增加,但储能容量增加过程中会出现拐点;文献[17]表明335 TW·h电力需求的英国电网需要43.2 TW·h的储能容量才能实现100%可再生能源渗透。上述研究未从具体应用场景(如调

收稿日期:2022-08-10;修回日期:2023-01-17

在线出版日期:2023-05-29

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项(2022B01016)

Project supported by the Key R&D Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2022B01016)

峰、调频)角度考虑,不利于未来对特性各异的储能类型的选择。另外,若100%满足储能容量需求,则易造成储能容量冗余大,影响储能经济性。文献[18]提出了一种基于数据驱动的储能容量需求分析方法,但仅考虑了储能参与系统调峰。

本文面向新能源高渗透系统的调峰、调频,研究了系统级储能容量需求分析方法。首先,基于QRA、高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)的场景集生成方法对净负荷不确定性进行精确刻画;其次,基于刻画结果建立包含储能的系统优化运行模型,以获得最优运行时储能的调峰、调频功率;然后,构建储能运行功率修正模型,实现修正后的储能运行功率能同时兼顾储能利用率、系统运行成本,以此为基础确定储能需求容量;最后,分析储能容量与新能源渗透率、满足需求置信度水平三者间的关系。

1 新能源高渗透系统净负荷不确定性刻画

系统不确定性增加了调峰、调频的难度,储能能有效应对系统的不确定性,提升系统的调峰、调频能力,因此面向系统调峰、调频的储能容量需求分析应基于系统不确定性。因此,本文采用净负荷(系统实际负荷与新能源总出力之差)典型场景集的形式表征系统不确定性,为分析储能需求容量提供依据。

1.1 基于QRA的净负荷样本处理

净负荷的不确定性体现于预测功率与实际功率之间误差的不确定性,具有数据量大、信息量多的特征。QRA可充分挖掘大量数据的有用信息,全面描述响应变量的全局特征,易于根据净负荷预测功率描述净负荷实际功率的多种发生情况。因此,本文采用QRA对净负荷样本进行处理。

设随机变量 $y \leq y_\tau$ 的概率为 τ ,则将 y_τ 定义为 y 的 τ 分位数,即:

$$y_\tau = \{y | F(y) \leq \tau\} \quad (1)$$

式中: $F(y)$ 为随机变量 y 的概率分布函数。

设新能源高渗透系统的净负荷实际功率矩阵、预测功率矩阵分别为 $\mathbf{P}_r, \mathbf{P}_f, p_r(i, j), p_f(i, j)$ 分别为 $\mathbf{P}_r, \mathbf{P}_f$ 的第 i 行第 j 列元素,分别表示第 i 日净负荷实际功率、预测功率的第 j 个采样点。设 τ 分位数下,分位数回归拟合实际功率、预测功率的线性映射关系为:

$$p_{r,\tau}(i, j) = a_\tau p_f(i, j) + b_\tau \quad (2)$$

式中: a_τ, b_τ 为在 τ 分位数净负荷实际功率 $p_{r,\tau}(i, j)$ 下线性拟合曲线的参数值。

对于 a_τ, b_τ 的估计,可通过求解式(3)获取。

$$\min Q(\tau) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_\tau(p_r(i, j) - p_{r,\tau}(i, j)) \quad (3)$$

$$f_\tau(x) = \begin{cases} \tau x & x \geq 0 \\ (\tau - 1)x & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q(\tau)$ 为 τ 分位目标函数; $f_\tau(x)$ 为检验函数; I, J 分别为净负荷样本总场景数、日采样点数。

不同的 τ 值可获得不同的 a_τ, b_τ ,对于同一净负荷预测功率 p_f ,可得到1组净负荷实际功率分位点 $\{p_{r,\tau_1}, p_{r,\tau_2}, \dots, p_{r,\tau_o}\}$,其中 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_o$ 为不同的分位数。

1.2 基于GMM的净负荷场景聚类

日净负荷序列为高维数据,其场景集多,计算复杂。本文采用对高维数据描述能力强、聚类精度高、鲁棒性较好的GMM进行场景聚类^[19],旨在减小计算复杂度的同时保证数据信息的完整性。

将净负荷数据分成 k 个类别(即GMM的 k 个成份),每个净负荷数据的概率可表示为数据属于 k 个高斯分布成份的概率的线性叠加,即:

$$p(x) = \sum_{i=1}^k \omega_i p(x | \mu_i, \Sigma_i) \quad (5)$$

式中: $p(x)$ 为每个净负荷数据的概率; ω_i 为第 i 个高斯分布成份的权重系数; $p(x | \mu_i, \Sigma_i)$ 为均值为 μ_i 、协方差为 Σ_i 的高斯分布的概率密度函数。

GMM通常采用最大期望进行参数估计,当净负荷数据量非常大时,为了避免因数据概率值小而导致的对数据精度要求较高的情况发生,通常对数据概率进行对数处理。因此,目标函数可表示为:

$$\max \sum \lg p(x) = \sum \lg \left(\sum_{i=1}^k \omega_i p(x | \mu_i, \Sigma_i) \right) \quad (6)$$

1.3 系统净负荷典型场景集生成

净负荷典型场景集能够较好地刻画净负荷的不确定性,本文采用的净负荷典型场景集生成流程图见附录A图A1,具体步骤如下:

1)根据QRA确定非参数概率预测模型,通过插值计算获取历史净负荷实际功率 $p_r(i, j)$ 对应的分位数 $\{\tau_{i,j} | i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J\}$;

2)令 $\mathbf{T}_{i,j} = [\tau_{i,j}]$,采用probit函数将服从均匀分布的 $\mathbf{T}_{i,j}$ 转换为 I 个服从 J 维高斯分布的 $N_j(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ ($\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}$ 为多元高斯分布的参数),其极大似然估计为样本均值向量 $\bar{\mathbf{x}}$ 和样本协方差阵 $\mathbf{S}$;

3)基于GMM聚类方法将 I 个净负荷场景缩减为 k 个典型净负荷场景,并获取其分布概率 $\boldsymbol{\rho}_{k, \text{typ}}$;

4)利用probit逆函数将 k 个服从 J 维高斯分布的向量转换为 k 个服从均匀分布的向量 $\mathbf{T}_j = [\tau_{s,1} \ \tau_{s,2} \ \dots \ \tau_{s,J}]^T$,其中 $\tau_{s,j} (j=1, 2, \dots, J)$ 为典型净负荷场景 s 第 j 个采样点的分位数, $s=1, 2, \dots, k$;

5)利用非参数模型获取已知净负荷预测功率的分位数矩阵 $\mathbf{P}_{r,\tau}$,然后根据 $\mathbf{P}_{r,\tau}$ 对所得 k 个分位数向量 $\mathbf{T}_j$ 组成的矩阵进行线性插值,获得对应净负荷预测功率序列的 k 个净负荷典型场景集 $\mathbf{P}_{k, \text{typ}}$,如式(7)所示。

$$P_{k, \text{typ}} = \begin{bmatrix} [p_{r,1,1} & p_{r,1,2} & \cdots & p_{r,1,J}]^T \\ [p_{r,2,1} & p_{r,2,2} & \cdots & p_{r,2,J}]^T \\ \vdots \\ [p_{r,k,1} & p_{r,k,2} & \cdots & p_{r,k,J}]^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\rho_{k, \text{typ}} = [\rho_1 \ \rho_2 \ \cdots \ \rho_k]^T \quad (8)$$

式中: $[p_{r,i,1} \ p_{r,i,2} \ \cdots \ p_{r,i,J}]^T$ 、 ρ_i ($i=1, 2, \dots, k$) 分别为第 i 个净负荷场景的净负荷功率向量、分布概率。

2 面向新能源高渗透系统调峰和调频的常规机组与储能联合优化运行模型

2.1 系统调峰、调频需求功率计算

设系统运行时尽可能地满足负荷需求和新能源消纳, 常规机组按净负荷预测功率制定初始出力计划, 净负荷的不确定性主要由常规机组和储能联合予以应对。在构建应对净负荷不确定性的常规机组与储能联合优化运行模型前, 应首先基于第1章获得的系统净负荷典型场景集, 计算系统净负荷的不确定功率。本文以 15 min 和 5 min 分别为调峰功率调整和调频功率调整的时间尺度(为了简化计算, 调频功率按调频备用功率计算), 其中在调峰功率调整周期内会同时进行调频功率调整(即每个 15 min 调峰功率调整周期内有 3 个 5 min 调频功率调整周期)。调峰、调频需求功率分别按相应的时间尺度分解系统净负荷不确定功率, 计算公式分别为:

$$p_{s,t}^u = p_{s,t} - p_t^{\text{nl},f} \quad (9)$$

$$p_{s,t,w}^u = p_{s,t,w} - p_{s,t} \quad (10)$$

式中: $p_{s,t}$ 、 $p_{s,t}^u$ 分别为调峰功率调整时间尺度下场景 s 中 t 时段的系统净负荷及其不确定功率; $p_{s,t,w}$ 、 $p_{s,t,w}^u$ 分别为调频备用功率调整时间尺度下场景 s 中 t 时段内第 w 个调频备用调整阶段的系统净负荷及其不确定功率; $p_t^{\text{nl},f}$ 为调峰功率调整时间尺度下 t 时段的净负荷预测功率。

2.2 常规机组与储能联合优化运行模型

储能的快速响应特性使其既能参与系统调峰, 又能参与系统调频^[14]。本节假设储能容量“足够大”, 在保证功率实时平衡的基础上, 以整体运行成本最小为目标, 建立无储能功率和容量约束的常规机组与储能联合优化运行模型, 以实现系统级储能参与系统调峰、调频。

2.2.1 目标函数

本文所提常规机组与储能联合优化运行模型以总运行成本 F 最小为目标, 目标函数为:

$$\min F = \sum_{s \in \Omega} \rho_s \left\{ \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in N_G} (f_{s,i,t}^{\text{G,op}} + f_{s,i,t}^{\text{G,pr}} + f_{s,i,t}^{\text{G,ss}} + f_{s,i,t}^{\text{G,re}}) + f_{s,t}^{\text{E,pr}} + f_{s,t}^{\text{E,re}} \right] \right\} \quad (11)$$

$$\begin{cases} f_{s,i,t}^{\text{G,op}} = a_i (p_{s,i,t}^{\text{G}})^2 + b_i p_{s,i,t}^{\text{G}} + c_i x_{s,i,t}^{\text{G}} \\ f_{s,i,t}^{\text{G,pr}} = u_{s,i,t}^{\text{G1}} d_{1,i} (p_{1,i}^{\text{G}} - p_{s,i,t}^{\text{G}}) + u_{s,i,t}^{\text{G2}} d_{2,i} (p_{2,i}^{\text{G}} - p_{s,i,t}^{\text{G}}) \\ f_{s,i,t}^{\text{G,ss}} = C_{s,i,t}^{\text{G,start}} + C_{s,i,t}^{\text{G,stop}}, \quad f_{s,t}^{\text{E,pr}} = z_{\text{up}} p_{\text{pr},s,t}^{\text{E,up}} + z_{\text{down}} p_{\text{pr},s,t}^{\text{E,down}} \\ f_{s,i,t}^{\text{G,re}} = \sum_{w \in A_i} (e_{\text{up},i}^{\text{G}} r_{s,i,t,w}^{\text{G,up}} + e_{\text{down},i}^{\text{G}} r_{s,i,t,w}^{\text{G,down}}) \\ f_{s,t}^{\text{E,re}} = \sum_{w \in A_i} (k_{\text{up}}^{\text{E}} r_{\text{re},s,t,w}^{\text{E,up}} + k_{\text{down}}^{\text{E}} r_{\text{re},s,t,w}^{\text{E,down}}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: Ω 为不确定出力场景集合; T 为以 1 个调度计划周期为步长的整个运行时间序列集合; N_G 为常规机组集合; ρ_s 为场景 s 发生的概率; $f_{s,i,t}^{\text{G,op}}$ 、 $f_{s,i,t}^{\text{G,pr}}$ 、 $f_{s,i,t}^{\text{G,ss}}$ 、 $f_{s,i,t}^{\text{G,re}}$ 分别为场景 s 中 t 时段常规机组 i 的运行、调峰、启停、备用成本函数; $f_{s,t}^{\text{E,pr}}$ 、 $f_{s,t}^{\text{E,re}}$ 分别为场景 s 中 t 时段储能的调峰、调频备用成本函数; a_i 、 b_i 、 c_i 为常规机组 i 的发电成本系数; $p_{s,i,t}^{\text{G}}$ 为场景 s 中 t 时段常规机组 i 的有功出力; $x_{s,i,t}^{\text{G}}$ 为场景 s 中 t 时段常规机组 i 的启停状态变量, 机组启动时值为 1, 停机时值为 0; $d_{1,i}$ 、 $d_{2,i}$ 为不同调峰深度下常规机组 i 的成本系数; $p_{1,i}^{\text{G}}$ 、 $p_{2,i}^{\text{G}}$ 为调峰深度界限; $u_{s,i,t}^{\text{G1}}$ 、 $u_{s,i,t}^{\text{G2}}$ 为调峰深度表征值, 当 $p_{s,i,t}^{\text{G}} \in (p_{2,i}^{\text{G}}, p_{1,i}^{\text{G}}]$ 时, $u_{s,i,t}^{\text{G1}} = 1$ 、 $u_{s,i,t}^{\text{G2}} = 0$, 当 $p_{s,i,t}^{\text{G}} \in (0, p_{2,i}^{\text{G}}]$ 时, $u_{s,i,t}^{\text{G1}} = 0$ 、 $u_{s,i,t}^{\text{G2}} = 1$; $C_{s,i,t}^{\text{G,start}}$ 、 $C_{s,i,t}^{\text{G,stop}}$ 分别为场景 s 中 t 时段常规机组 i 的启动、停机成本; A_i 为调峰 t 时段内的调频备用调整时间序列集合; $r_{s,i,t,w}^{\text{G,up}}$ 、 $r_{s,i,t,w}^{\text{G,down}}$ 分别为场景 s 中 t 时段内第 w 个调频备用调整阶段常规机组 i 的上、下调频备用容量; $e_{\text{up},i}^{\text{G}}$ 、 $e_{\text{down},i}^{\text{G}}$ 分别为常规机组 i 的上、下调频备用成本系数; $p_{\text{pr},s,t}^{\text{E,up}}$ 、 $p_{\text{pr},s,t}^{\text{E,down}}$ 分别为场景 s 中 t 时段储能上、下调峰功率; z_{up} 、 z_{down} 分别为储能上、下调峰成本系数; $r_{\text{re},s,t,w}^{\text{E,up}}$ 、 $r_{\text{re},s,t,w}^{\text{E,down}}$ 分别为场景 s 中 t 时段内第 w 个调频备用调整阶段储能上、下调频备用功率; k_{up}^{E} 、 $k_{\text{down}}^{\text{E}}$ 分别为储能上、下调频备用成本系数。

2.2.2 约束条件

联合优化运行模型的约束条件包括功率平衡约束、常规机组功率上下限约束、常规机组功率变化约束、常规机组备用约束、常规机组启停机成本约束、储能备用约束, 具体表达式分别见附录 A 式 (A1)~(A6)。

3 基于储能运行功率修正的储能需求容量确定方法

通过联合优化模型能够得到系统最小运行成本下的储能运行功率。然而, 不考虑储能容量约束极易造成储能充放电不平衡, 基于此确定的储能容量将存在较大的冗余, 会导致储能利用率较低及投资成本过高。为了避免上述情况的发生, 本文提出储能电量偏离程度 (energy storage electricity deviation, ESED) 指标和运行成本增长率 (operating cost growth rate, OCGR) 指标, 分别用于反映储能利用率和系统运行成本的增长率; 然后, 以 ESED 和 OCGR

最小为目标构建储能运行功率修正模型;最后,基于修正后的储能运行功率确定储能需求功率和容量。

3.1 ESED和OCGR指标的构建

3.1.1 ESED指标

储能虽具备较快的功率爬坡速率,但其存储容量有限,为了合理地确定储能容量并充分发挥储能的充放电能力,需使所配置的储能容量能够保证在整个考核周期内充电和放电电量尽可能接近。为了描述充放电平衡程度,定义ESED指标 γ 为:

$$\gamma = \begin{cases} 1 - E_d/E_c & E_c \geq E_d \\ 1 - E_c/E_d & E_c < E_d \end{cases} \quad (13)$$

$$E_c = \sum_{t=1}^N f_c(p_t^E) \Delta t, \quad E_d = \sum_{t=1}^N f_d(p_t^E) \Delta t \quad (14)$$

$$f_c(x) = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$f_d(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ |x| & x < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: p_t^E 为 t 时段储能的充放电功率; Δt 为时间步长,取值为一个调峰周期时长; N 为数据总长度; E_c 、 E_d 分别为考核周期内储能的累计充、放电电量; $f_c(\cdot)$ 、 $f_d(\cdot)$ 分别为储能的充、放电检验函数。

分析式(13)可知, γ 的取值范围为0~1。 $\gamma=0$ 表明在整个考核周期内储能充电电量与放电电量相等,此时储能充放电不偏离; $\gamma \neq 0$ 表明储能充电电量与放电电量不相等,此时 γ 值越大,储能充放电偏离程度越大,充、放电电量越不均衡。ESED指标体现了储能充、放电电量的均衡程度,充、放电电量严重不均衡将造成储能利用率较低且配置容量偏高。

3.1.2 OCGR指标

储能运行功率的调整会引起常规机组与储能系统联合运行成本发生变化。为了量化储能运行功率的变化对联合运行成本的影响,定义OCGR指标 σ 为:

$$\sigma = (f_{\text{cost}}(p_E) - F) / F \quad (17)$$

式中: $f_{\text{cost}}(p_E)$ 为系统成本计算函数, p_E 为储能运行功率向量。 σ 一般大于0。 σ 值越大,表明储能运行功率调整后的联合运行成本增长越多; σ 值越小,表明联合运行成本越接近最优时的最小运行成本。因此,应尽可能使 σ 的取值接近0。

3.2 储能需求容量的确定方法

3.2.1 储能运行功率修正模型

在调峰过程中,储能会连续充入或放出大量的电能。此时,ESED对确定储能需求容量的影响较为明显。因此,本文主要以ESED和OCGR最小为目标建立储能调峰功率修正模型,并采用线性加权法处理模型中的2个目标,如式(18)和式(19)所示。

$$\min \left\{ \alpha_1 \sum_{s \in \Omega} \rho_s \gamma_{\text{pr},s}^{\text{EC}} + \alpha_2 \sigma_{\text{pr}}^{\text{EC}} \right\} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \underline{\varepsilon}_{s,t} \leq p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} \leq \bar{\varepsilon}_{s,t} \\ \sum_{i \in N_G} (p_{s,i,t}^{\text{GC}} - p_{s,i,t}^{\text{G,f}}) + p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} = p_{s,t}^{\text{u}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: α_1 、 α_2 为2个目标的权重值; $\gamma_{\text{pr},s}^{\text{EC}}$ 、 $\sigma_{\text{pr}}^{\text{EC}}$ 分别为当储能调峰功率为 $p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}}$ 时的ESED、OCGR指标值; $p_{s,i,t}^{\text{GC}}$ 为储能调峰功率修正后场景 s 中调峰 t 时段内常规机组 i 的出力; $p_{s,i,t}^{\text{G,f}}$ 为场景 s 中调峰 t 时段内常规机组 i 制定的初始计划出力; $\bar{\varepsilon}_{s,t}$ 、 $\underline{\varepsilon}_{s,t}$ 分别为场景 s 中调峰 t 时段内调峰功率的最大值、最小值。储能调峰功率 $p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}}$ 的计算式如下:

$$p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} = p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC,up}} - p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC,down}} \quad (20)$$

式中: $p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC,up}}$ 、 $p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC,down}}$ 分别为场景 s 中调峰 t 时段内储能的向上、向下调峰功率,其值均非负。

假设在第2章优化运行结果中储能参与调峰的功率、最大充电功率、最大放电功率、放电电量和充电电量分别为 $p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}}$ (该值可根据式(20)计算得到)、 $p_{\text{max},s}^{\text{E,up}}$ 、 $p_{\text{max},s}^{\text{E,down}}$ 、 $W_s^{\text{E,up}}$ 、 $W_s^{\text{E,down}}$,在确定储能调峰功率修正值时,考虑求解速度和求解难度,尽可能地缩小其取值范围。本文根据如下方法确定 $\bar{\varepsilon}_{s,t}$ 、 $\underline{\varepsilon}_{s,t}$ 的取值。

1)当 $W_s^{\text{E,up}} > W_s^{\text{E,down}}$ 时,放电功率不宜增加,充电功率不宜减小,但是放电功率可以减小,充电功率可以增加,此时 $\bar{\varepsilon}_{s,t}$ 、 $\underline{\varepsilon}_{s,t}$ 的取值为:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_{s,t} = p_{\text{max},s}^{\text{E,up}}, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = 0 & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} > 0 \\ \bar{\varepsilon}_{s,t} = 0, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = 0 & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} = 0 \\ \bar{\varepsilon}_{s,t} = p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}}, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = -\max \{ p_{\text{max},s}^{\text{E,up}}, p_{\text{max},s}^{\text{E,down}} \} & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

2)当 $W_s^{\text{E,up}} < W_s^{\text{E,down}}$ 时,放电功率不宜减小,充电功率不宜增加,但是放电功率可以增加,充电功率可以减小,此时 $\bar{\varepsilon}_{s,t}$ 、 $\underline{\varepsilon}_{s,t}$ 的取值为:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_{s,t} = \max \{ p_{\text{max},s}^{\text{E,up}}, p_{\text{max},s}^{\text{E,down}} \}, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} > 0 \\ \bar{\varepsilon}_{s,t} = 0, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = 0 & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} = 0 \\ \bar{\varepsilon}_{s,t} = 0, \quad \underline{\varepsilon}_{s,t} = -p_{\text{max},s}^{\text{E,down}} & p_{\text{pr},s,t}^{\text{E}} < 0 \end{cases} \quad (22)$$

3)当 $W_s^{\text{E,up}} = W_s^{\text{E,down}}$ 时,该场景无需调节储能功率,此时 $\bar{\varepsilon}_{s,t} = \underline{\varepsilon}_{s,t} = 0$ 。

3.2.2 储能需求功率和容量

在整个典型场景运行时间内,可根据典型场景运行期间储能调峰功率的最大值确定面向调峰需求的储能额定功率,且应根据整个运行期间储能累计充电或放电的最大值确定面向调峰需求的储能额定容量。按照持续充电、持续放电时间进行划分并构成新的时间集合 $\Gamma_s = \{M_l | l=1, 2, \dots, L_s\}$,其中 L_s 为场景 s 的储能持续充/放电时间集合数量, M_l 为第 l 个储能持续充/放电时间集合,则储能最大调峰需求功率 $p_{\text{pr},s,\text{max}}^{\text{E}}$ 、最大调峰需求容量 $E_{\text{pr},s,\text{max}}^{\text{E}}$ 的计算公式分别为:

$$p_{\text{pr},s,\text{max}}^{\text{E}} = \max_{t \in T} \{ p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} \} \quad (23)$$

$$\begin{cases} E_{\text{pr},s,\max}^{\text{E}} = \max_{M_l \in F_s} \{ E_{\text{pr},s,M_l}^{\text{E}} \} \\ E_{\text{pr},s,M_l}^{\text{E}} = \sum_{t \in M_l} | p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} | \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中: $E_{\text{pr},s,M_l}^{\text{E}}$ 为场景 s 中第 l 个储能持续充/放电时间集合内的累计调峰电量。

同理,在每个调频备用容量调整周期内,将储能调频最大功率作为储能调频需求额定功率,将储能调频累计最大充电或放电电量作为储能需求额定容量,则储能最大调频需求功率 $p_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}}$ 和最大调频需求容量 $E_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}}$ 的计算公式分别为:

$$p_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}} = \max_{w \in A_t} \{ | p_{\text{st},s,t,w}^{\text{E}} - p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} | \} \quad (25)$$

$$\begin{cases} E_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}} = \max_{N_l \in r_{s,t}} \{ E_{\text{pr},s,t,N_l}^{\text{E}} \} \\ E_{\text{fr},s,t,N_l}^{\text{E}} = \sum_{w \in N_l} | p_{\text{st},s,t,w}^{\text{E}} - p_{\text{pr},s,t}^{\text{EC}} | \Delta w \end{cases} \quad (26)$$

式中: $p_{\text{st},s,t,w}^{\text{E}}$ 为场景 s 中 t 时段内第 w 个调频备用调整阶段储能的充放电功率,其为正值表示放电,为负值表示充电; $r_{s,t} = \{ N_l | l=1, 2, \dots, K_s \}$ 为场景 s 中调峰 t 时段内储能调频持续充/放电时间集合, N_l 为第 l 个储能调频持续充/放电时间集合, K_s 为场景 s 中储能调频持续充/放电时间集合数量; $E_{\text{fr},s,t,N_l}^{\text{E}}$ 为场景 s 中调峰 t 时段第 l 个储能调频持续充/放电时间集合内的累计电量; Δw 为每个调频周期的时长。

基于式(25)和式(26)进一步计算得到整个典型场景运行时间内的调频需求功率 $p_{\text{fr},s,\max}^{\text{E}}$ 和调频需求容量 $E_{\text{fr},s,\max}^{\text{E}}$,如式(27)所示。

$$p_{\text{fr},s,\max}^{\text{E}} = \max_{t \in T} \{ p_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}} \}, E_{\text{fr},s,\max}^{\text{E}} = \max_{t \in T} \{ E_{\text{fr},s,t,\max}^{\text{E}} \} \quad (27)$$

综上,面向新能源高渗透系统调峰和调频的储能需求容量确定流程图如附录A图A2所示。

4 算例分析

4.1 算例数据来源及参数

风电、光伏、负荷的预测功率和实际功率数据取自某区域电网。常规电源主要为火电机组,装机容量为5720 MW(有3种类型,共8台);风电机组的总装机容量为2356 MW,光伏发电的总装机容量为2307 MW。采用QRA方法时,设置分位数 τ 的取值为0、0.05、 $\dots$ 、0.95、1,典型场景数量设置为10。此外,常规火电机组运行、调峰、备用成本参数以及储能调峰、备用成本参数分别如附录B表B1和表B2所示。在储能功率修正过程中,设置2个目标的权重值 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

4.2 净负荷典型场景集生成结果

基于4.1节所述区域电网数据,采用1.3节中的方法和计算流程生成净负荷典型场景集。各分位数的拟合曲线分布图见附录B图B1。可看出,拟合曲线由下到上对应的分位数由小变大,符合QRA方法

的拟合特征。考虑最小化系统运行模型的计算量,本文采用文献[20]的典型日选则方法,选择出能代表该区域电网运行数据的6个典型日(典型日1—6分别为第25、31、42、111、208、267日)进行分析研究。

6个典型日的10个净负荷典型场景的误差功率曲线如附录B图B2所示。可以看出,6个典型日的净负荷误差功率不超过700 MW。各典型场景的发生概率如表1所示,每个典型日下所有典型场景发生概率的总和为100%,表明生成的10个典型场景能够涵盖所有的可能性。

表1 各典型场景的发生概率

Table 1 Occurrence probability of each typical scenario

场景	发生概率 / %					
	典型日1	典型日2	典型日3	典型日4	典型日5	典型日6
1	5.55	20.92	9.29	8.22	8.77	9.59
2	23.22	3.84	9.86	5.48	3.29	8.49
3	15.62	19.45	6.03	8.67	20.82	14.25
4	11.78	3.56	24.79	4.19	4.11	6.03
5	6.30	11.23	15.62	5.21	23.29	9.59
6	2.74	13.97	6.19	4.11	1.10	12.32
7	7.40	3.56	9.59	17.26	3.01	2.47
8	18.90	11.51	6.03	7.40	14.25	26.59
9	0.82	10.14	2.19	26.04	16.82	1.64
10	7.67	1.82	10.41	13.42	4.54	9.03

为了进一步说明本文方法对净负荷功率不确定性刻画准确性,对生成的典型场景误差功率进行统计分析,并与全年净负荷实际、预测误差功率的统计结果进行对比,见附录B图B3。为了凸显本文方法的优越性,将本文所提不确定性刻画方法与目前较为常用的已有方法(基于K-means聚类、核密度降维的典型场景集生成方法)进行对比,结果见表2。

表2 典型场景集生成方法对比

Table 2 Comparison of typical scenario set generation methods

方法	高斯拟合均值	高斯拟合方差
原始功率统计	-16.14	150.02
本文方法	-22.30	136.31
已有方法	-30.22	253.79

对比图B3(a)中全年净负荷实际与预测误差功率的统计结果和图B3(b)中本文方法生成的典型场景误差功率可以发现,两者的概率分布均为正太分布且形状相似。可以看出:本文方法生成的典型场景集与原始功率统计数据的拟合参数相差很小(存在差异的主要原因是典型场景的数据量较少),表明本文方法生成的10个典型场景能够准确地刻画新能源高渗透系统的不确定性;而已有方法的拟合参数与原始功率统计数据的拟合参数之间的误差大于本文方法,表明本文方法优于已有方法。

4.3 常规机组与储能联合优化运行结果分析

基于各典型日场景误差功率和第2章的优化运

行模型,可得各典型日场景的储能运行功率,结果见附录 B 图 B4 和图 B5(功率数值为正表示储能进行上调峰/上调频,功率数值为负表示储能下调峰/下调频)。由图可看出,在部分场景中,储能的充/放电电量存在严重的不平衡,这样会导致储能容量需求过大且不利于储能的合理利用。

4.4 储能需求容量确定

在 4.3 节中已发现,虽然联合优化运行结果已经使运行成本最小,但由于模型未考虑储能容量限制,储能的充/放电电量将产生较大的不平衡,会产生较大的储能容量需求,增大储能建设成本。为了避免发生该情况,需按照 3.2.1 节对储能功率进行修正。

对储能运行功率修正前、后的 ESED 指标变化情况见附录 B 图 B6。可以看出,对储能功率修正后,各典型日场景下的 ESED 指标有不同程度的减小,表明本文方法可以有效地降低储能的充/放电不平衡程度。储能功率修正前、后各典型日的系统运行成本如表 3 所示。可以看出,修正后的成本增加量并不明显,最大增加率仅为典型日 3 的 2.02%,最小增加率为典型日 4 的 0.35%,表明本文所提储能功率修正方法可以以较小的运行成本增长率来降低储能的充/放电不平衡程度。

表 3 储能功率修正前、后的系统运行成本

Table 3 System operating cost before and after energy storage power correction

典型日	系统运行成本 / 万元		修正后的成本增加量 / 万元
	修正前	修正后	
1	1886.42	1913.85	27.43
2	2102.19	2137.53	35.34
3	2025.26	2066.19	40.93
4	1774.80	1781.02	6.22
5	1686.80	1703.45	16.65
6	1645.69	1665.90	20.21

基于修正后的储能运行功率,采用 3.2.2 节所提储能需求功率和容量确定方法,可获得参与新能源高渗透系统调峰、调频的储能需求功率和容量。对 6 个典型日按照各场景调峰需求功率大小进行场景排序,将需求功率取值小于等于排序后场景需求功率的所有场景发生概率进行累加,并将其记作满足储能调峰功率需求的置信度水平(简称为调峰功率需求置信度)。类似地,可得到储能调频功率与调频功率需求置信度之间、储能调峰容量与调峰容量需求置信度之间以及储能调频容量与调频容量需求置信度之间的对应关系。储能参与调峰、调频的功率和容量与需求置信度之间的关系曲线见图 1。

本文在构建运行模型之初假设新能源全部被消纳且负荷能被完全满足,而在实际电网运行时会发生极端天气、事故等情况,可以通过限制新能源出力或切除负荷来达到系统功率平衡稳定。另外,由图

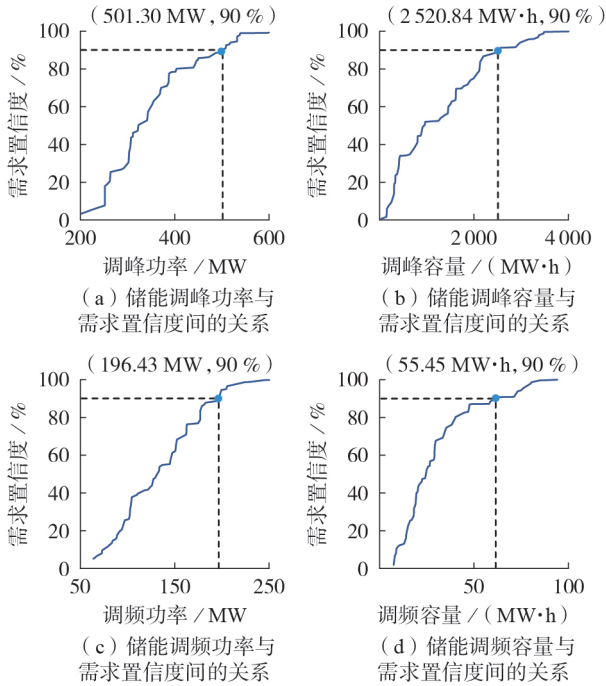


图 1 储能功率、容量与需求置信度之间的关系曲线

Fig.1 Relationship curves between energy storage power and capacity and demand confidence

1 中储能功率、容量与需求置信度之间的关系曲线也可以看出,当需求置信度较高时,置信度随储能功率或容量的增加变得缓慢,甚至趋于一种饱和状态。因此,并不是追求 100% 满足需求为最佳。为了排除上述影响因素,本文以能够使需求置信度达到 90% 的最大储能功率、容量作为系统需求,即:储能调峰需求功率和容量分别为 501.30 MW、2520.84 MW·h,储能调峰持续充/放电时长需达到 5.03 h;调频需求功率和容量分别为 196.43 MW、55.45 MW·h,储能调频持续充/放电时长需达到 16.94 min。

4.5 不同新能源渗透率下的储能需求分析

为了分析新能源渗透率对系统级储能参与调峰和调频容量需求的影响,设置新能源渗透率分别为 25%、35%、45%、55%、65%,不同新能源渗透率下的储能功率和容量需求如图 2 所示。由图可以看出:随着新能源渗透率的不断增加,参与系统调峰、调频的储能需求功率和容量均在增加;当新能源渗透率达到 65% 时,储能调峰需求功率和容量分别达到 867.61 MW 和 5954.75 MW·h,储能调频需求功率和容量分别达到 392.64 MW 和 124.12 MW·h。5 种新能源渗透率下,储能调峰持续充/放电时长需分别达到 2.73、3.58、5.06、5.69、6.86 h,储能调频持续充/放电时长需分别达到 14.93、14.50、17.47、20.40、18.97 min。可见,随着新能源渗透率的增加,储能调峰所需持续工作时间逐渐增大,但储能调频所需持续工作时间并没有明显的增长趋势。

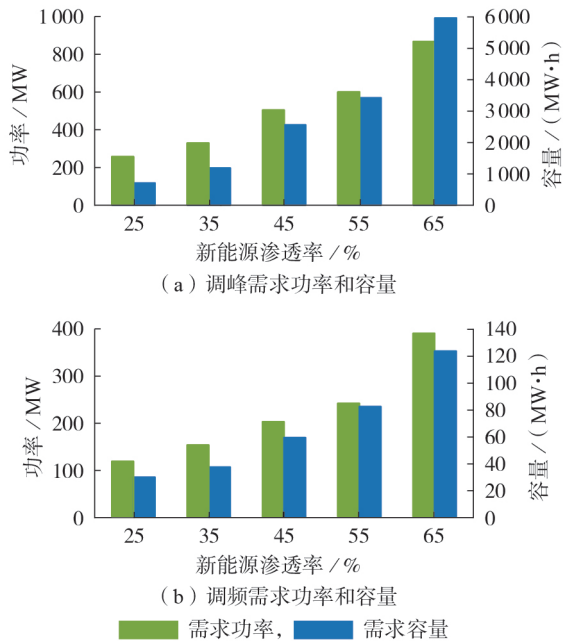


图2 不同新能源渗透率下储能调峰、调频需求功率和容量
Fig.2 Demand power and capacity of energy storage for peak regulation and frequency regulation under different penetration of renewable energy

5 结论

本文针对新能源高渗透系统调峰、调频压力剧增的问题,从系统角度考虑,提出了一种面向新能源高渗透系统调峰和调频的系统级储能需求容量确定方法,所得主要结论如下。

1)提出了刻画新能源高渗透系统净负荷不确定性的方法。算例结果表明,本文所提净负荷不确定性刻画方法所得误差功率满足的高斯分布参数为 $N(-22.30, 136.31)$,与原始功率统计数据的拟合参数 $N(-16.14, 150.02)$ 非常接近,验证了本文方法的精确性。

2)建立了常规机组与储能联合优化运行模型,提出了旨在兼顾储能利用率和运行成本的ESED、OCGR指标,并建立了基于两指标的储能功率修正模型以确定参与系统调峰、调频的储能需求容量。算例结果表明,采用本文所提储能需求容量确定方法时,满足90%需求置信度的储能调峰需求功率、容量分别为501.30 MW、2520.84 MW·h,储能调峰持续工作时间需达到5.03 h;满足90%需求置信度的储能调频需求功率、容量分别为196.43 MW、55.45 MW·h,储能调峰持续工作时间需达到16.94 min。

3)分析了新能源渗透率、储能容量和需求置信度之间的关系。算例结果表明:储能调峰、调频需求功率和容量均会随着新能源渗透率的增加而增加;随着新能源渗透率增加,储能调峰所需持续工作时间也会增加,但储能调频所需持续工作时间没有明

显的增长趋势。

本文结果可为未来新能源高渗透系统中的储能配置提供一定的理论指导,但并未对新能源消纳水平与储能容量需求之间的关系进行深入研究,后续将开展相关方面的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):3-11.
- [2] FRAZIER A W, COLE W, DENHOLM P, et al. Assessing the potential of battery storage as a peaking capacity resource in the United States[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115385.
- [3] 李军徽,岳鹏程,李翠萍,等. 提高风能利用水平的风电场群储能系统控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):162-169.
LI Junhui, YUE Pengcheng, LI Cuiping, et al. Control strategy of energy storage system in wind farm group to improve wind energy utilization level[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):162-169.
- [4] 朱瑛,秦立宽,颜全椿,等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):28-35.
ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):28-35.
- [5] 陈海生,刘畅,徐玉杰,等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术,2021,10(5):1477-1485.
CHEN Haisheng, LIU Chang, XU Yujie, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5):1477-1485.
- [6] 孙伟卿,裴亮,向威,等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):47-55.
SUN Weiqing, PEI Liang, XIANG Wei, et al. Evaluation method of system value for energy storage in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):47-55.
- [7] HUANG Hanyan, ZHOU Ming, ZHANG Lijun, et al. Joint generation and reserve scheduling of wind-solar-pumped storage power systems under multiple uncertainties[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(7): e12003.1-e12003.21.
- [8] 张博文,孙永辉,张世达. 基于SOCP的综合能源系统日前调度概率最优能量流[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):25-33.
ZHANG Bowen, SUN Yonghui, ZHANG Shida. Second-order cone programming based probabilistic optimal energy flow of day-ahead dispatch for integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):25-33.
- [9] 徐超然,徐潇源,严正,等. 考虑风电统计特性挖掘的分布鲁棒优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(2):33-42.
XU Chaoran, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Distributionally robust optimal dispatch method considering mining of wind power statistical characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2):33-42.
- [10] 张俊涛,程春田,申建建,等. 考虑风光不确定性的比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报,

- 2020,40(18):5921-5932.
- ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5932.
- [11] 张高航, 李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 159-167.
- ZHANG Gaohang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 159-167.
- [12] ZHANG Fang, HU Zechun, XIE Xu, et al. Assessment of the effectiveness of energy storage resources in the frequency regulation of a single-area power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3373-3380.
- [13] 刘洪波, 张崇, 孙同, 等. 高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的储能系统配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 36-43.
- LIU Hongbo, ZHANG Chong, SUN Tong, et al. Configuration method of energy storage system considering grid frequency support demand under high wind power penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 36-43.
- [14] SHI Yuanyuan, XU Bolun, WANG Di, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 2882-2894.
- [15] 王泽爽, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 计及循环寿命的储能优化配置与运营策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 75-81.
- WANG Zeshuang, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 75-81.
- [16] SOLOMON A A, BOGDANOV D, BREYER C. Curtailment-storage-penetration nexus in the energy transition[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1351-1368.
- [17] CÁRDENAS B, SWINFEN-STYLES L, ROUSE J, et al. Energy storage capacity vs. renewable penetration: a study for the UK[J]. Renewable Energy, 2021, 171: 849-867.
- [18] HONG Zhenpeng, WEI Zixuan, LI Jianlin, et al. A novel capacity demand analysis method of energy storage system for peak shaving based on data-driven[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102617.
- [19] ZHANG J H, YAN J, INFELD D, et al. Short-term forecasting and uncertainty analysis of wind turbine power based on long short-term memory network and Gaussian mixture model[J]. Applied Energy, 2019, 241: 229-244.
- [20] GUO L, HOU R S, LIU Y X, et al. A novel typical day selection method for the robust planning of stand-alone wind-photovoltaic-diesel-battery microgrid[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114606.

作者简介:

王 森(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为储能规划及应用(E-mail: 839368008@qq.com);

李凤婷(1965—),女,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为可再生能源并网技术等(E-mail: xjlf2009@sina.com);

张高航(1994—),男,讲师,博士,主要研究方向为可再生能源并网的电力系统优化调度(E-mail: 1027643386@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Capacity demand analysis of system-level energy storage for peak regulation and frequency regulation of power system with high penetration of renewable energy

WANG Sen, LI Fengting, ZHANG Gaohang, YIN Chunyu, LI Yuan

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The strong uncertainty of renewable energy with high penetration and the gradual reduction of the proportion of thermal power units lead to insufficient flexibility resources of the system. System-level energy storage can effectively relieve the pressure of peak regulation and frequency regulation of the system. Therefore, a demand capacity determination method of system-level energy storage for peak regulation and frequency regulation of power system with high penetration of renewable energy is proposed from the perspective of system. Based on the quantile regression analysis and Gaussian mixture model clustering, a scenario set generation method is proposed to depict the uncertainty of net load. Based on the generated scenario sets, a joint optimal operation model of conventional thermal power units and energy storage without energy storage capacity constraints is established to obtain the peak regulation power and frequency regulation power of energy storage during optimal operation. In order to take into account both the energy storage utilization rate and the system operation cost, an energy storage power correction model based on the energy storage electricity deviation index and operation cost growth rate index is constructed, the demand power and capacity of energy storage are determined, and then the relationship among the penetration rate of renewable energy, the power and capacity of energy storage and the confidence level to meet the demand is analyzed. The simulative results show that the proposed method can effectively determine the demand capacity of energy storage for peak regulation and frequency regulation of power system with high penetration of renewable energy.

Key words: high penetration of renewable energy; energy storage system; quantile regression analysis; uncertain scenario sets; peak regulation; frequency regulation; joint optimization

附录 A

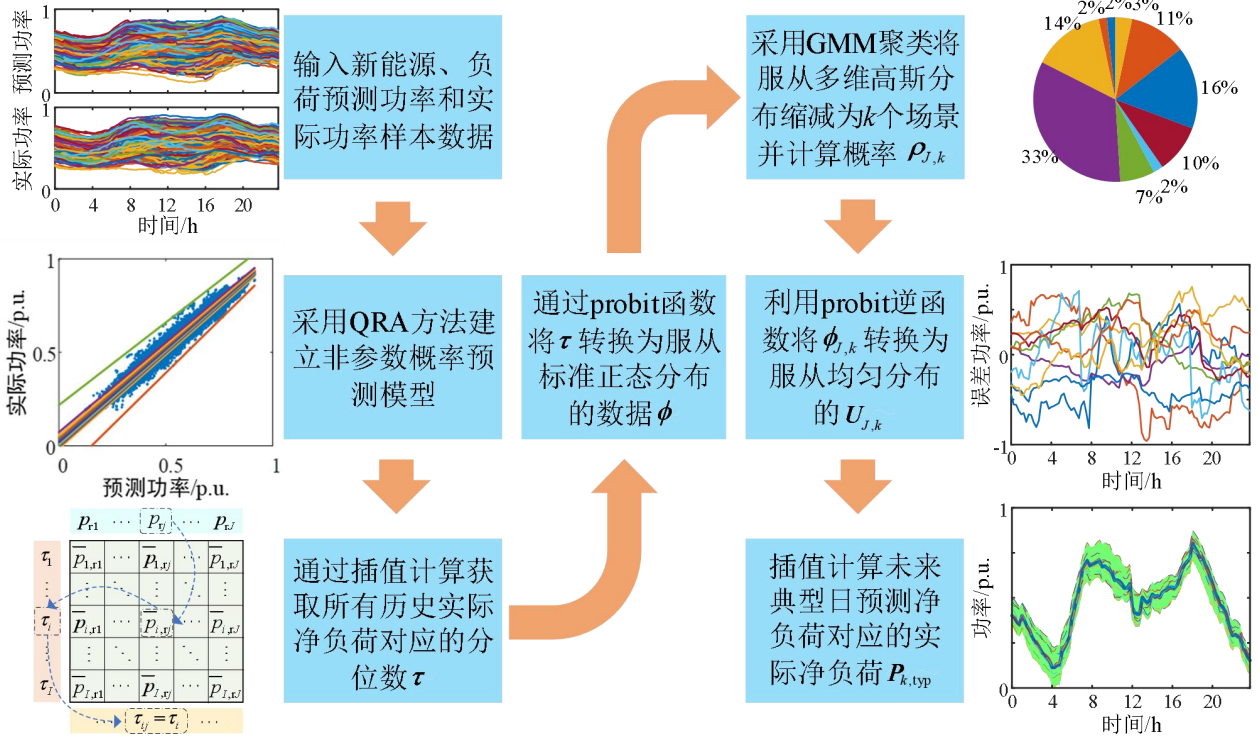


Fig.A1 Flowchart of generating system net load scenario sets

1) 功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{i \in N_G} (p_{s,i,t}^{G,f}) = p_t^{nl,f} \\ \sum_{i \in N_G} (p_{ad,s,i,t}^{G,up} - p_{ad,s,i,t}^{G,down}) + p_{pr,s,t}^{E,up} - p_{pr,s,t}^{E,down} = p_{s,t}^u \\ \sum_{i \in N_G} (p_{ad,s,i,t,w}^{G,up} - p_{ad,s,i,t,w}^{G,down}) + p_{ad,s,t,w}^{E,up} - p_{ad,s,t,w}^{E,down} = p_{s,t,w}^u \end{cases} \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in T, \forall w \in A_t \quad (A1)$$

式中： $p_{ad,s,i,t}^{G,up}$ 、 $p_{ad,s,i,t}^{G,down}$ 分别为常规机组在调峰时间尺度上的向上、向下调节功率； $p_{ad,s,i,t,w}^{G,up}$ 、 $p_{ad,s,i,t,w}^{G,down}$ 为常规机组在调频时间尺度上的向上、向下调节功率； $p_{ad,s,t,w}^{E,up}$ 、 $p_{ad,s,t,w}^{E,down}$ 为储能能在调频时间尺度上的向上、向下调节功率。

2) 常规机组功率上下限约束。

$$\begin{cases} x_{s,i,t}^G p_{i,min}^G \leq p_{s,i,t}^G \leq x_{s,i,t}^G p_{i,max}^G \\ x_{s,i,t}^G p_{i,min}^G \leq p_{s,i,t,w}^G \leq x_{s,i,t}^G p_{i,max}^G \\ p_{s,i,t}^G = p_{s,i,t}^{G,f} + p_{s,i,t}^{G,up} - p_{s,i,t}^{G,down} \\ p_{s,i,t,w}^G = p_{s,i,t}^G + p_{ad,s,i,t,w}^{G,up} - p_{ad,s,i,t,w}^{G,down} \end{cases} \quad \forall s \in \Omega, \forall i \in N_G, \forall t \in T, \forall w \in A_t \quad (A2)$$

式中： $p_{s,i,t,w}^G$ 为调频功率调整时间尺度内常规机组出力； $p_{i,max}^G$ 、 $p_{i,min}^G$ 为常规机组最大、最小出力。

3) 常规机组功率变化约束。

$$R_{i,max}^{G,down} \leq p_{s,i,t+1}^G - p_{s,i,t}^G \leq R_{i,max}^{G,up} \quad \forall s \in \Omega, \forall i \in N_G, \forall t \in T \quad (A3)$$

式中： $R_{i,max}^{G,up}$ 、 $R_{i,max}^{G,down}$ 为常规机组爬坡、下坡速率。

4) 常规机组备用约束。

$$\begin{cases} p_{ad,s,i,t,w}^{G,up} \leq r_{s,i,t,w}^{G,up} \leq x_{s,i,t}^G (p_{i,max}^G - p_{s,i,t,w}^G) \\ p_{ad,s,i,t,w}^{G,down} \leq r_{s,i,t,w}^{G,down} \leq x_{s,i,t}^G (p_{s,i,t,w}^G - p_{i,min}^G) \end{cases} \quad \forall s \in \Omega, \forall i \in N_G, \forall t \in T, \forall w \in A_t \quad (A4)$$

5) 常规机组启、停机费用约束。

$$\begin{cases} C_{s,i,t}^{G,start} \geq \beta_i^{G,start} (x_{s,i,t}^G - x_{s,i,t-1}^G) \\ C_{s,i,t}^{G,stop} \geq \beta_i^{G,stop} (x_{s,i,t-1}^G - x_{s,i,t}^G) \\ C_{s,i,t}^{G,start} \geq 0 \\ C_{s,i,t}^{G,stop} \geq 0 \end{cases} \quad \forall s \in \Omega, \forall i \in N_G, \forall t \in T \quad (A5)$$

式中： $\beta_i^{G,start}$ 、 $\beta_i^{G,stop}$ 分别为常规机组*i*的启、停机价格。

6) 储能备用约束。

$$\begin{cases} r_{re,s,t,w}^{E,up} \geq p_{ad,s,t,w}^{E,up} \\ r_{re,s,t,w}^{E,down} \geq p_{ad,s,t,w}^{E,down} \end{cases} \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in T, \forall w \in A_t \quad (A6)$$

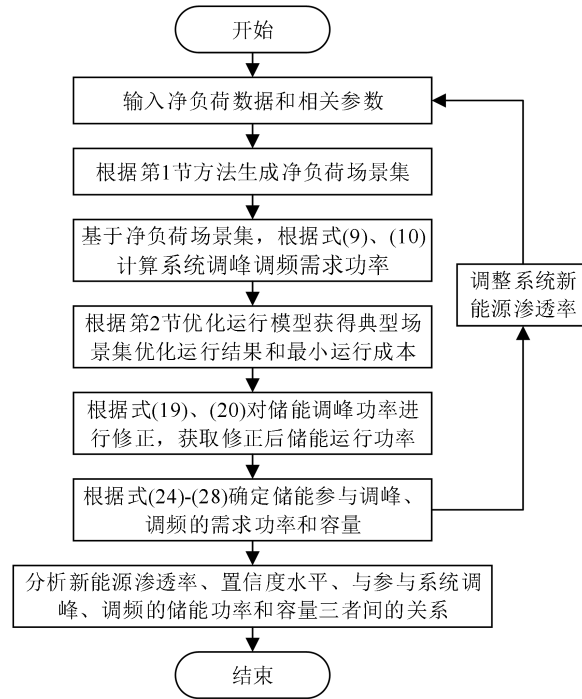


图 A2 储能需求容量确定流程图

Fig.A2 Flowchart of determining energy storage demand capacity

附录 B

表 B1 常规机组价格参数

Table B1 Conventional unit price parameters

参数	机组类型编号		
	I	II	III
$a_i / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-2})$	0.0029	0.00065	0.033
$b_i / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	87.75	52.00	115.05
$c_i / (\text{元})$	1150.50	879.78	893.49
$d_{1,i} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	38.42	38.42	38.42
$d_{2,i} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	128.18	128.18	128.18
$e_{up,i} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	8.78	26.00	11.51
$e_{down,i} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	8.78	26.00	11.51

表 B2 储能价格参数

Table B2 Energy storage price parameters

参数	$z_{up}/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	$z_{down}/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	$k_{up}/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	$k_{down}/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$
取值	48.69	48.69	9.75	9.75

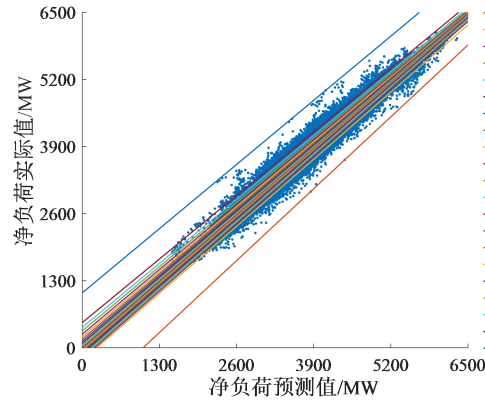


图 B1 净负荷预测值和实际值的 QRA 拟合曲线

Fig.B1 QRA fitting curves of actual and predicted power of net load

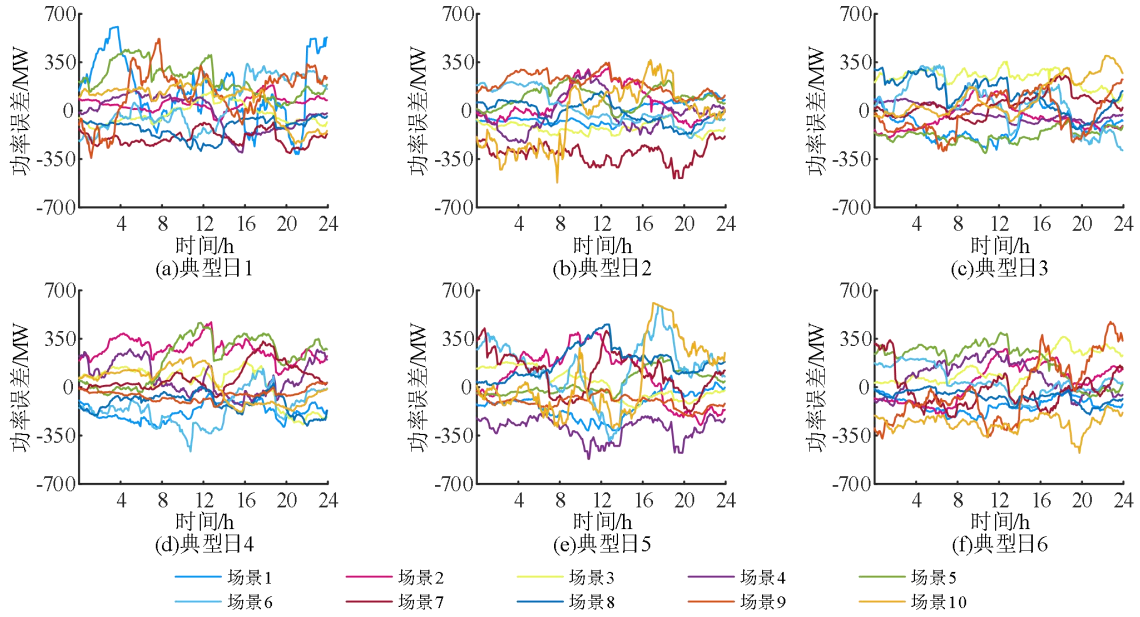


图 B2 典型日各场景误差功率曲线

Fig.B2 Error power curves for scene on four typical days

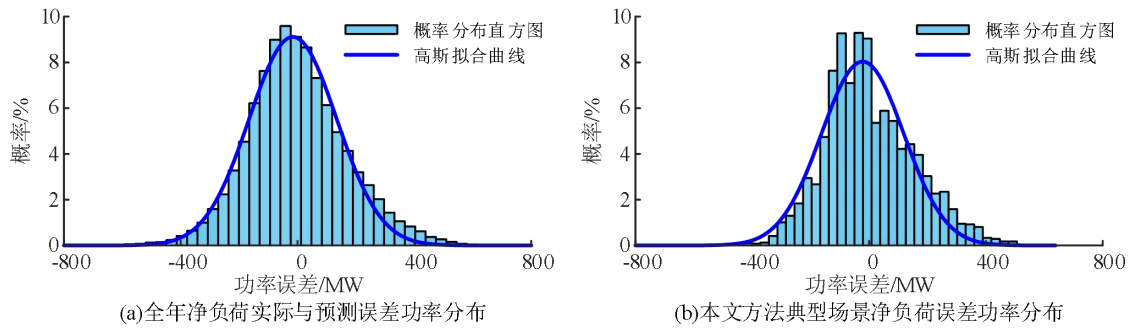


图 B3 误差功率概率分布图

Fig.B3 Error power probability distribution

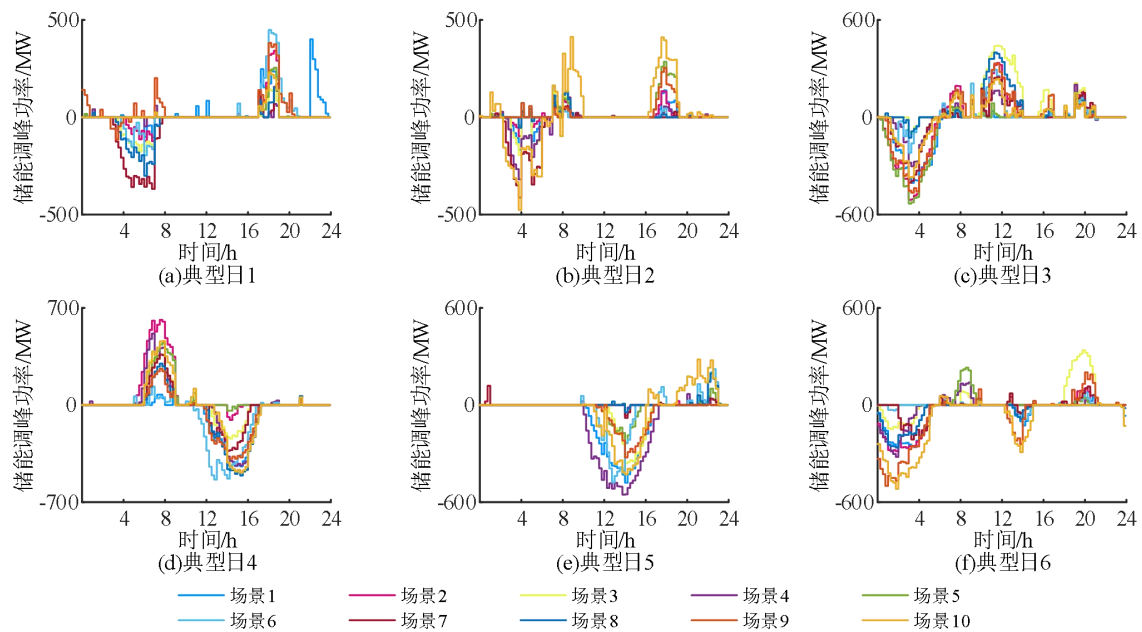


Fig.B4 Power curves for each scenario of energy storage participation in peak regulation

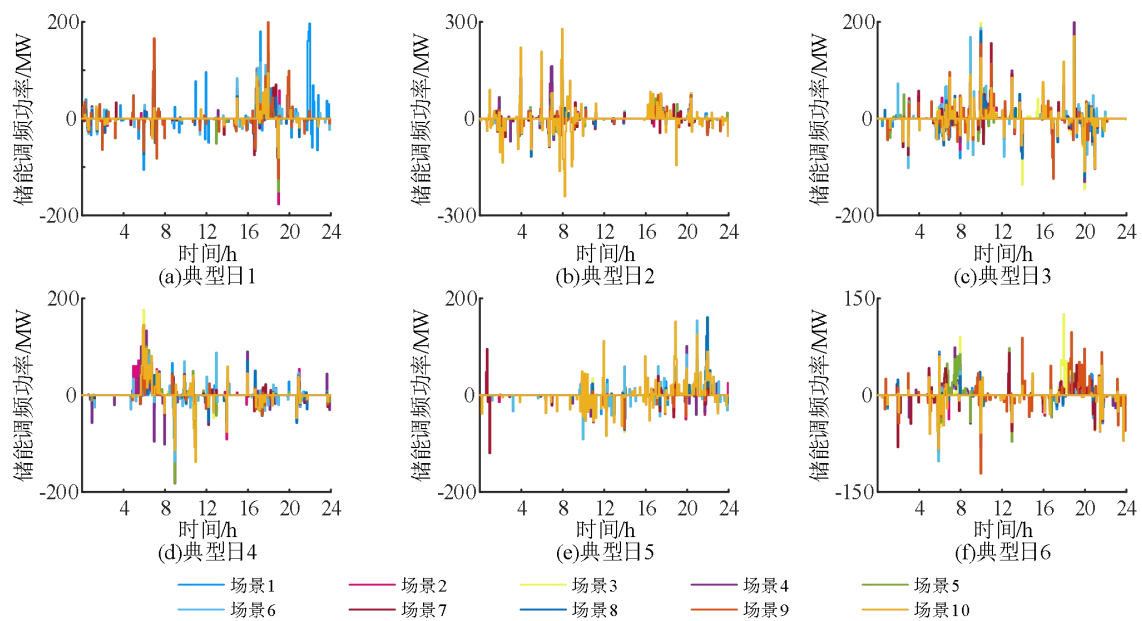


Fig.B5 Power curves for each scenario of energy storage participation in frequency regulation

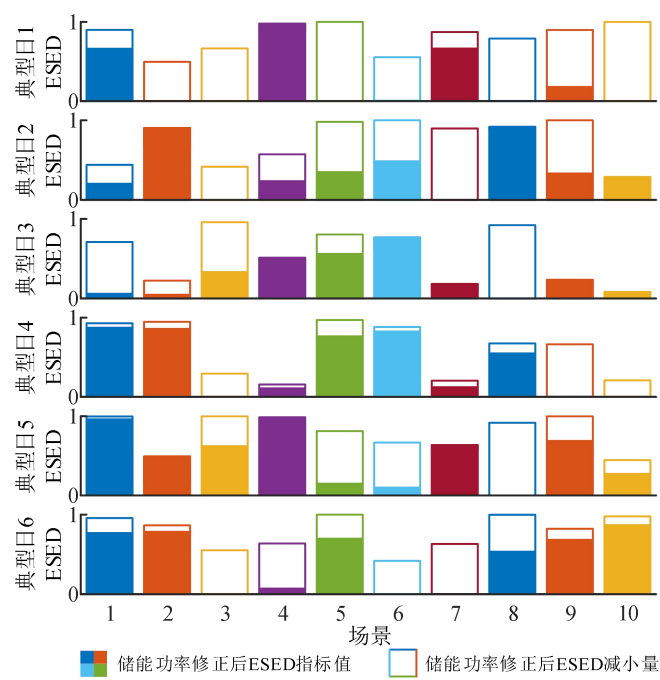


图 B6 储能功率修正前、后 ESED 变化情况

Fig.B6 Change of ESED before and after energy storage power correction