

考虑用户满意度的主动配电网分布式 鲁棒优化调度

艾鸿宇¹, 洪建军¹, 胡景伦^{2*}, 郑建锋¹, 陈鹤林¹

(1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

Distributed Robust Optimized Scheduling of Active Distribution Networks Considering User Satisfaction

AI Hongyu¹, HONG Jianjun¹, HU Jinglun^{2*}, ZHENG Jianfeng¹, CHEN Helin¹

(1. State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou 324000, China;

2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University,
Yichang 443002, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the coordination and optimization problem between operation economy and user satisfaction caused by the high proportion of wind and solar energy access to the distribution network, as well as the uncertainty of wind and solar output, a two-stage distributionally robust optimal dispatch method considering user satisfaction constraints in demand response for active distribution networks is proposed, to achieve coordinated optimization of economic efficiency and user satisfaction.

[Methods] An optimization model for distribution network reconfiguration was developed, which considered demand response and user satisfaction. The model aimed to minimize comprehensive costs, including network loss cost, wind and solar curtailment cost, electricity purchase cost, user compensation cost, and switch operation penalty cost. The Frank-Copula function was introduced to characterize the correlation between wind and photovoltaic power output. Typical scenario sets were generated using the K-means clustering method. A distributionally robust optimization model was then constructed based on confidence intervals of 1-norm and ∞ -norm. A two-stage solution approach was adopted: the first stage determined the status of branch switching and energy storage, while the second stage optimized the power dispatch and demand response strategies. The column-and-constraint generation algorithm was employed to solve the established model. [Results] Taking the IEEE

33-node distribution network as an example, four scenarios were set up for simulation, and the results showed that the proposed method could effectively improve the clean energy consumption rate, reduce the operating cost, smooth the load curve, and take into account the user's power satisfaction. Secondly, the sensitivity of the fuzzy set of the split blue rod was analyzed, and the results showed that the confidence interval increased, the uncertainty of wind and solar output increased, the conservatism of the model became higher, and the cost also increased. [Conclusion] The distribution network sub-blue rod optimization model considering user satisfaction in demand response significantly improves the operation economy and user satisfaction of the distribution network, and provides an effective way to solve the problem of high proportion of wind and solar energy access.

Key words: user satisfaction; demand response; distributionally robust optimal; distribution network reconstruction

摘要: [目的]针对高比例风光能源接入配电网导致的运行经济性与用户满意度之间的协调优化问题以及风光出力不确定,提出一种需求响应中考虑用户满意度约束的主动配电网两阶段分布鲁棒优化调度方法,以实现经济效益与用户满意度的协调优化。[方法]考虑需求响应和用户满意度,建立综合网损成本、弃风弃光成本、购电成本、用户削减成本及开关操作惩罚成本的配电网重构优化模型;引入 Frank-Copula 函数刻画风光出力相关性,结合 K-means 聚类生成典型场景集,构建基于 1-范数和 ∞ -置信区间的分布鲁棒优化模型,第一阶段确定支路开

基金项目: 国家自然科学基金(62476153)

National Natural Science Foundation of China (62476153)

断及储能状态,第二阶段确定功率分配与需求响应策略,采用列与约束生成算法求解。【结果】以 IEEE 33 节点配电网为例,首先设置 4 种场景进行仿真,结果表明,本文方法能有效提升清洁能源消纳率,降低运行成本,平缓负荷曲线,兼顾用户用电满意度;其次,进行分布鲁棒模糊集置信度灵敏性分析,结果表明,置信区间增大,风光出力不确定性增大,模型保守度变高,成本也随之上升。【结论】考虑需求响应中用户满意度的主动配电网分布式鲁棒优化模型,显著提升了配电网的运行经济性和用户满意度,为解决高比例风光能源接入问题提供了有效途径。

关键词: 用户满意度;需求响应;分布鲁棒优化;配电网重构

0 引言

在当下致力于实现“碳中和”目标的进程中,优化能源结构并促进分布式电源(Distributed Generation, DG)的发展扮演着关键角色。主动配电网(Active Distribution Network, ADN)因其能够灵活集成各类可调度单元应运而生^[1-3],为 DG 的高效消纳提供了支持。然而,随着大量 DG 接入及网络重构,配电网易出现无功过剩、电压升高及线损增加等问题^[4],在储能不足地区甚至导致严重弃风弃光^[5]。因此,如何在保障供电质量与可靠性的前提下,协调调度配电网中的有功、无功资源^[6],已成为电力系统主动控制的关键课题。

目前,已有相关文献对配电网重构做了相关研究。文献[7]以混合整型二阶锥规划为基础,构建配网优化模型,整合了网络重构等主动管理策略与无功优化的协同效应。文献[8]以网损和电压偏移最小为目标函数,将动态重构与静态重构进行了对比,验证了动态重构的优越性。文献[9]网络动态重构的目标函数综合考虑了环保收益与系统损耗费用,通过区间潮流减小了不确定因素对重构的影响。

需求侧响应是保障电力系统安全稳定运行、灵活调度柔性负荷的重要手段。文献[10]以主动配电网经济性优化为切入点,构建了融合需求响应成本分析的日运行成本最小化模型。文献[11]设计了基于负荷特性的多级补偿机制,通过差异化电价策略协调可中断负荷需求,展现了方案的适应性与经济性平衡能力。文献[12]构建了涵盖新能源消纳、系统运行及用户成本的多目标优化,证实了模

型的准确性和实用性。虽对配电网重构及用户侧需求响应有诸多研究,但鲜有文献将需求响应因素融入配电网重构考量之中,同时,用户满意度对用电行为的潜在影响亦常被忽视。

在电力系统的不确定性规划中,常用的模型有鲁棒模型^[13]和随机模型^[14]。但鲁棒模型往往在决策时结果保守,经济性欠佳^[15];随机模型过分依赖于不确定概率模型。从而引入了分布式鲁棒优化模型^[16],文献[17]提出了一种分布式鲁棒,避免了过度保守,兼具经济性和鲁棒性。文献[18]建立基于矩不确定信息的模糊的风力发电波动性集合;文献[19]在随机优化的基础上考虑概率分布的置信区间,建立两阶段分布式鲁棒优化模型,较好地均衡了系统经济性与保守型的关系,但未考虑风光出力的相关性。针对此问题,文献[20]基于 Copula 理论构建了区域风电时空相关性模型,仿真验证了其必要性。

基于此,本文提出一种考虑需求响应中用户满意度的主动配电网分布鲁棒优化模型。首先,对需求响应以及用户满意度进行分析,以总运行成本为目标,构建计及需求响应的配电网重构模型;其次,引入 Frank-Copula 函数对具有相关性的风光典型场景进行生成,采用 1-范数和 ∞ -的置信集合,对不确定性的概率分布进行综合约束,构建两阶段分布鲁棒优化调度模型;最终通过列与约束生成(Column-and-Constraint Generation, C&CG)算法求解,所提模型的有效性通过 IEEE 33 节点算例得到验证。

1 需求响应及用户满意度分析

1.1 需求响应模型

(1) 价格型需求响应

价格型需求响应通过分时电价差异化引导用户对用电需求进行调节^[21],引入电价弹性系数来表示负荷需求与电价之间的关系^[22],其表达式为

$$E_{i,j} = - \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \rho_j / \rho_j} = - \frac{(P_i^{\text{cur}} - P_i) / P_i}{(\rho_j^{\text{cur}} - \rho_j) / \rho_j} \quad (1)$$

式中: $E_{i,j}$ 为节点*i*时段负荷受*j*时段电价的影响系数; P_i 、 P_i^{cur} 分别为*i*时段需求响应前、后的用电量; ρ_j 、 ρ_j^{cur} 分别为*j*时段需求响应前、后的电价; ΔP_i 为*i*时段用电量变化量; $\Delta \rho_j$ 为*j*时段电价变化量。

用户参与价格型需求响应后的用电量为

$$\begin{bmatrix} P_1^{\text{cur}} \\ P_2^{\text{cur}} \\ \vdots \\ P_T^{\text{cur}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_T \end{bmatrix} \cdot E \begin{bmatrix} \Delta\rho_1/\rho_1 \\ \Delta\rho_2/\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_T/\rho_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: E 为电价弹性矩阵; T 为配电网调度周期,取24 h。

价格型需求响应后的总负荷要保持不变,故应满足:

$$\sum_{i=1}^T P_i^{\text{cur}} = \sum_{i=1}^T P_i \quad (3)$$

(2) 激励型需求响应

激励型需求响应借助激励政策来调整用户的用电习惯,用户与供电企业签订负荷中断协议^[23],在电力需求高峰时段,供电企业依据协议中断部分负荷,并向用户支付相应的经济补偿。补偿成本的计算式为

$$f_{\text{IL}} = \sum_{i=1}^T \gamma P_i^{\text{IL}} \quad (4)$$

式中: f_{IL} 为中断负荷补偿成本; γ 为负荷中断补偿成本系数; P_i^{IL} 为*i*时段中断负荷功率。

1.2 用户满意度

(1) 用电方式满意度

当用户在无需顾及电价因素的情况下制定用电计划时,其舒适度达到较高水平^[24]。据此,用电方式满意度可定义为

$$f_{\text{con}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T |\Delta P_i|}{\sum_{i=1}^T P_i} \quad (5)$$

式中: f_{con} 为用户用电方式满意度。

(2) 电费支出满意度

电费支出满意度用来衡量用户支出电费的变化情况,可定义为

$$f_{\text{eco}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T \rho_i^{\text{cur}} \Delta P_i}{\sum_{i=1}^T \rho_i^{\text{cur}} P_i} \quad (6)$$

式中: f_{eco} 为用户电费支出满意度。

如果 $f_{\text{eco}} > 1$,则表明优化后用户电费支出相比优化前更少,用户对电费支出的满意度更高。

2 确定性计及网络重构的配电网优化模型

2.1 目标函数

目标函数如式(7)所示:

$$\min f = c_1 f_1 + c_2 f_2 + c_3 f_3 + c_4 f_4 + f_{\text{IL}} \quad (7)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 和 c_4 分别为网络损耗成本系数、弃风弃光惩罚系数、主网购电成本系数和分段开关操作惩罚成本系数。

(1) 网络损耗

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \varpi} I_{ij,t}^2 R_{ij,t} \Delta t \quad (8)$$

式中: $I_{ij,t}^2$ 为*t*时段支路*ij*电流的有效值的平方; R_{ij} 为支路*ij*的电阻值; ϖ 为配电网所有支路集合。

(2) 弃风弃光量

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \varphi_{\text{wind}}} (P_{i,t}^{\text{wind,b}} - P_{i,t}^{\text{wind}}) \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \varphi_{\text{pv}}} (P_{i,t}^{\text{pv,b}} - P_{i,t}^{\text{pv}}) \Delta t \quad (9)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{wind,b}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 分别为*t*时刻节点*i*的风电预测功率、实际功率; $P_{i,t}^{\text{pv,b}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 分别为*t*时刻节点*i*的光伏预测功率、实际功率; φ_{pv} 、 φ_{wind} 分别为配电网中光伏、风机接入节点集合。

(3) 主网购电量

$$f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \varphi_{\text{zhu}}} P_{\text{buy},i,t} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{buy},i,t}$ 为*t*时刻节点*i*向主网购电功率; φ_{zhu} 为配电网与上级电网的连接节点集合。

(4) 分段开关操作次数

$$f_4 = \sum_{ij \in \varpi} |X_{ij} - X_{ij,0}| \quad (11)$$

式中: $X_{ij,0}$ 为配电网重构前支路*ij*的开断; X_{ij} 为0配电网重构后支路*ij*的开断;支路*ij*开关断开时为0,支路*ij*开关闭合时为1。

2.2 约束条件

2.2.1 配电网运行约束

配电网功率平衡约束,支路潮流约束参考文献[25-26]。

2.2.2 网络结构约束

配电网在重构过程中需满足辐射状约束及连通性约束^[27], 即:

$$\begin{cases} f_{ai} + \sum_{j \in \varphi(i)} \chi_{ij} f_{ij,t} = 0 \\ N_1 = N_2 - 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: f_{ai} 为节点 i 的虚拟负荷; $f_{ij,t}$ 为 t 时段支路 ij 处流过的虚拟流量; N_1 为支路数; N_2 为节点数。

2.2.3 储能功率及容量约束

储能设备应该满足充放电状态及功率约束, 即:

$$\begin{cases} y_{e,i,t}^{\text{ch}} + y_{e,i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ y_{e,i,t}^{\text{ch}} \in \{0, 1\} \\ y_{e,i,t}^{\text{dis}} \in \{0, 1\} \\ 0 \leq P_{e,i,t}^{\text{ch}} \leq y_{e,i,t}^{\text{ch}} P_{e,i}^{\text{ch,max}} \\ 0 \leq P_{e,i,t}^{\text{dis}} \leq y_{e,i,t}^{\text{dis}} P_{e,i}^{\text{dis,max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $y_{e,i,t}^{\text{ch}}$ 、 $y_{e,i,t}^{\text{dis}}$ 分别为节点 i 处储能在 t 时段充、放电状态; $P_{e,i}^{\text{ch,max}}$ 、 $P_{e,i}^{\text{dis,max}}$ 分别为储能的充、放电最大功率; $P_{e,i,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{e,i,t}^{\text{dis}}$ 分别为节点 i 处储能在 t 时段充、放电功率。

储能在运行过程中, 需要满足其当前容量与前一时刻容量的充放电约束, 即:

$$\begin{cases} E_{e,i,t+1}^{\text{ESS}} = E_{e,i,t}^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}} \Delta t P_{e,i,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \Delta t P_{e,i,t}^{\text{dis}} \\ E_{e,i}^{\text{min}} \leq E_{e,i,t}^{\text{ESS}} \leq E_{e,i}^{\text{max}} \\ E_{e,i,0}^{\text{ESS}} = E_{e,i,24}^{\text{ESS}} = E_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $E_{e,i,t}^{\text{ESS}}$ 为节点 i 处储能在 t 时段的实时容量; $E_{e,i}^{\text{max}}$ 、 $E_{e,i}^{\text{min}}$ 分别为储能的容量最大、最小限制; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能的充、放电效率; E_0 为储能初始容量。

2.2.4 电容器投切约束

电容器投切的约束条件为

$$Q_{i,t}^{\text{CB}} = N_{i,t}^{\text{CB}} \times Q_{i,st}^{\text{CB}} \quad (15)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为节点 i 处在 t 时段无功补偿总量; $N_{i,t}^{\text{CB}}$ 为节点 i 处在 t 时段投入电容器个数; $Q_{i,st}^{\text{CB}}$ 为单个电容器的无功补偿容量。

3 配电网两阶段动态鲁棒优化方法

3.1 风光相关性建模

光伏出力具有正调峰特性, 日间发电与负荷高峰重合; 风电则呈反调峰特性, 夜间出力较大,

与用电高峰错位。这两种可再生能源发电方式之间存在一定的相关性, 这种相关性在配电网调度过程中必须被充分考虑。

Copula 函数能够精确描述多个随机变量之间的非线性关系、不对称性和尾部依赖性, 有效地分离随机性和耦合效应, 清晰地描述了风能和光能之间的相互联系。本文选取 Frank-Copula 函数描述风光相关性。具体的场景生成流程如图 1 所示。

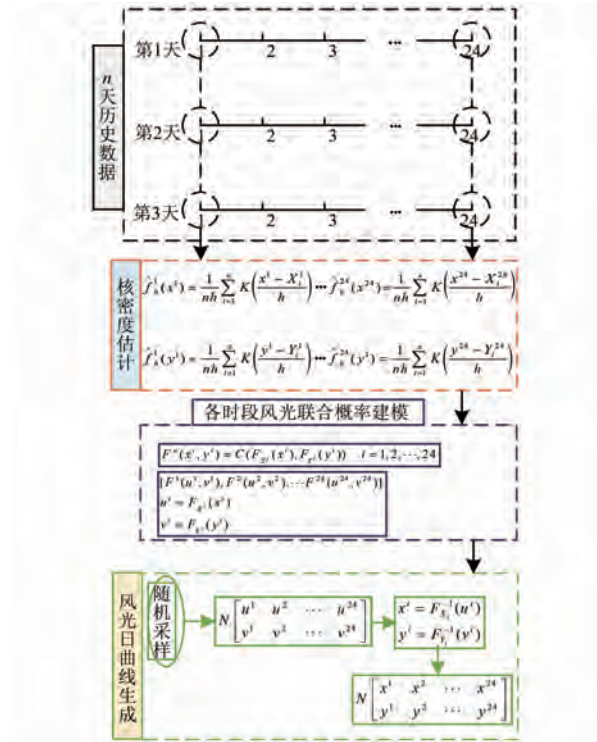


图 1 风光出力场景生成方法

Fig. 1 Wind and solar output scene generation method

3.2 分布鲁棒模型建立

根据 3.1 节生成的典型风光场景, 用来描述风光的不确定性时, 确定性模型中式 (7) ~ (15) 可以转化为两阶段鲁棒形式, 如式 (16) 所示:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \mathbf{a}^T \mathbf{x} + \left[\max_{\{p_k\} \in \Omega} \sum_{k=1}^K p_k \min_{\mathbf{y} \in Y} (\mathbf{b}^T \mathbf{y} + \mathbf{c}^T \boldsymbol{\xi}) \right] \\ \text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{p} \\ \mathbf{B}\mathbf{y} \leq \mathbf{g} \\ \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{y} \leq \mathbf{f} \\ \mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{y} = \mathbf{g} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为第一阶段最外层的决策变量, 包含储能充放电状态及支路开断状态; $\mathbf{y}$ 为第二阶段的决策变量, 包含节点电压幅值、支路电流、支路的有

功率和无功功率、需求响应后负荷、储能充放电功率、无功补偿设备输出无功功率、风电和光伏发电功率、主网购电功率; $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 为的可行解空间; $\mathbf{a}^T$ 、 $\mathbf{b}^T$ 、 $\mathbf{c}^T$ 分别为开关操作惩罚成本部分系数、其余部分目标函数系数; $\mathbf{A}, \mathbf{H}$ 分别第一阶段变量约束系数,即配电网重构以及储能充放状态约束的决策变量等式、不等式约束系数; $\mathbf{B}$ 为第二阶段变量约束系数,即风光出力功率、主网购电功率约束以及需求响应约束; $\mathbf{C}, \mathbf{D}$ 分别为两阶段决策耦合不等式约束系数,即储能功率约束以及配电网潮流有关的不等式约束; $\mathbf{E}, \mathbf{F}$ 分别为两阶段决策耦合等式约束系数,即配电网潮流有关等式约束; $\mathbf{b}, \mathbf{p}, \mathbf{g}, \mathbf{f}, \mathbf{h}$ 分别为对应系数矩阵; ξ 为风光预测出力; Ω 为场景的概率分布集合区间。

概率分布 p 的置信度可表示为

$$\begin{cases} \Pr(\|p - p_0\|_1 \leq \delta_1) \geq 1 - 2Ke^{-\frac{2M\delta_1}{K}} \\ \Pr(\|p - p_0\|_\infty \leq \delta_\infty) \geq 1 - 2Ke^{-2M\delta_\infty} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 为求概率函数; p_0 为概率分布的预测值; δ_1, δ_∞ 分别为 1-范数、 ∞ -范数概率分布的允许偏差值; K 为初始场景个数; M 为 K 个初始场景所聚类得到的典型场景个数。

令 α_1 和 α_∞ 表示概率分布 p 分别基于 1-范数和 ∞ -范数所满足的置信度,则:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{K}{2M} \ln\left(\frac{2K}{1 - \alpha_1}\right) \\ \delta_\infty = \frac{1}{2M} \ln\left(\frac{2K}{1 - \alpha_\infty}\right) \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可推出概率分布的置信集合为

$$\Omega = \left\{ p_k \mid \begin{cases} p_k \geq 0, k = 1, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K p_k = 1 \\ \sum_{k=1}^K |p_k - p_k^0| \leq \delta_1 \\ \max_{1 \leq s \leq k} |p_k - p_k^0| \leq \delta_\infty \end{cases} \right\} \quad (19)$$

式中: p_k^0 为第 k 个场景的初始概率值; p_k 为第 k 个场景的实际概率值。

3.3 分布鲁棒模型求解

3.3.1 模糊集线性化

分布鲁棒模型通过综合范数约束置信不确定

性集,由于式(19)中包含的绝对值约束是非线性的,将其转换为线性约束条件,则:

$$\begin{cases} \sigma_k^+ + \sigma_k^- \leq 1 \\ \sum_{k=1}^K (p_k^+ + p_k^-) \leq \delta_1, \\ p_k^+ + p_k^- \leq \delta_\infty, \\ 0 \leq p_k^+ \leq \sigma_k^+ \delta_1 \\ 0 \leq p_k^- \leq \sigma_k^- \delta_1, \\ p_k = p_k^0 + p_k^+ + p_k^-, \\ \forall k \in [1, K] \end{cases} \quad (20)$$

式中: σ_k^+ 和 σ_k^- 分别为第 k 个概率值 p_k 产生偏移的二进制辅助变量; p_k^+, p_k^- 分别为 p_k^0 的正偏移量、负偏移量。

3.3.2 C&CG 算法求解分布鲁棒模型

针对可再生能源的不确定性,建立以最恶劣出力场景下成本最小化为目标的分布鲁棒优化模型。采用 C&CG 方法将两阶段分布鲁棒优化模型分解为主问题与子问题,采用迭代法进行求解。

(1)主问题:在已知最劣场景概率分布后,计算系统在该情境下的最优运行方案,以确保整体运行成本最低,并为模型提供上界,如式(21)所示:

$$\begin{cases} \min_x (\mathbf{a}^T \mathbf{x} + \Gamma) \\ \Gamma \geq \sum_{k=1}^K p_k \min_{y \in Y} (\mathbf{b}^T \mathbf{y} + \mathbf{c}^T \xi) \end{cases} \quad (21)$$

式中: Γ 为引入的辅助变量。

(2)子问题:确定置信区间内的最恶劣场景概率分布并优化设备运行,提供了模型的下界,确保系统在极端情境下仍能稳定运行,如式(22)所示:

$$\max_{\{p_k\} \in \Omega} \sum_{k=1}^K p_k \min_{y \in Y} (\mathbf{b}^T \mathbf{y} + \mathbf{c}^T \xi) \quad (22)$$

由于风光出力场景之间没有关联,不影响最内层决策变量,可并行求解,故可以将子问题分解为两个独立的子问题进行顺序求解,如式(23)所示:

$$L(\mathbf{x}^*) = \max_{\{p_k\} \in \Omega} \sum_{k=1}^K f(\mathbf{x}^*, \xi) p_k \quad (23)$$

式中: $f(\mathbf{x}^*, \xi)$ 为已知第一阶段变量 $\mathbf{x}^*$ 在第 k 场景下求得的内层优化目标。

其中,主问题和内层子问题均为非线性的二阶锥问题,可以通过 Matlab 中的 YALMIP 工具箱调用 MOSEK 求解器对模型进行求解。C&CG 算

法在求解过程中具体步骤如下。

步骤 1: 初始化, 迭代次数 $l=1$, 设置收敛裕度为足够小的正数 ε 。

步骤 2: 根据初始数据, 求解主问题, 得到主问题最优解, 并更新下界值。

步骤 3: 固定主问题最优解, 并将解传给子问题, 在考虑风光不确定性下对子问题求解, 得到最恶劣场景概率分布下的最优解, 并更新上界值。

步骤 4: 收敛性判断, 如果 $|\Psi_{UB}-\Psi_{LB}| \leq \varepsilon$, 则结束迭代运算, 输出此时最优结果; 否则令迭代次数 $l=l+1$, 更新主问题中最恶劣概率分布, 添加相关约束, 转至步骤 2, 直至收敛。

4 算例分析

4.1 仿真数据

以 IEEE 33 节点配电网为例进行分析, 如图 2 所示。在节点 9、25 处接风力发电机, 配置容量为 1.2 MW, 在节点 17、22、32 处接光伏电源, 配置容量为 1.9 MW; 在节点 25 处装储能设备, 容量为 1.5 MW, 最大充放电功率为 0.6 MW, 且充放电效率均保持在 90%。同时离散无功补偿装置设置在节点 32 处, 单台功率补偿装置容量为 0.15 Mvar, 最多可在系统中投入 5 台。采用第 3.1 节生成的 4 个典型风光场景, 如图 3、图 4 所示, 将所构建的两阶段分布式鲁棒的置信水平平均设置为 0.95, 场景数设为 500。

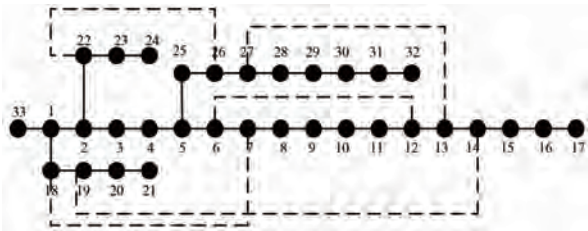


图 2 IEEE 33 节点配电网
Fig. 2 IEEE 33-node distribution network

表 1 分时电价

Tab. 1 Time-of-use electricity pricing

时段	时刻/(hh:mm)	电价/(元·kWh ⁻¹)
峰时	12:00~15:00、19:00~23:00	1.026
谷时	7:00~11:00、16:00~18:00	0.691
平时	1:00~6:00、24:00	0.256 1

4.2 结果分析

为了对比分析, 采用下列四种不同的调度情

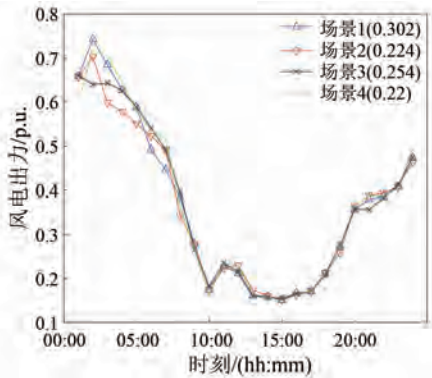


图 3 风电场景生成结果
Fig. 3 Wind power scenario generation results

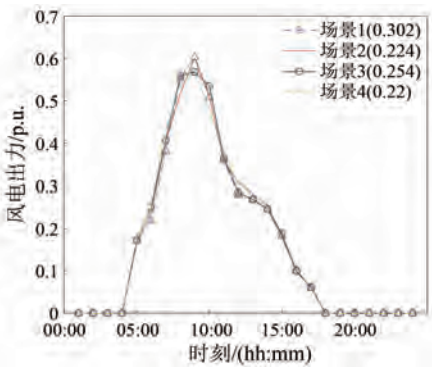


图 4 光伏场景生成结果
Fig. 4 Photovoltaic scenario generation results

景进行仿真。

- (1) 情景 1: 考虑网络重构, 但不考虑用户侧需求响应;
- (2) 情景 2: 不考虑网络重构, 但考虑用户侧需求响应;
- (3) 情景 3: 既考虑需求响应也考虑网络重构;
- (4) 情景 4: 在场景 3 基础上考虑用户满意度。

各场景各项成本及指标对比如表 2 所示。由表 2 可知, 情景 1、2、3 和 4 的总运行成本分别为 16 674 元、13 799 元、13 560 元和 13 979 元。对比情景 1 和情景 2, 情景 3 通过融合网络重构与需求响应策略, 显著降低了总运行成本。这说明, 实行分时定价制度可以有效地引导用户调节用电方式, 从而减少峰值期间的购电功率, 降低 ADN 的购电成本。同时, 对配电网进行拓扑调整, 有利于实现 ADN 的潮流最优分配, 降低线路的损耗。

对比情景 3 和情景 4, 由于情景 4 考虑了用户的满意度, 未强制对高峰时的负荷进行了大量转移, 其总成本相比场景 3 的总成本上升了 419 元, 但用电

方式满意度从 0.83 提高至 0.91,且电费支出满意度基本不变,更有利于用户自主的调整用电习惯。

表 2 各场景各项成本及指标对比

Tab.2 Comparison of costs and performance metrics across scenarios							
场景	弃风弃光成本/元	网损成本/元	中断负荷补偿成本/元	购电成本/元	满意度指标	开关操作惩罚成本/元	总成本/元
1	1 975	1 529	0	13 070	/	100	16 674
2	1 738	1 488	815	9 758	0.84/1.06	0	13 799
3	1 701	1 312	860	9 627	0.83/1.06	60	13 560
4	1 701	1 338	729	10 151	0.91/1.05	60	13 979

四种场景对应的负荷曲线如图 5 所示。由图 5 可知,当 ADN 优化调度中纳入需求响应时,能显著缩小负荷的峰谷差距,使负荷曲线趋于平缓,进而降低风电和光伏发电出力波动对配电网的冲击。若进一步考虑用户满意度,还能在保持负荷曲线平滑的同时,适当减少低谷时段的负荷增长,兼顾用户的用电舒适度。

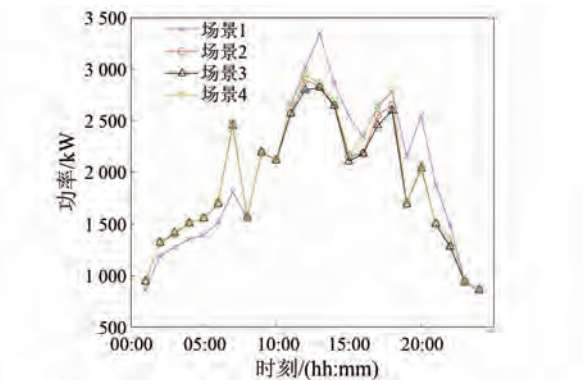


图 5 各情景负荷对比

Fig.5 Comparison of load profiles across scenarios

四种情景的购电功率情况如图 6 所示。由图 6 可知,相较于情景 1,其他情景由于引入了需求

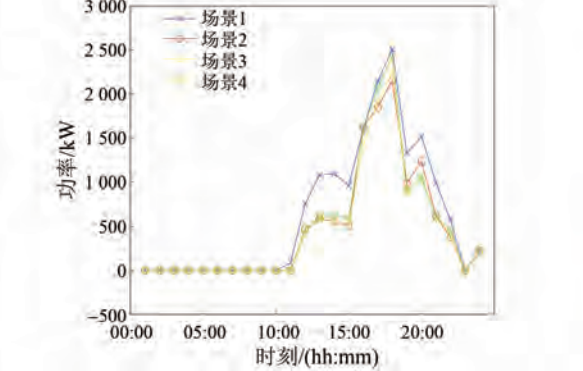


图 6 各情景购电功率对比

Fig.6 Comparison of purchased power across scenarios

响应机制,促使大部分购电功率被重新分配,在相同峰时电价时段的购电功率明显下降。

各设备最优调度情况如图 7 所示。由图 7 可知,在凌晨时,其风电功率已能满足负荷需求,储能容量未满,此时储能会进行充电,将多余的风电储存起来,在峰时段供能。在 16:00~18:00,此时电价属于平时段,配电网优先向主网购电,此时储能并不放电,而是将电能到晚高峰时段进行释放。

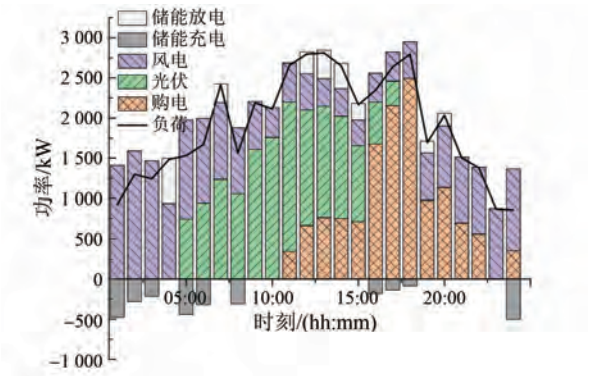


图 7 各设备最优调度情况

Fig.7 Optimal scheduling of each device

4.3 不同模型对比分析

为验证本文构建的两阶段分布鲁棒模型的有效性,与传统鲁棒模型和随机优化模型进行对比分析,结果如表 3 所示。

表 3 不确定性方法对比

Tab.3 Comparison of uncertainty methods			
成本/元	随机优化	本文模型	鲁棒优化
总成本	13 546	13 979	14 605
弃风弃光成本	1 657	1 701	1 120
网损成本	1 311	1 338	1 188
中断负荷补偿成本	714	729	619
购电成本	9 804	10 151	11 578
开关操作惩罚成本	60	60	100

由表 3 可知,传统鲁棒优化会过度关注极端情况,导致整体运行成本较高,弃风弃光成本减小,鲁棒优化的风光考虑到的是最恶劣的情景,会比实际值偏小。而随机优化虽能使配电网保持较低的运行成本,但其对恶劣场景的考虑远远不够,同时该优化方法过度依赖于历史数据的处理,导致计算过程较为复杂。采用本文模型处理配电网的风光不确定性,能够减小风光出力不确定性对系统影响的同时又能保持一定的经济性。

4.4 灵敏度分析

本文采用综合范数约束不确定性概率的分布集合,通过调整置信度来改变不确定变量的置信区间,进而分析不同置信度下的总成本变化。不同置信度下结果对比如表 4 所示。

表 4 不同置信度下结果对比

Tab. 4 Comparison of results under different confidence levels

α_∞	总成本/元		
	$\alpha_1 = 0.2$	$\alpha_1 = 0.6$	$\alpha_1 = 0.95$
0.2	13 798	13 813	13 884
0.6	13 888	13 899	13 939
0.95	13 909	13 937	13 979

由表 4 可知,不论是 1-范数还是 ∞ -范数的增大,总成本都增加。这是由于两种范数增加导致的置信区间增大,模型中的风、光出力不确定性增大,模型保守度变高。

在 $\alpha_1 = 0.99$ 、 $\alpha_\infty = 0.99$ 不确定性集下,不同范数与历史数据规模对总成本影响如表 5 所示。单一范数的数据采用两种范数调度成本的平均值。

表 5 不同范数及样本数量对成本影响

Tab. 5 Impact of different norms and sample sizes on costs

样本数量	总成本/元	
	单一范数	综合范数
200	14 098	14 071
500	14 015	13 979
1 000	13 959	13 907
2 000	13 901	13 839

由表 5 可知,随着历史数据样本数量的增加,具有较大的历史数据集可以较好地弥补典型场景与极端场景的差异,使最优调度策略更加准确,波

动限制参数会相应减小,分布鲁棒优化模型的经济性均有所提高。此外,在相同的历史数据情况下,综合范数不仅能够更加准确地限制所有场景的概率与实际情况的偏差的总和,而且能够更准确地限制个别情况的偏差总和,减小了随机概率分布与经验概率分布的差距,从而避免极端场景。因此,综合范数较单一范数更具经济性。

5 结语

本文通过构建主动配电网优化调度模型,实现了用户满意度与总成本的协同优化,将用电方式满意度提升至 0.91 的同时,总成本仅增加 3.1%。同时,结合需求响应机制与网络重构措施,有效平抑了负荷峰谷差,降低了网络损耗和购电成本,并优化了可再生能源的利用效率。此外,所提出的分布鲁棒方法在不确定环境下取得了 13 979 元的总成本,介于随机优化(13 546 元)和鲁棒优化(14 605 元)之间,实现了经济性与鲁棒性的平衡。这些成果为主动配电网的优化调度提供了新的思路和解决方案。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

艾鸿宇进行了方案设计、内容总结与论文撰写,胡景伦进行了试验研究与论文修改,洪建军、郑建锋、陈鹤林参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization, and paper writing were conducted by Ai Hongyu. The experimental research and paper revision were performed by Hu Jinglun. Hong Jianjun, Zheng Jianfeng, and Chen Helin participated in the review and modification of the paper. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

[1] 孟令卓越, 杨锡运, 赵泽宇. 考虑光-荷不确定性

- 和旋转备用约束的主动配电网经济优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 63-72.
- MENG L Z C, YANG X Y, ZHAO Z Y. An economic optimal dispatch strategy for active distribution networks considering photovoltaic-load uncertainty and rotating reserve constraints [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 63-72.
- [2] 杨晓辉, 张柳芳, 吴龙杰, 等. 含考虑 IDR 的冷热电联供微网的主动配电网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 19-28.
- YANG X H, ZHANG L F, WU L J, et al. Economic optimal dispatch of an active distribution network with combined cooling, heating and power microgrids considering integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 19-28.
- [3] 韩笑, 李姝佳, 王钢, 等. 一种适用于智能终端异常的配电网自适应保护方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 118-125.
- HAN X, LI S J, WANG G, et al. An adaptive protection method for distribution network with abnormal intelligent terminals [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 118-125.
- [4] 郭伟, 安佳坤, 刘洋, 等. 混杂 Petri-net 的配电网多层级节点电压混杂控制[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 140-148+167.
- GUO W, AN J K, LIU Y, et al. Hybrid Petri-net based voltage hybrid control for multi-level nodes in distribution networks [J]. Electric Power, 2023, 56(9): 140-148+167.
- [5] 马红明, 刘林青, 谢海鹏, 等. 计及综合需求响应的电-热综合能源系统分布式光伏最大接入容量评估[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 23-30.
- MA H M, LIU L Q, XIE H P, et al. Maximum access capacity assessment of distributed photovoltaic in integrated electric-thermal energy system considering integrated [J]. Smart Power, 2021, 49(8): 23-30.
- [6] 王文超, 庞丹, 成龙, 等. 考虑电价型需求响应的交直流混合配电网优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1675-1682.
- WANG W C, PANG D, CHENG L, et al. Optimal dispatch approach for hybrid AC/DC distribution networks considering price-based demand response [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1675-1682.
- [7] 郑能, 胡瑞馨, 丁晓群, 等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 90-96.
- ZHENG N, HU R X, DING X Q, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generation and network reconfiguration [J]. Smart Power, 2019, 47(3): 90-96.
- [8] 廖峰, 陈锦荣, 区伟潮, 等. 基于改进社会蜘蛛算法的有源配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 125-133.
- LIAO F, CHEN J R, OU W C, et al. Active distribution network reconfiguration based on improved social spider algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(10): 125-133.
- [9] 高纯, 于艾清, 丁雨. 基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 84-90.
- GAO C, YU A Q, DING Y. Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 84-90.
- [10] 朱超婷, 杨玲君, 崔一铂, 等. 考虑需求响应用户参与度的主动配电网优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 99-105.
- ZHU C T, YANG L J, CUI Y B, et al. Optimal scheduling of active distribution network considering user participation in demand response [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 99-105.
- [11] 王玉梅, 王露露. 基于多类需求响应的配电网优化调度[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 273-282.
- WANG Y M, WANG L L. Optimal dispatching of distribution network based on multi-type demand response [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 273-282.
- [12] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 66-72.
- QIU G F, HE C, LUO Z, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 66-72.
- [13] TURKA, WU Q W, ZHANG M L, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated multi-energy

- system for flexibility synergy and uncertainty balancing [J]. *Energy*, 2020, 196: 117130.
- [14] 吴孟雪, 房方. 计及风光不确定性的电-热-氢综合能源系统分布鲁棒优化[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(13): 3473-3485.
- WU M X, FANG F. Distributionally robust optimization of electricity-heat-hydrogen integrated energy system with wind and solar uncertainties [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(13): 3473-3485.
- [15] 刘淼, 孟静, 尹申, 等. 混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(3): 88-94.
- LIU M, MENG J, YIN S, et al. Dual-uncertainty optimization model for acceptance margin of hybrid AC/DC active distribution network [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(3): 88-94.
- [16] ZHI P C, DONG Q J, ZHONG W L, et al. Multi-time scale dynamic robust optimal scheduling of CCHP microgrid based on rolling optimization [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 139: 107957.
- [17] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(7): 2609-2627.
- DU G, ZHAO D M, LIU X. Research review on optimal scheduling considering wind power uncertainty [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(7): 2609-2627.
- [18] 周安平. 计及风电功率矩不确定性的分布鲁棒优化方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- ZHOU A P. Distributionally robust optimization considering moment uncertainty of wind generation [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.
- [19] 高海淑, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 32-41.
- GAO H S, ZHANG Y M, JI X Q, et al. Scenario clustering based distributionally robust comprehensive optimization of active distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 32-41.
- [20] 谢敏, 熊靖, 刘明波, 等. 基于 Copula 的多风电场出力相关性建模及其在电网经济调度中的应用[J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 1100-1106.
- XIE M, XIONG J, LIU M B, et al. Modeling of multi wind farm output correlation based on copula and its application in power system economic dispatch [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 1100-1106.
- [21] 骆钊, 高培淇, 和婧, 等. 需求响应下基于自抗扰的抽水蓄能与电化学储能联合参与电网负荷调频研究[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(3): 77-86+102.
- LUO Z, GAO P Q, HE J, et al. Research on the combination of pumped storage power station and electrochemical energy storage based on adrc in load frequency control of power grid under demand response [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(3): 77-86+102.
- [22] 朱嘉远. “双碳”背景下含高需求响应负荷的配电网状态估计算法[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(2): 82-90.
- ZHU J Y. Distribution network state estimation algorithm with high demand response enabled load under the background of “dual carbon” [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(2): 82-90.
- [23] 万庆祝, 闵现娟, 于佳松, 等. 需求响应下的电制氢多模式利用综合能源系统优化调度[J]. *供用电*, 2024, 41(12): 81-92.
- WAN Q Z, MIN X J, YU J S, et al. Optimized scheduling for an integrated energy system with multi-modal utilization of electric hydrogen production under demand response [J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(12): 81-92.
- [24] 杨恺, 姚宇, 孙可, 等. 考虑用户满意度的温控负荷能效综合指标模型和调峰策略[J]. *电力需求侧管理*, 2022, 24(5): 36-43.
- YANG K, YAO Y, SUN K, et al. Comprehensive energy efficiency assessment model and peak shaving strategy for TCLs considering consumer satisfaction [J]. *Power Demand Side Management*, 2022, 24(5): 36-43.
- [25] 邱革非, 杨昊天, 何超, 等. 基于二阶锥松弛的三相不平衡配电网最优潮流研究[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(12): 34-40+59.
- QIU G F, YANG H T, HE C, et al. Research on optimal power flow in three-phase unbalanced distribution network based on second-order cone relaxation [J]. *Electric Machines & Control*

- Application, 2022, 49(12): 34-40+59.
- [26] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
- GAO H J, LIU J Y, SHEN X D, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [27] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.
- HUANG M Y, ZHANG Q P, ZHANG S X, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
-
- 收稿日期:2025-06-12
收到修改稿日期:2025-08-27
作者简介:
艾鸿宇(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为线损管理、提质增效、节能降碳以及输电线路的运维与检修等, 446438463@qq.com;
* 通信作者: 胡景伦(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, 1042861649@qq.com。