

含高比例光伏配电网中计及需求侧响应的 混合储能配置优化

马丽^{1,2}, 李伟^{3,4}, 裴玮^{1,2}, 肖浩^{1,2}, 鞠力^{3,4}, 顾靖达^{3,4}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 长时规模储能重点实验室(中国科学院), 北京 100190;
3. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 4. 北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100055)

摘要: 大力发展光伏等可再生能源是我国实现“双碳”目标的重要途径, 而光伏高比例接入配电网后随之带来一系列问题。以含高比例光伏配电网为研究对象, 提出了计及用户侧需求响应的混合储能优化配置方法。针对负荷和光伏出力的双重不确定性, 提出了基于预测误差概率分布的不确定性场景确定方法。考虑系统不确定性, 统筹运行阶段用户侧需求响应调控措施以及潮流约束, 提出了储能配置的 3 层优化模型。针对优化模型提出了相应的分解方法, 以及基于列和约束生成算法的求解实施流程。通过在 IEEE-33 节点测试系统中的应用, 使得系统可平移负荷峰值下降了 10%, 节点电压维持在合理范围, 并在指导储能配置等方面具备显著的应用效果。通过分析光伏比例灵敏度可知, 不含光伏情况下的储能总容量相比 100% 光伏比例场景增加了 90%。

关键词: 储能配置优化; 光伏; 配电网; 需求侧响应; 系统不确定性

Hybrid Energy Storage Configuration Optimization in Distribution Network with High-proportion PV Considering Demand Response

MA Li^{1,2}, LI Wei^{3,4}, PEI Wei^{1,2}, XIAO Hao^{1,2}, JU Li^{3,4}, GU Jingda^{3,4}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Long-duration and Large-scale Energy Storage(Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 4. Beijing Electric Power Economic and Technical Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Vigorously developing renewable energy such as photovoltaic is an important route to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals; however, the high proportion of photovoltaic in the distribution network may bring about a series of problems. Therefore, the distribution network with a high proportion of PV is taken as the research object, and the optimal configuration of hybrid energy storage is proposed considering the demand side response. Based on the uncertainty of load demand and photovoltaic output, a determination method for uncertain scenarios relying on error probability distribution is proposed. Based on uncertain scenarios, a three-layer optimization model for energy storage configuration was proposed considering the regulation measures of demand side response and power flow constraints in the operation stage. The decomposition method for the proposed three-layer optimization model and the solution implementation process based on column and constraint generation algorithm are proposed. The proposed model is verified in IEEE-33 bus test system. The results show that the shiftable load peak can be reduced by 10%, the nodal voltage is kept within a reasonable range, and the application effect is significant in guiding energy storage configuration. Through analyzing the sensitivity of photovoltaic proportion, the total energy storage capacity with 100% photovoltaic proportion increases by 90% compared with the scenario without photovoltaic.

Key words: energy storage configuration optimization; photovoltaic; distribution network; demand side response; system uncertainty

0 引言

我国于 2020 年 9 月在第七十五届联合国大会

上提出了“碳达峰、碳中和”目标, 在实现“双碳”目标的进程中, 大力发展光伏、风能为代表的可再生能源是极为重要的途径^[1]。2021 年 6 月国家能源局发布《关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》^[2], 整县光伏建设有利于整合资源实现集约开发, 削减电力尖峰负荷, 延缓配电

基金资助项目: 国家自然科学基金(U22B20123); 国家电网有限公司总部管理科技项目(5419-202211066A-1-1-ZN)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (U22B20123), Headquarters Management Science and Technology Project of SGCC(5419-202211066A-1-1-ZN).

网升级改造^[3], 是实现“碳达峰、碳中和”的重要措施。

而分布式光伏高比例接入配电网后(高比例接入一般指 50%以上^[4]), 由于其间歇性、随机性等特点, 增加了常规电源调节压力, 同时也在一定程度上带来了电能质量问题。而储能系统具有快速调节功率及储蓄能力, 有助于提升光伏的本地消纳能力, 同时也能够提升电网的支撑能力及电能质量^[5]。其中, 电池储能系统(battery energy storage system, BESS)由于其充放速度快、效率高、对地理条件要求低、使用寿命长等优点得到了广泛的应用^[6]。近年来, 国内外针对配电网的储能优化配置展开了较为广泛的研究, 应用场景主要包括提升经济性^[7-11]、改善电能质量^[12-13]、平滑功率波动^[14]、提高供电可靠性^[15-16]、提升韧性^[17-18]等。文献[9]基于不确定性短期最优潮流提出了长期规划模型, 并采用点估计法和禁忌搜索/粒子群混合优化算法进行求解。文献[10]构建了基于分类概率机会约束信息间隙决策理论的配电网储能鲁棒优化配置模型。文献[11]考虑配电网中点对点(peer to peer, P2P)交易, 提出了一种储能配置双层优化方法, 上层模型以储能投资成本最小为目标, 下层模型考虑集中竞价和用户主导的 P2P 交易模式。文献[13]提出时序综合电压-有功灵敏度计算方法, 从改善电压的角度研究了储能系统的优化配置。文献[17]将移动储能容量作为决策变量, 利用纳什谈判方法构建了配电网经济性和恢复力均衡模型。

目前, 对于储能在高比例分布式光伏县域配电网的优化配置技术方面, 面临着以下挑战: (1)分布式光伏系统多接入低压和中压侧, 主要为就近消纳, 具有规模小、数量多、空间分布广的特点, 普通用户所需要的储能容量较小, 无法享受到规模效应带来的成本优势^[19]; (2)分布式光伏和负荷的双重不确定性使得配电网实际运行情况难以准确预测, 光伏出力及负荷需求的不确定性常会导致储能系统优化配置难以达到预期^[10], 且很多情况下储能的利用率较低。本文主要从这些储能规划面临的挑战出发, 统筹考虑储能规划和配电网运行阶段需求侧响应的参与^[20], 提出了考虑独立投资和共享公共储能^[21]的混合储能 3 层优化规划模型及相应的求解方法。

1 储能配置优化框架

本文考虑的储能配置方式主要包括用户独立

投资储能和多用户共享公共储能^[21], 后者的配置方式如图 1 所示。本文所提的储能配置的 3 层优化总体框架如图 2 所示, 其中第 1 层为储能规划阶段, 主要目标是考虑运行状况的储能投资最小化; 第 2 层和第 3 层主要面向运行阶段, 是一个考虑光伏和负荷不确定性的运行成本鲁棒优化模型; 第 3 层针对给定的负荷出力不确定性场景, 通过优化储能充放电策略及需求侧响应策略以最小化系统的运行成本; 而第 2 层的目标则是找寻可使最优运行成本最大(最恶劣)的光伏出力/负荷不确定性场景。

2 基础数学模型

2.1 储能模型

独立投资储能用户集合表示为 $I_S = \{I_{S1}, \dots, I_{SI}\}$, 其中 I 为独立投资储能用户总数。共享储能总数为 C 个, 表示为集合 $C_S = \{C_{S1}, \dots, C_{SC}\}$ 。以第 i 个储能为例, 其规划模型为:

$$C_{S,i} = \lambda_E E_{S,i} + \lambda_P P_{S,i} \tag{1}$$

$$0 \leq E_{S,i} \leq E_{S,i}^{\max} \tag{2}$$

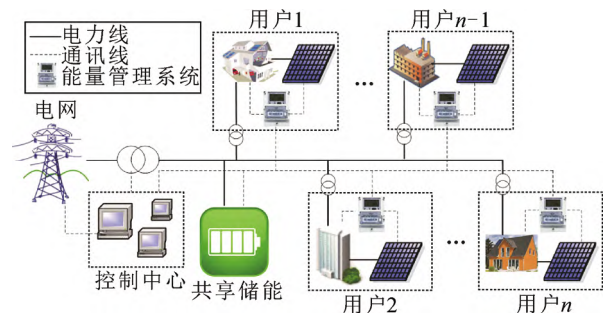


图 1 共享储能配置方式

Fig.1 Shared energy storage configuration

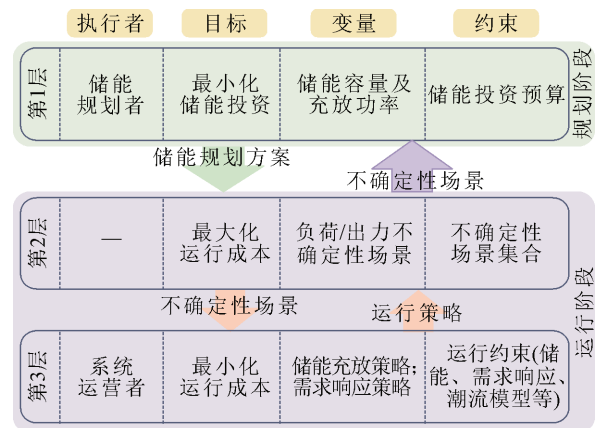


图 2 储能配置 3 层优化框架

Fig.2 Three-layer optimization framework for energy storage configuration

$$0 \leq P_{S,i}^h \leq P_{S,i}^{\max} \quad (3)$$

式中: $C_{S,i}$ 为第 i 个储能的投资成本, 包括容量成本和功率成本 2 项; λ_E 和 λ_P 分别为单位容量成本和单位功率成本; $E_{S,i}$ 和 $P_{S,i}$ 分别为第 i 个储能的容量和充放功率; $E_{S,i}^{\max}$ 、 $P_{S,i}^{\max}$ 分别为第 i 个储能的容量上限和功率上限。第 i 个储能的运行模型为:

$$E_{S,i}^{h+1} = E_{S,i}^h (1 - \mu_S) + P_{S,char,i}^h \eta_{IN} - P_{S,dis,i}^h / \eta_{OUT} \quad (4)$$

$$\eta_{\min} E_{S,i} \leq E_{S,i}^h \leq \eta_{\max} E_{S,i} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{S,char,i}^h \leq \omega_{S,i}^h P_{S,i}^h \\ 0 \leq P_{S,dis,i}^h \leq (1 - \omega_{S,i}^h) P_{S,i}^h \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_{S,i}^h$ 为第 i 个储能在时刻 h 的储电量; μ_S 为储能电量的自损率; $P_{S,char,i}^h$ 和 $P_{S,dis,i}^h$ 分别为充电功率、放电功率; η_{IN} 和 η_{OUT} 分别为充、放电过程中的效率; η_{\max} 和 η_{\min} 分别为储能荷电状态的上、下限; $\omega_{S,i}^h$ 为表示充电状态的 0-1 变量, 值为 1 时充电, 值为 0 时放电。

而对于共享储能, 除了以上约束, 还需要考虑所有共享储能参与用户对储能功率的分配, 以第 i 个共享储能为例, 其参与用户集合可表示为 $C_{Si} = \{C_{S1}, \dots, C_{S_{c_i}}\}$, c_i 为该共享储能涵盖的用户个数, 共享储能需满足:

$$\begin{cases} \sum_{j \in C_{Si}} P_{S,char,j}^h = P_{S,char,i}^h \\ \sum_{j \in C_{Si}} P_{S,dis,j}^h = P_{S,dis,i}^h \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{S,char,j}^h$ 为第 i 个共享储能参与用户集合中第 j 个用户在第 h 个时刻的充电功率; $P_{S,dis,j}^h$ 为相应的放电功率。集合中所有用户的充电/放电功率之和应该等于共享储能的充电/放电功率。

2.2 需求响应模型

需求侧响应(demand side response, DSR)是指电力用户针对电力价格信号或激励机制做出响应, 改变正常电力消费模式的市场参与行为^[22]。本文中用户负荷由 2 部分组成, 即固定负荷和可平移负荷。固定负荷(fix load, FL)对可靠性要求较高, 且供电时间不可调整。指定时间段内(表示为 $[1, H]$)第 i 个用户的固定负荷集合为:

$$l_{fi}^h = \{l_{fi}^1, \dots, l_{fi}^H\} \quad (8)$$

式中: l_{fi}^h 为第 i 个用户第 h 时刻的固定负荷值。可平移负荷(shiftable load, SL)是指用户可根据电价信息调整用电时间, 保证在一定的时间范围内满足对负荷的持续供应即可, 如电动汽车充电负荷、清洗

负荷等。针对第 i 个用户, 指定时间段内的可平移负荷集合为:

$$l_{si}^h = \{l_{si}^1, \dots, l_{si}^H\} \quad (9)$$

式中: l_{si}^h 为第 i 个用户第 h 时刻的可平移负荷值。假设第 i 个用户包括的可平移负荷用电设备数量为 K_i (即用户 i 拥有 K_i 个负荷可控的用电设备, 简称可控用电设备), 第 h 个时段内用户 i 可平移负荷值为所有可控用电设备的可平移负荷值的和, 即:

$$l_{si}^h = \sum_{k=1}^{K_i} l_{sik}^h \quad (10)$$

式中: l_{sik}^h 为 h 时刻用户 i 第 k 个可控用电设备的可平移负荷幅值(即第 k 个可控用电设备的功率需求), 其约束条件为:

$$l_{sik}^h = l_{sik}^{h-t_{ik}+1} \quad (11)$$

$$h \in [t_{ik}, t_{ik} + \Delta T_{ik}] \quad (12)$$

$$[t_{ik}, t_{ik} + \Delta T_{ik}] \subset [\alpha_{ik}, \beta_{ik}] \quad (13)$$

$$\sum_{h=t_{ik}}^{t_{ik} + \Delta T_{ik}} l_{sik}^h = q_{sik} \quad (14)$$

式中: $l_{sik}^{h-t_{ik}+1}$ 表示用户 i 第 k 个可平移负荷从开始工作起第 $h-t_{ik}+1$ 个时刻的功率值; t_{ik} 为可平移负荷的起始时刻; ΔT_{ik} 为可平移负荷的持续时间; $[\alpha_{ik}, \beta_{ik}]$ 为可平移负荷的可选时间区间, 持续长度 $T_{dik} = \beta_{ik} - \alpha_{ik} + 1$; q_{sik} 为可平移负荷的电量需求, 可平移负荷在各时段的功率总和应等于电量需求。若优化问题以式(11)~式(14)建模的可平移负荷作为决策变量, 则需要针对离散变量进行求解。由于离散变量的决策空间是不连续和非凸的, 用于求解连续问题的优化算法不能直接用于求解离散变量的优化问题。因此, 需要对模型进行等效, 使得每个时刻的可平移负荷 l_{si}^h 表征为:

$$\begin{cases} l_{si}^{\min} < l_{si}^h < l_{si}^{\max}, h \in [\alpha_i, \beta_i] \\ l_{si}^h = 0, h \notin [\alpha_i, \beta_i] \end{cases} \quad (15)$$

$$\sum_{h=1}^H l_{si}^h = Q_i \quad (16)$$

式中: l_{si}^h 被视作一个连续变量; $[l_{si}^{\min}, l_{si}^{\max}]$ 为 l_{si}^h 的取值范围, 可采用蒙特卡洛法获取, 详见文献^[23]; $[\alpha_i, \beta_i]$ 是可平移负荷的可选时间区间; Q_i 是可平移负荷的总需求, 是所有时刻可平移负荷之和。

根据固定负荷和可平移负荷模型, 用户 i 在 h 时刻的总负荷为:

$$P_{Di}^h = l_{fi}^h + l_{si}^h \quad (17)$$

而用户光伏一般采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制策略^[24]。

本文中第 i 个用户的光伏电源有功出力预测值为:

$$P_{PV_i}^h \triangleq [P_{PV_i}^1, \dots, P_{PV_i}^H] \quad (18)$$

综上, 第 i 个用户实际负荷需求可表达为:

$$P_{U_i}^h = P_{D_i}^h - P_{PV_i}^h + P_{S_{char,i}}^h - P_{S_{dis,i}}^h \quad (19)$$

式中: $P_{D_i}^h$ 、 $P_{PV_i}^h$ 、 $P_{S_{char,i}}^h$ 、 $P_{S_{dis,i}}^h$ 分别为第 i 个节点的用户负荷、光伏出力、储能充电功率和放电功率。

3 不确定性场景的确定方法

3.1 单随机变量的场景确定方法

一般情况下, 负荷和光伏出力的预测误差符合双曲分布特性^[25], 相应的概率密度函数可表示为:

$$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{1+\pi^2 K_\lambda(\zeta)}} e^{-\zeta \left(\sqrt{1+\pi^2} \sqrt{1+\left(\frac{x-\mu}{\delta}\right)^2} - \pi \frac{x-\mu}{\delta} \right)} \quad (20)$$

式中: π 、 ζ 、 μ 、 δ 为双曲分布函数的参数; $K_\lambda(\zeta)$ 是 λ 阶的第 3 类修正贝塞尔函数, 可表示为

$$\frac{1}{2} \int_0^\infty \zeta^{\lambda-1} e^{-\zeta \frac{(x+1/x)}{2}} dx。$$

本文采取等步长采样方法来确定单个随机变量的多场景。将概率密度最大值 $f_r(x_{r(0)})$ 对应的误差值 $x_{r(0)}$ 作为中心, 分别向坐标轴的左边和右边等步长采样 N_r 个误差点。采样得到的误差点可表示为:

$x_{r(1)}, x_{r(-1)}, x_{r(2)}, x_{r(-2)}, \dots, x_{r(N_r)}, x_{r(-N_r)}$, 它们对应的概率可表示为: $f(x_{r(1)}), f(x_{r(-1)}), \dots, f(x_{r(N_r)}), f(x_{r(-N_r)})$ 。

3.2 多随机变量的场景确定方法

基于 3.1 节中的单随机变量多场景确定方法, 可通过组合得到多随机变量的多个不确定场景。 R

个随机变量对应 $N_{\text{multi}} = \prod_{r=1}^R (2N_r + 1)$ 个不确定性场景 (N_{multi} 为不确定性场景个数), 其中第 k 个多随机

变量场景可表示为: $[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}]$, 其中 $k_r \in [0, 1, -1, \dots, N_r, -N_r]$, $r \in [1, \dots, R]$ 。根据每个随机变量的场景概率, 可以得到第 k 个多随机变量场景对应的概率为:

$$f[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}] = \prod_{r=1}^R f_r(x_{r(k_r)}) \quad (21)$$

获取所有场景的概率后, 对其进行归一化处理, 第 k 个多随机变量场景对应的最终概率为:

$$f^k[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}] = \frac{\prod_{r=1}^R f_r(x_{r(k_r)})}{\sum_{k=1}^{N_{\text{multi}}} \left(\prod_{r=1}^R f_r(x_{r(k_r)}) \right)} \quad (22)$$

3.3 基于 K-means 的场景缩减方法

由于 R 个随机变量对应 $N_{\text{multi}} = \prod_{r=1}^R (2N_r + 1)$ 个

不确定性场景, 而过多的不确定性场景将会增大计算的复杂度和计算时间。因此, 本文采取 K-Means^[25] 方法对生成的场景进行缩减, 假设最终生成 M 个不确定性场景, 则可以假设 K-Means 方法中的聚类中心有 M 个。第 m 个种类中的采样集合定义为 Ω_m , 其包含 N_m 个样本。第 m 个聚类中心对应的场景标记为 ω_m , 对应的每个随机变量的数值为:

$$x_{c_{\omega_m}} = \frac{\sum_{[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}] \in \Omega_m} [x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}]}{N_m} \quad (23)$$

ω_m 对应的概率为 Ω_m 中所有样本的概率之和:

$$\pi(\omega_m) = \sum_{[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}] \in \Omega_m} f^k[x_{1(k_1)}, x_{2(k_2)}, \dots, x_{R(k_R)}]。$$

4 储能配置优化模型

4.1 潮流约束

本文涉及的配电网潮流计算采用 Distflow 模型^[26], 具体模型为(对任意时刻均适用, 简便起见在此忽略了上标 h):

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} P_{i,j}^L = \sum_{(j,i) \in \Omega_L} (P_{j,i}^L - r_{j,i} I_{i,j}^2) - P_{U_i} \quad (24)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} Q_{i,j}^L = \sum_{(j,i) \in \Omega_L} (Q_{j,i}^L - x_{j,i} I_{i,j}^2) - Q_{U_i} \quad (25)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{i,j} P_{i,j}^L + x_{i,j} Q_{i,j}^L) + (r_{i,j}^2 + x_{i,j}^2) I_{i,j}^2 \quad (26)$$

$$U_i^2 I_{i,j}^2 = (P_{i,j}^L)^2 + (Q_{i,j}^L)^2 \quad (27)$$

$$0 \leq I_{i,j}^2 \leq \bar{I}_{i,j}^2, (i,j) \in \Omega_L \quad (28)$$

$$\underline{U}^2 \leq U_i^2 \leq \bar{U}^2, i \in \Omega_B \quad (29)$$

式中: $I_{i,j}$ 、 $P_{i,j}^L$ 、 $Q_{i,j}^L$ 分别为线路(两端节点为 i 和 j)上的电流、有功功率和无功功率; P_{U_i} 和 Q_{U_i} 分别为节点 i 处的有功功率和无功功率负荷; $r_{i,j}$ 和 $x_{i,j}$ 分别为线路上的电阻和电抗; U_i 为节点电压; $\bar{I}_{i,j}$ 为线路电流允许上限; \bar{U} 和 \underline{U} 分别为系统节点电压的上、下限; Ω_B 和 Ω_L 分别为系统节点集合和线路集合。由于以上模型含变量的平方项, 令 $U'_i = U_i^2$ 、 $I'_{i,j} = I_{i,j}^2$, 等效得到以下模型:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} P_{i,j}^L = \sum_{(j,i) \in \Omega_L} (P_{j,i}^L - r_{j,i} I'_{i,j}) - P_{U_i} \quad (30)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} Q_{i,j}^L = \sum_{(j,i) \in \Omega_L} (Q_{j,i}^L - x_{j,i} I'_{i,j}) - Q_{U_i} \quad (31)$$

$$U'_j = U'_i - 2(r_{i,j} P_{i,j}^L + x_{i,j} Q_{i,j}^L) + (r_{i,j}^2 + x_{i,j}^2) I'_{i,j} \quad (32)$$

$$U'_i I'_{i,j} = (P_{i,j}^L)^2 + (Q_{i,j}^L)^2 \quad (33)$$

$$0 \leq I'_{i,j} \leq \bar{I}_{i,j}, (i,j) \in \Omega_L \quad (34)$$

$$\underline{U}^2 \leq U'_i \leq \bar{U}^2, i \in \Omega_B \quad (35)$$

而对于含变量乘积的表达式, 采用二阶锥模型进一步松弛等效^[27], $U'_i I'_{i,j} = (P_{i,j}^L)^2 + (Q_{i,j}^L)^2$ 可等效为:

$$\begin{cases} 2P_{i,j}^L \\ 2Q_{i,j}^L \\ |U'_i - I'_{i,j}|_2 \end{cases} \leq U'_i + I'_{i,j} \quad (36)$$

除了上述潮流方程以外, 平衡节点的电压标幺值应维持为 1, 且平衡节点的注入有功功率和无功功率应该满足节点所在变电站的容量约束:

$$\begin{cases} U'_0 = 1 \\ |P_0| \leq P_{0\max} \\ |Q_0| \leq Q_{0\max} \end{cases} \quad (37)$$

式中: U'_0 为平衡节点处的电压平方项; P_0 和 Q_0 分别为平衡节点处的有功功率和无功功率注入; $P_{0\max}$ 和 $Q_{0\max}$ 分别为 P_0 和 Q_0 的最大值。

4.2 储能配置优化模型

基于第 2 章储能配置目标及相关数学模型, 计及系统不确定性以及运行中储能和需求响应的调控手段, 提出储能配置的 3 层优化模型:

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in I_s, j \in C_s} (C_{S,i} + C_{S,j}) + \max_{\varepsilon_{PV}, \varepsilon_{fl}} \left(\min_{\{P_{S,i}^h, P_{S_{dis},j}^h, P_{S_{char},j}^h\}} \left(D \sum_{i \in \Omega_B} \sum_{h \in \Omega_T} C_{0-i}^h \right) \right) \\ \text{s.t. 式(1)-(7), (15)-(19), (30)-(32), (34)-(37)} \end{cases} \quad (38)$$

式中: C_{0-i}^h 为第 i 个节点在第 h 个时刻的买电成本, 计算式见式(39); ε_{PV} 和 ε_{fl} 分别表示光伏出力和固定负荷的不确定场景集合; D 为规划周期的天数。优化模型所涉及的变量需要满足前述章节介绍的储能规划运行约束、可平移负荷约束以及潮流计算约束, 包含节点电压约束等。

$$C_{0-i}^h = p_{gb}^h \min(0, P_{U_i}^h) + p_{gs}^h \max(0, P_{U_i}^h) \quad (39)$$

式中: $P_{U_i}^h$ 为第 i 个节点在第 h 时刻注入节点的功率; p_{gb}^h 为电网的购电价; p_{gs}^h 为电网的售电价, 本文中采用分时电价。需要注意的是, 在潮流计算中, 只有实际安装储能的节点在计算 $P_{U_i}^h$ 时考虑储能的充放电量, 但在计算优化目标时参与共享储能的用户也需要计及储能充放电量; 此外, 潮流计算中平衡节点对应的 $P_{U_0}^h$ 还需减去电源功率注入 P_0 (平衡节点的无功采用类似措施)。

5 优化模型分解及求解

5.1 储能配置多层优化模型的分解

首先, 将储能配置的 3 层优化模型分解为主模型和子模型, 其中主模型表示为:

$$\begin{cases} \min \left(\sum_{i \in I_s, j \in C_s} (C_{S,i} + C_{S,j}) + \gamma \right) \\ \text{s.t. } \gamma \geq D \sum_{i \in \Omega_B} \sum_{h \in \Omega_T} (C_{0-i}^h)^k, k \in [1, \dots, K] \end{cases} \quad (40)$$

对于一系列系统不确定性场景组成的集合 $\hat{\varepsilon} = \{\hat{\varepsilon}^1, \dots, \hat{\varepsilon}^K\}$, 其中第 k 个不确定性场景为 $\hat{\varepsilon}^k = \{\varepsilon_{PV}^k, \varepsilon_{fl}^k\}$, 其对应的决策变量为 $\{E_{S,i}^k, P_{S,i}^k, sl_i^{hk}, P_{S_{dis},j}^{hk}, P_{S_{char},j}^{hk}\}$ (对于不安装储能的节点, 储能相关变量不存在), 其他潮流模型相关的变量表示为 $\{P_{i,j}^L, Q_{i,j}^L, I_{i,j}^k, U_i^k\}$, 其中 $(i,j) \in \Omega_L$ 、 $i \in \Omega_B$ 。对于第 k 个不确定性场景, 其对应的变量均满足储能规划运行约束、可平移负荷约束以及潮流计算约束等。

子模型为运行阶段的优化问题, 对于给定的储能规划方案 $\hat{s} = \{\hat{E}_{S,i}, \hat{P}_{S,i}\}$ 、 $i \in I_s \cup C_s$, 其优化模型为:

$$\max_{\varepsilon_{PV}, \varepsilon_{fl}} \left(\min_{\{sl_i^h, P_{S_{dis},j}^h, P_{S_{char},j}^h\}} \left(D \sum_{i \in \Omega_B} \sum_{h \in \Omega_T} C_{0-i}^h \right) \right) \quad (41)$$

式中: $C_{0-i}^h = \gamma_{u_{buy}}^h \min(0, P_{U_i}^h) + \gamma_{u_{sell}}^h \max(0, P_{U_i}^h)$ 。子模型同样满足储能规划运行约束、可平移负荷约束以及潮流计算约束等。

5.2 模型求解方法及流程

针对 5.1 节提出的分解模型, 采用适用于求解双层鲁棒优化问题的列和约束生成算法 (C&CG)^[28], 模型求解实施流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

(1) 设置优化目标下限 $B_L = -\infty$, 上限 $B_U = \infty$, 将不确定集合设置为空, 迭代次数设置为 $k=1$ 。

(2) 求解优化主问题, 获得目标函数最优值 O_{MP} 和对应的规划最优解 \hat{s} , 用求解得到的 O_{MP} 更新 B_U 的值。

(3) 基于主问题求解得到的规划解 \hat{s} , 对优化子问题进行求解, 获得目标函数最优值 O_{SP} (包括规划阶段的目标函数值) 和对应的不确定场景求解结果 $\hat{\varepsilon}^k$, 用 O_{SP} 更新 B_L 的值。

(4) 如果 $|(B_U - B_L) / B_L| < \delta$ (本文中设置 $\delta = 1 \times 10^{-3}$), 求解流程结束, 否则继续下一步。

(5) 把 $\hat{\varepsilon}^k$ 加入集合 $\hat{\varepsilon}$ 中, 在主优化问题中生成 $\hat{\varepsilon}^k$ 对应的变量 $\{E_{S,i}^k, P_{S,i}^k, sl_i^{hk}, P_{S_{dis},j}^{hk}, P_{S_{char},j}^{hk}\}$ 和 $\{P_{i,j}^L, Q_{i,j}^L, I_{i,j}^k, U_i^k\}$, 其中 $(i,j) \in \Omega_L$ 、 $i \in \Omega_B$, 添加其对应的约束条件, 令 $k=k+1$ 并转向步骤(2)。

6 算例分析

6.1 算例概况

本文以 IEEE-33 节点配电系统作为基础设计测

试系统(图 4), 其中 23 个节点配置了光伏发电装置, 电源处设置 1 个共享储能(由 10 个用户共享), 用户处意愿建设独立储能的有 2 处, 分别为节点 18 和节点 28, 储能均采用在配网侧应用较为广泛的锂电池。节点负荷和光伏出力预测值采用典型日的实际负荷数据, 对应的系统总负荷和总光伏出力如图 5 所示。其中, 系统负荷峰值出现在 21:00 左右, 负荷峰值约 2.5 MW; 光伏出力总和最大值出现在 13:00 左右, 光伏出力最大值为 2.4 MW, 并存在光伏出力倒送现象。部分用户负荷含有一定比例的电动汽车及其他可调节负荷, 具备自动需求侧响应能力^[29], 其中可平移负荷电量占比大约为 20%。

本文主要考虑 2 类随机变量, 即光伏出力和固定负荷, 采用第 3 章中的模型进行不确定性场景的确定, 最终生成 10 个不确定场景(如表 1 所示)。电网分时电价选用北京市商业用电峰谷分时电价标准(如图 6 所示), 储能相关参数如表 2 所示。

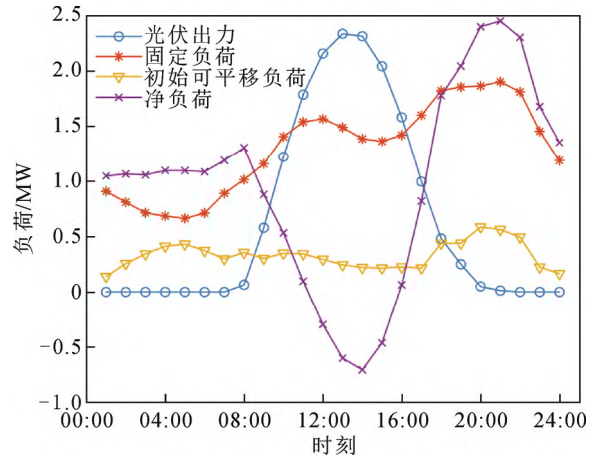


图 5 系统负荷概况

Fig.5 Profile of the system load

表 1 不确定性场景结果

Table 1 Results of uncertainty scenarios

场景编号	光伏出力误差/%	固定负荷误差/%
ω_1	-15.38	14.70
ω_2	13.34	2.29
ω_3	-7.38	-12.50
ω_4	-9.84	13.09
ω_5	-4.36	-12.51
ω_6	-12.50	-3.45
ω_7	1.56	-0.81
ω_8	14.98	-8.73
ω_9	-7.55	4.84
ω_{10}	-0.92	13.14

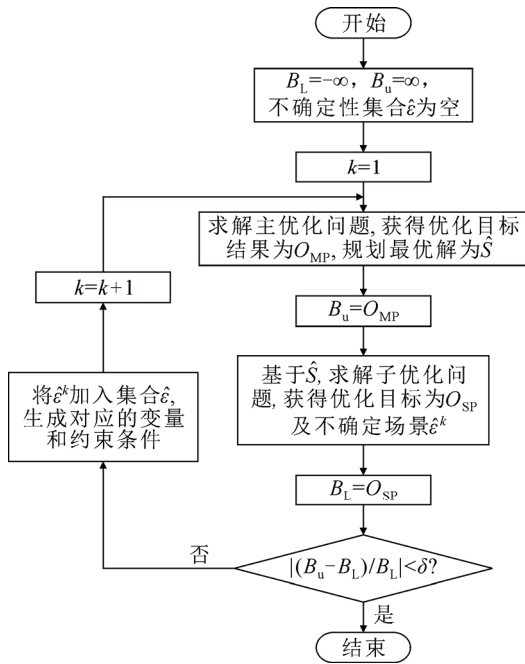


图 3 实施流程图

Fig.3 Implementation flow chart

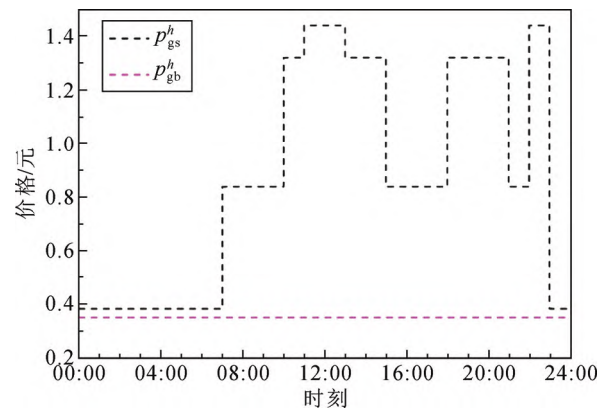


图 6 系统分时电价

Fig.6 System time-of-use electricity price

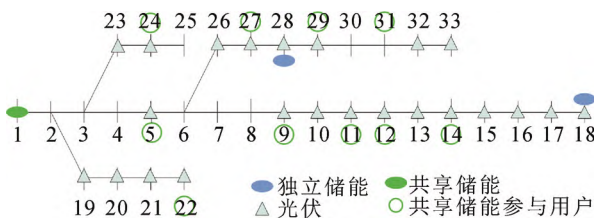


图 4 测试系统示意图

Fig.4 Test system diagram

表 2 储能相关参数设置

Table 2 Storage parameter settings

参数名称	$E_{S,i}^{\max} / \text{MWh}$	$P_{S,i}^{\max} / \text{MW}$	$\lambda_E / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	$\lambda_P / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$
取值	10	5	640	240

6.2 计算结果及分析

6.2.1 储能规划结果

使用 Matlab 编程实现了所提模型在上述算例中的应用。采用的优化求解器为 Gurobi 9.5, 电脑处理器为 Intel Core-i7 @2.5 GHz。采用 5.2 节的实施流程, 针对测试系统的迭代求解结果为:

(1) $k=1$ 时, 求解优化主问题, 获得目标函数最优值 $O_{MP}=3861$ 万元, 用该 O_{MP} 更新 B_U 的值。对应规划方案为: 共享储能容量 3 MWh, 功率 1 MW, 节点 28 储能容量 1 MWh, 功率 0.5 MW, 根据优化节点 18 不宜设置储能。基于求解得到的规划解, 对优化子问题进行求解, 不确定性场景 ω_1 对应的成本最大, 目标函数最优值 $O_{SP}=4864$ 万元, 用该值更新 B_L , 把 $\hat{\epsilon}^k$ 加入到集合 $\hat{\epsilon}$ 中, 生成 $\hat{\epsilon}^k$ 对应的变量, 并加入主优化问题中。

(2) $k=1$ 时求解结果对应 $|(B_U - B_L) / B_L| = 0.21$ (大于设置的阈值), 因此继续进行 $k=2$ 的主问题求解, 得到目标函数最优值 $O_{MP}=4815$ 万元, 用该 O_{MP} 更新 B_U 的值。对应的规划最优解为: 共享储能容量为 3.5 MWh, 功率为 1 MW, 节点 28 储能容量为 1.5 MWh, 功率为 0.5 MW, 节点 18 不宜设置储能。基于 $k=2$ 时求解得到规划解, 对优化子问题进行求解, 不确定性场景 ω_1 对应的成本最大, 相应的目标函数最优值 $O_{SP}=4815$ 万元, 用该值更新 B_L 。此时 $|(B_U - B_L) / B_L| < \delta$, 则迭代过程终止, $k=2$ 时求解得到的规划方案将作为最终储能规划方案, 见表 3。

6.2.2 需求响应/储能充放策略

针对 ω_1 优化前后的系统可平移负荷曲线如图 7 所示, 经过优化晚间负荷高峰时段(18:00—22:00)的系统可平移负荷下降了 10%左右, 主要向凌晨的电价低谷时段(01:00—07:00)以及光伏出力高峰时段(13:00—16:00)进行了移动, 通过负荷平移提升了光伏本地消纳、减少了电价高峰时段的用电需求, 从而达到节约用户成本的效果。

以节点 28 的独立储能为例, 针对 ω_1 优化得到的储能充放电策略及储能储电量变化如图 8 所示。根据图 8 可知, 节点 28 处储能的充电时刻主要集中在

表 3 储能规划结果

Table 3 Results of storage systems configuration

项目	储能容量/MWh	储能功率/MW
共享储能	3.5	1
节点 28	1.5	0.5
节点 18	0	0

在凌晨的电价低谷时段(01:00—04:00)以及光伏出力高峰时段(13:00—16:00), 而放电则集中在原始净负荷曲线的 2 个峰值时段, 即上午的 08:00—11:00 和晚间的 19:00—22:00, 通过储能的充放电用户可

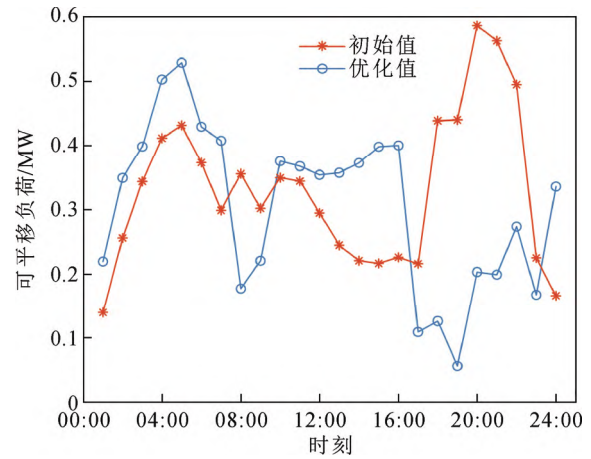
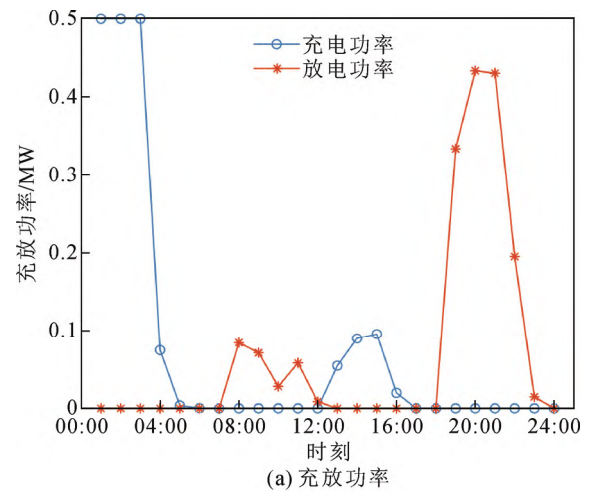
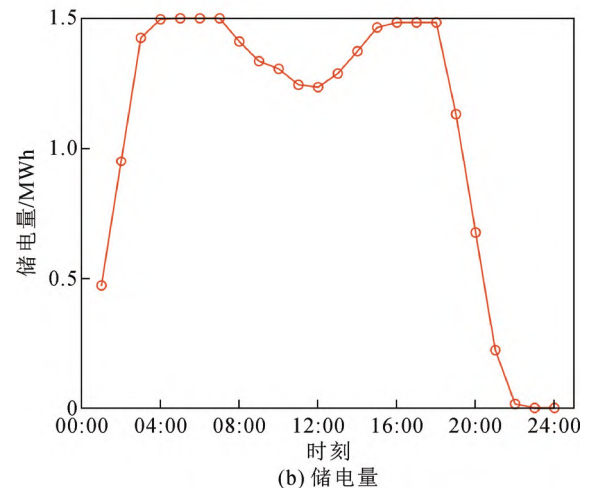


图 7 系统可平移负荷曲线

Fig.7 System shiftable load curves



(a) 充放电功率



(b) 储电量

图 8 节点 28 储能充放电功率及储电量

Fig.8 Charge/discharge power and storage of node 28

进一步节约用电成本。节点 28 的净负荷曲线如图 9 所示, 通过需求侧响应和储能充放策略, 净负荷的峰值由优化前的 20:00—21:00 时段平移到了凌晨, 且通过优化午后的负荷倒送现象(13:00—16:00)也不再存在, 用户的光伏出力得到了充分利用。

6.2.3 节点电压水平

针对 ω_1 优化得到的节点电压标幺值(基准值为 10 kV)如图 10 所示, 图中每条线对应一个节点。可以看出节点电压在各个时刻均能保持在合理范围(即 0.93~1.07)之内。

6.2.4 光伏比例灵敏度分析

图 5 中的光伏比例作为 100%的基准, 依次减少光伏比例, 得到相应的共享储能及节点 28、节点 18 储能容量和功率配置、储能规划成本及运行成本如图 11 所示。

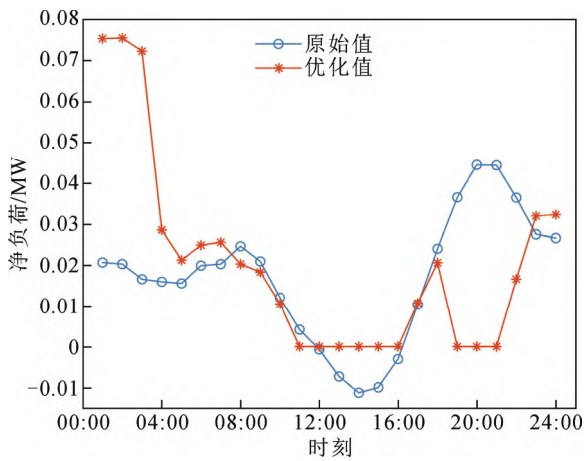


图 9 节点 28 净负荷曲线
Fig.9 Net load curve of node 28

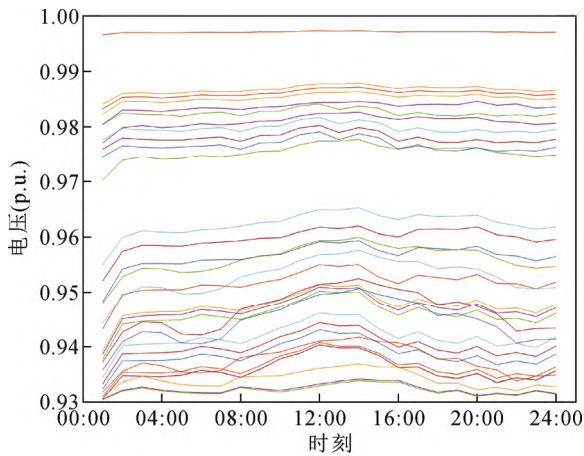
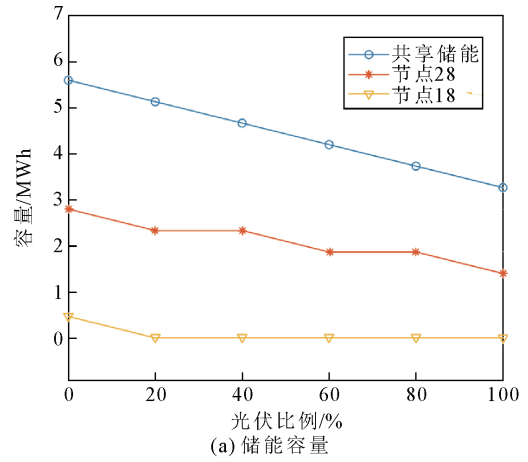
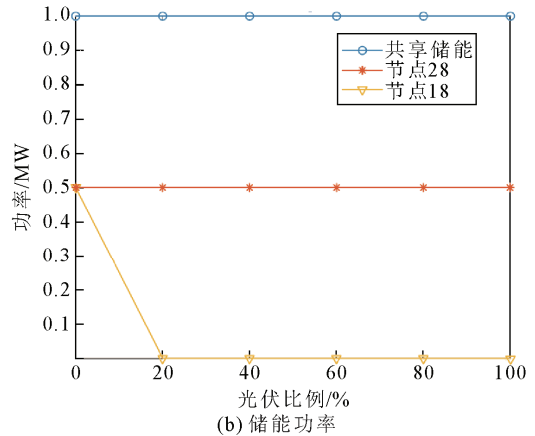


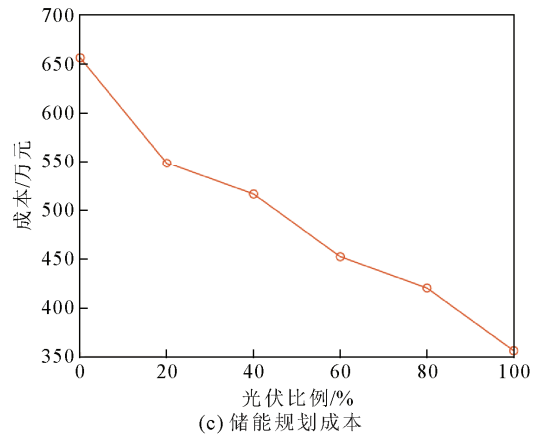
图 10 节点电压分布情况
Fig.10 Nodal voltage distribution



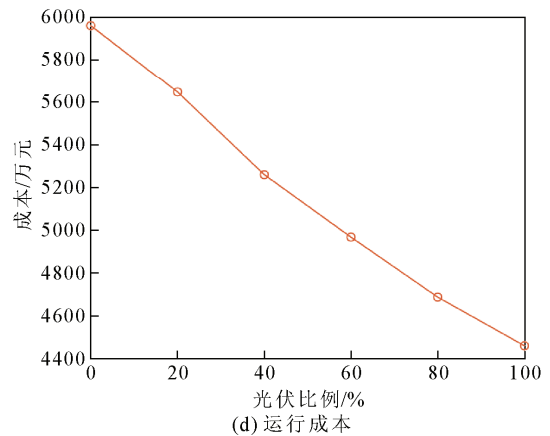
(a) 储能容量



(b) 储能功率



(c) 储能规划成本



(d) 运行成本

图 11 光伏比例灵敏性分析

Fig.11 Sensitivity analysis of photovoltaic proportion

根据图 11 可知,共享储能和 2 个节点处的储能容量随着光伏比例的下降总体呈现出上升的趋势,不含光伏情况下的储能总容量相比 100%光伏比例情况下增加了 90%;除了节点 18 处在不考虑光伏的情况下需要设置储能以外,储能功率随光伏比例下降基本保持不变;储能投资成本及运行成本也随着光伏比例的下降呈现上升趋势。根据计算结果可以推断,光伏比例的降低加大了需求响应对于储能的需求,因此光伏、储能和需求侧响应之间的协调配合对于降低用户成本极为关键。

7 结论

本文以含高比例光伏的配电网为研究对象,提出了计及需求侧响应的储能优化配置。该模型具有以下优势:

1) 考虑储能商业运营中涉及的多个不同的利益方,提出了独立投资和共享 2 种方式混合的储能优化配置模型。

2) 考虑负荷需求和光伏出力的双重不确定性,提出了基于误差概率分布的不确定性场景确定方法,并基于此提出了储能优化配置的 3 层优化模型。

3) 储能优化配置的规划问题中统筹考虑了运行阶段需求响应策略的影响,以有效利用现有调控资源减少储能投资成本。

4) 储能优化配置属于扩展规划范畴,并计及了运行阶段的配电网潮流约束等,可与现有配电系统运行兼容。算例应用表明所提模型使得测试系统的可平移负荷峰值下降了 10%,并在优化用户成本、稳定节点电压水平等方面效果显著。通过对光伏比例灵敏性的分析,不含光伏情况下的储能总容量相比 100%光伏比例场景增加了 90%。在未来工作中,将进一步探索共享储能在用户间的成本分摊机制。

参考文献 References

[1] 国家能源局. 国家能源局关于印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》的通知[EB/OL]. (2022-10-09). http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm.
National Energy Administration. Notice of the national energy administration on the issuance of the "action plan for peaking carbon neutrality in energy"[EB/OL]. (2022-10-09). http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm.

[2] 国家能源局. 国家能源局综合司关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL]. (2021-09-08). http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.
National Energy Administration. Notice of the General Department of the National Energy Administration on the announcement of the pilot

project list for the development of county-wide Rooftop distributed PV(city, district)[EB/OL]. (2021-09-08). http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.

[3] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.

[4] 余贻鑫. 集成高比例风能和太阳能发电的智能配电网[EB/OL]. (2017-09-13). <https://news.bjx.com.cn/html/20170913/849789.shtml>.
YU Yixin. Smart distribution network integrating a high proportion of wind and solar power[EB/OL]. (2017-09-13). <https://news.bjx.com.cn/html/20170913/849789.shtml>.

[5] 翟世涛, 刘泽槐, 杨家豪, 等. 考虑多时段并网点电压控制的光储容量匹配及优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1855-1863.
ZHAI Shitao, LIU Zehuai, YANG Jiahao, et al. Capacity matching and optimal operation of photovoltaic-storage systems based on multi-period PCC voltage control[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1855-1863.

[6] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 57-61.
YAN Zhimin, WANG Chengmin, ZHENG Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57-61.

[7] 谢雨龙, 罗逸飞, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4403-4412.
XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4403-4412.

[8] 高松, 黄河, 李妍, 等. 适应随机序贯决策的分布式储能优化规划方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4385-4392.
GAO Song, HUANG He, LI Yan, et al. Optimization programming method for distributed energy storage suitable for stochastic sequential decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4385-4392.

[9] 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, 2016, 31(1): 304-316.

[10] 彭春华, 陈露, 张金克, 等. 基于分类概率机会约束 IGDT 的配电网储能多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2809-2818.
PENG Chunhua, CHEN Lu, ZHANG Jinke, et al. Multi-objective optimal allocation of energy storage in distribution network based on classified probability chance constraint information gap decision theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2809-2818.

[11] 夏元兴, 徐青山, 黄煜, 等. 端到端交易场景下配电网分布式储能的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 82-89.
XIA Yuanxing, XU Qingshan, HUANG Yu, et al. Optimal configuration of distributed energy storage for distribution network in peer-to-peer transaction scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 82-89.

[12] 杨天鑫, 黄云辉, 唐金锐, 等. 高比例新能源下调频控制的储能系统多目标优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2744-2753.
YANG Tianxin, HUANG Yunhui, TANG Jinrui, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with frequency regulation control under high proportion of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2744-2753.

- [13] 李振坤, 陈思宇, 符杨, 等. 基于时序电压灵敏度的有源配电网储能优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4630-4640.
LI Zhenkun, CHEN Siyu, FU Yang, et al. Optimal allocation of ESS in distribution network containing DG base on timing-voltage-sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4630-4640.
- [14] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1893-1902.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1893-1902.
- [15] 李振坤, 李一骄, 张代红, 等. 储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3676-3683.
LI Zhenkun, LI Yijiao, ZHANG Daihong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3676-3683.
- [16] 张海波, 马伸铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 259-268.
ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 259-268.
- [17] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 考面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [18] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2751-2759.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.
- [19] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371.
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371.
- [20] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 自动需求响应模式下光伏用户群的优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3422-3432.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Optimal operation model of user group with photovoltaic in the mode of automatic demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3422-3432.
- [21] 闫东翔, 陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.
YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 178-191.
- [22] 鲁明芳, 李咸善, 李飞, 等. 基于双层博弈优化的光伏电站集群储能租赁配置策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5887-5898.
LU Mingfang, LI Xianshan, LI Fei, et al. Strategy of energy storage leasing configuration of photovoltaic power station cluster based on bi-level game optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5887-5898.
- [23] MA L, LIU N, ZHANG J H, et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: a game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930-1942.
- [24] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 94-100.
ZHOU Dejia, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Implementation of a photovoltaic grid-connected system based on improved maximum power point tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 94-100.
- [25] HODGE B M, LEW D, MILLIGAN M. Short-term load forecast error distributions and implications for renewable integration studies[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). Denver, USA: IEEE, 2013: 435-442.
- [26] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [27] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [28] ZENG B, ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.
- [29] MA L, LIU N, WANG L F, et al. Multi-party energy management for smart building cluster with PV systems using automatic demand response[J]. Energy and Buildings, 2016, 121: 11-21.



MA Li

Ph.D.

Associate professor



PEI Wei

Ph.D., Professor

Corresponding author

马丽

1986—, 女, 博士, 副研究员, 硕导

主要从事新能源与智能配用电系统规划运行等方面的研究

E-mail: mali@mail.iee.ac.cn

裴玮(通信作者)

1982—, 男, 博士, 研究员, 博导

主要从事分布式能源与微网方向的研究

E-mail: peiwei@mail.iee.ac.cn

收稿日期 2023-04-18 修回日期 2023-11-15 编辑 程子丰