

源荷不确定性下基于自适应分布鲁棒优化的 微电网日前调度

周华皓¹, 刘芳白¹, 吴海富¹, 陈浩¹, 倪亚佳¹, 瞿凯平²

(1. 国网江苏省电力有限公司 盐城供电分公司, 江苏 盐城 224000; 2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:建立一种源荷不确定性条件下的微电网日前调度模型以提高其运行经济性。针对光伏功率和负荷构成的源荷不确定性,提出一种新颖的基于自适应优化决策的分布鲁棒优化方法,来克服传统鲁棒优化在不确定性处理中的过度保守问题。首先,构造一种保守性可调的源荷不确定性模糊集,利用分布约束灵活调节模糊集的保守性,同时引入辅助不确定性变量将该模糊集转换为易处理形式。其次,基于无限规划问题对偶原理和对偶变量固定,将分布不确定性降维成场景不确定性。最后,利用极端对偶变量生成技术将所提模型转换成两阶段求解的确定性规划。数值仿真验证了所提模型在平衡微电网运行经济性和鲁棒性上的优越性。

关键词:微电网;日前调度;源荷不确定性;分布鲁棒优化;延迟约束生成

Day-ahead dispatch of microgrids with source-load uncertainty by adaptive distributionally robust optimization

ZHOU Huahao¹, LIU Fangbai¹, WU Haiyu¹, CHEN Hao¹, NI Yajia¹, QU Kaiping²

(1. Yancheng Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224000, China;
2. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A day-ahead dispatch model for microgrids under source-load uncertainty conditions is established to enhance their economical effectiveness. In view of the source-load uncertainty composed of photovoltaic power and demand, a novel adaptive optimization decision-based distributionally robust optimization is proposed to overcome the conservativeness of traditional robust optimization. Firstly, a conservativeness-adjustable ambiguous set of source-load uncertainty is constructed, which can flexibly adjust the conservatism through distribution constraints. Meanwhile, auxiliary uncertainty variables are introduced to transform the ambiguous set into a manageable form. Secondly, leveraging the duality principle of infinite programming and fixing the dual variables, the distribution uncertainty is reduced to scenario uncertainty. Finally, employing an extreme dual variable generation method, the proposed model is converted into a deterministic programming in a two-stage solving framework. Numerical simulations verify the superiority of the proposed model in balancing the economical effectiveness and robustness of microgrid operations.

Key words: microgrid; day-ahead dispatch; source-load uncertainty; distributionally robust optimization; delayed constraint generation

0 引言

为深入推进“双碳”目标,电力系统逐渐向高比例新能源渗透的新型电力系统发展^[1]。微电网作为一种多能耦合的分布式能源系统,可通过协调各种可调资源的灵活调度,有力支撑新能源的本地消纳。作为多时间尺度调度中的重要一环,微电网日前调度^[2]能够提前考虑日前、日内电力现货市场的价格变化,协调售电计划与可调节资源功率,从而

降低系统的运行成本,并促进新能源的就地利用。

针对微电网日前调度问题,已有较多学者在模型建立、优化方法等方面进行了相关研究。文献[3]提出了含“光-储-充”微电网的日前调度方法。文献[4]构建了孤岛微电网多目标优化框架,并设计了基于乌鸦搜索算法的求解策略。文献[5]针对电动汽车的有序充放电问题,改进了一种多目标分级算法进行求解。然而,上述研究均为确定性优化调度,未考虑源荷不确定性(即新能源和负荷构成的不确定性)。源荷不确定性造成的功率不平衡在日内运行阶段主要通过日内购/售电以及可调节资源的日内调整进行平衡。确定性调度无法考虑日内

购/售电价变化以及可调资源的日内调整,难以保证经济性。

相比之下,考虑源荷不确定性的日前调度可提前纳入微电网日内运行的变化情况,从而有效降低系统运行成本。常用的随机优化默认不确定性服从历史概率分布并采样,对每个样本建立约束条件并优化这些场景的运行成本均值^[6-7]。随机优化建模简单,但离散的采样场景很难覆盖连续的不确定性分布,随机优化难以保证在非采样场景下的性能。此外,源荷不确定性的真实分布不一定服从历史分布,随机优化在其他分布下的鲁棒性是不足的。

不同于随机优化的离散采样,鲁棒优化假定不确定性在一连续可行域内波动,其利用对偶理论处理不确定性的最恶劣情形,能够提升微电网运行鲁棒性。传统鲁棒优化利用不确定性集描述不确定性场景的变化范围,旨在减少微电网在极端场景下的运行成本^[8]。然而,极端场景难以发生,传统鲁棒优化过分追求调度计划的鲁棒性却往往忽视经济性^[9]。为克服传统鲁棒优化的过度保守性,分布鲁棒优化构造模糊集约束不确定性概率分布的变化范围,旨在降低极端分布下的成本期望值。文献^[10]建立基于 Wasserstein 距离的风电模糊集,并提出利用氢能船舶等移动储能实现对风电的消纳。文献^[11]利用期望、方差等统计信息构建模糊集,并建立多能耦合微电网的分布鲁棒经济运行模型。然而,上述研究将微电网第二阶段决策近似成线性决策^[12],以提高分布鲁棒优化的计算效率。与自适应优化决策^[13]相比,线性决策极大限制了决策变量的优化空间,从而影响调度经济性。为此,本文提出基于自适应优化决策的分布鲁棒优化方法,并将其应用于微电网日前调度中。本文主要贡献如下:

(1) 构建了源荷不确定性条件下的微电网日前分布鲁棒调度模型。微电网通过“源-储-荷”协同优化机制,实现经济运行与新能源消纳。基于自适应分布鲁棒优化处理不确定性条件,建立计及分布约束的源荷不确定性模糊集,以灵活调节分布鲁棒优化的保守性,同时引入辅助不确定性变量将该模糊集转换为易处理形式。

(2) 提出一种基于极端对偶变量生成的两阶段迭代优化求解所提模型。基于无限规划问题的对偶原理处理分布不确定性,同时通过固定住第二阶段问题对偶变量,将分布不确定性问题转化成确定性约束。在两阶段迭代过程中,子问题不断生成第二阶段问题的极端对偶变量,而主问题逐步纳入这些极端对偶变量并更新对日前调度计划的约束,两个问题相互交换变量并迭代至收敛。

1 微电网日前调度

如图1所示,一个典型的微电网由微型燃气轮机、光伏、储能、需求响应负荷和常规负荷组成。微电网可通过自身内部资源的优化调控以及与上级电网的电力交互,实现其运行成本最小化。

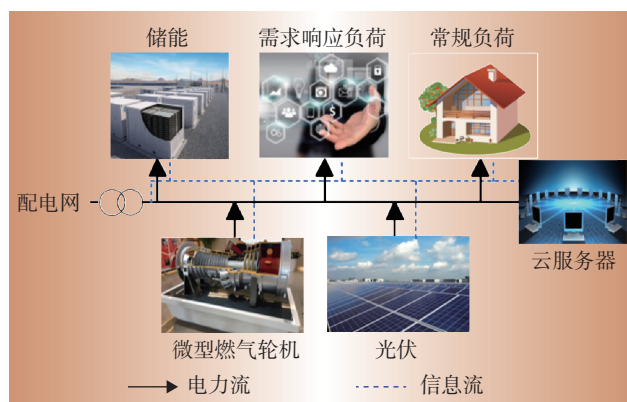


图1 典型微电网架构

Fig. 1 Architecture of a typical microgrid

1.1 日前/日内问题建模

微电网运行成本包括日前与日内运行成本。运行约束包括日前与日内运行约束。在日前阶段,微电网在日前电力市场中进行交易,使得日前电力交易成本最小,如此构成第一阶段问题,微电网日前电力交易成本和交易电量满足上下限约束

$$F_1 = \min \sum_t p_t P_t^T \quad (1)$$

$$\underline{P}^T \leq P_t^T \leq \bar{P}^T \quad (2)$$

式中: t 为调度时段; p_t 为日前电价; P_t^T 为微电网日前交易电量。

在日内运行阶段,微电网调整与外部电网的电力交易功率以及自身内部的各资源调度方案,促使电力交易费用、燃气轮机成本,以及储能成本之和最小,如此构成第二阶段问题

$$F_2 = \min \sum_t (\varphi_t^+ \delta_t^+ - \varphi_t^- \delta_t^-) + \sum_t C(P_t^G) + \sum_t c_t (P_t^{S+} + P_t^{S-}) \quad (3)$$

$$C(P_t^G) = a P_t^G + b \quad (4)$$

式中: φ_t^+/φ_t^- 为微电网日内购/售电价格; δ_t^+/δ_t^- 为微电网日内购/售电量; P_t^G 为微型燃气轮机功率; $C(\cdot)$ 为其发电成本; c_t 为储能的运维价格; P_t^{S-} 和 P_t^{S+} 分别为其放电和充电功率。

微电网日内运行需满足如下安全约束

(1) 光伏与常规负荷

$$P_t^V = \bar{P}_t^V + u_t^V, \quad P_t^D = \bar{P}_t^D + u_t^D \quad (5)$$

即光伏与常规负荷的真实功率等于期望值与

波动之和。

(2) 微型燃气轮机

微型燃气轮机满足功率上、下限约束

$$\underline{P}^G \leq P_t^G \leq \bar{P}^G \quad (6)$$

(3) 储能

$$\underline{P}^{S,+} \leq P_t^{S,+} \leq \bar{P}^{S,+} \quad (7)$$

$$\underline{P}^{S,-} \leq P_t^{S,-} \leq \bar{P}^{S,-} \quad (8)$$

$$S_t = S_{t-1} + \eta^+ P_t^{S,+} \Delta t - P_t^{S,-} / \eta^- \Delta t \quad (9)$$

$$\underline{S} \leq S_t \leq \bar{S} \quad (10)$$

$$S_T = S_0 \quad (11)$$

式中: $\bar{P}^{S,+}$ 、 $\underline{P}^{S,+}$ 、 $\bar{P}^{S,-}$ 和 $\underline{P}^{S,-}$ 为 $P_t^{S,+}$ 和 $P_t^{S,-}$ 的上、下界; S_t 为储能当前的存储电量; η^+/η^- 为充/放电效率; $\bar{S}/\underline{S}$ 为储能储电量上下限,式(11)为储能在调度结束后恢复到初始储电状态。

(4) 需求响应负荷

微电网可根据实时电价动态调整其需求响应负荷的分布,以进一步缩减运行成本

$$\underline{P}_i^{\text{DR}} \leq P_{i,t}^{\text{DR}} \leq \bar{P}_i^{\text{DR}} \quad \forall t \in T_{i,A} \quad (12)$$

$$P_{i,t}^{\text{DR}} = 0 \quad \forall t \in T_{i,B} \quad (13)$$

$$\sum_t P_{i,t}^{\text{DR}} \Delta t = C_i^{\text{DR}} \quad (14)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{DR}}$ 为需求响应负荷 i 转移到 t 时段的负荷; $T_{i,A}$ 和 $T_{i,B}$ 分别为可转移时段和不可转移时段集合。

式(12)将转移负荷限制在上下界内,式(14)为需求响应负荷的转移负荷之和等于总需求 C_i^{DR} 。

(5) 功率平衡

$$P_t^G + P_t^V + P_t^T + \delta_t^+ - \delta_t^- + P_t^{S,-} = P_t^D + P_t^{S,+} + \sum_i P_{i,t}^{\text{DR}} \quad (15)$$

1.2 分布鲁棒模型

对于微电网日前调度,光伏功率波动 u_t^v 和常规负荷 u_t^d 为不确定性变量,即构成源荷不确定性,分布鲁棒调度可总结为两阶段优化问题

$$\min_{x \in \chi} \left\{ c^\top x + \max_{p \in P} E_p[Q(x, u)] \right\} \quad (16)$$

式中: $x \in \chi$ 为预决策变量; $x = \{P_t^T, \forall t\}$; $c^\top x$ 为日前成本; $E_p[Q(x, u)]$ 为日内成本的期望值; u 为源荷不确定性; $p \in P$ 为 u 的概率分布 p 在模糊集 P 内波动。

日内调度问题式(3)一式(15)可总结为

$$\begin{aligned} Q(x, u) = \min_y f^\top y \\ \text{s.t.} \begin{cases} Gy \leq g \\ Ax + By + Cu = d \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: y 为再调整变量; $f^\top y$ 为日内成本。

约束条件中,第一行 G 和 g 为参数矩阵/向量,第二行同理。 $y = \{\delta_t^+, \delta_t^-, P_t^G, P_t^{S,+}, P_t^{S,-}, S_t, P_{i,t}^{\text{DR}}, \forall t\}$ 。

源荷不确定性的模糊集^[11]构建如下

$$P_0 = \left\{ P \begin{cases} \Pr[u \in \Xi_0] = 1 \\ E_p[u] = \tilde{u} \\ E_p[g_k(u)] \leq \tilde{v}_k \quad \forall k \end{cases} \right\} \quad (18)$$

式中:第一行为不确定性 u 在集合 Ξ_0 内波动,第二、第三行分别引入 u 的期望值约束和其他分布约束 g_k 限制概率分布的可能范围,以降低分布鲁棒优化的保守性。

不确定性集 Ξ_0 ,即光伏与常规负荷功率波动场景的最大范围^[8]为

$$\Xi_0 = \left\{ (u_v, u_d) \begin{cases} \underline{u}_v \leq u_v \leq \bar{u}_v \\ \underline{u}_d \leq u_d \leq \bar{u}_d \\ \underline{V} \leq \sum_t u_t^v \leq \bar{V} \\ \underline{D} \leq \sum_t u_t^d \leq \bar{D} \end{cases} \right\} \quad (19)$$

式中:第一和第二行约束单一时段光伏和负荷波动;第三和第四行约束光伏和负荷全时段的波动之和。

分布约束可采用如下形式

$$g_{k,t}(u_t) = \max\{0, u_t - d_{k,t}\} \quad k \in K \quad (20)$$

式中: $d_{k,t}$ 为截断常数; K 为截断数。

由于分布约束的矩信息难以处理,可将分布约束 g_k 替换为一个新的不确定性变量 v ,从而将模糊集转化为

$$P = \left\{ P \begin{cases} \Pr[u \in \Xi] = 1 \\ E_p[u] = \tilde{u} \\ E_p[v_k] \leq \tilde{v}_k \quad \forall k \end{cases} \right\} \quad (21)$$

基于此,不确定性集 Ξ_0 更新为 Ξ

$$\Xi = \left\{ (u, v) \begin{cases} \underline{u} \leq u \leq \bar{u} \\ \underline{\theta} \leq Wu \leq \bar{\theta} \\ u - d_k \leq v_k \leq \bar{v}_k, 0 \leq v_k \quad \forall k \end{cases} \right\} \quad (22)$$

式中: $\bar{v}_k = \max_u g_k(u)$ 。源荷不确定性 u 和辅助不确定性 v 一同构成问题中的不确定性变量。

2 求解方法

2.1 转化为确定性模型

在所提模型(16)中,分布不确定性包含在内层 $\max_{p \in P} E_p[Q(x, u)]$ 中,详细格式为

$$\begin{aligned} Z_p(x) = \max_{p \in P} \int_{\Xi} Q(x, u) f(u, v) d(u, v) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \int_{\Xi} f(u, v) d(u, v) = 1: h_0 \\ \int_{\Xi} u f(u, v) d(u, v) = \tilde{u}: h_u \\ \int_{\Xi} v f(u, v) d(u, v) \leq \tilde{v}: h_v \\ f(u, v) \geq 0, \forall (u, v) \in \Xi \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $f(u, v)$ 为事件 (u, v) 的概率;标量 h_0 ;列向量 h_u 以及矩阵 h_v 分别为各条件的对偶变量。

基于无限规划问题的对偶原理^[14], $Z_p(x)$ 的对偶形式为

$$\begin{aligned} Z_D(x) = & \min_{h_u \geq 0, h_v, h_0} h_u^\top \tilde{u} + \sum_k h_{v,k}^\top \tilde{v}_k + h_0 \\ \text{s.t. } & h_u^\top u + \sum_k h_{v,k}^\top v_k + h_0 \\ & \geq Q(x, u) \quad \forall (u, v) \in \Xi \end{aligned} \quad (24)$$

约束中, 不确定变量 u 最大化约束不可行度, 而成本 Q 最小化约束不可行度, 两者相矛盾。为此, 可将 Q 对偶, 使其变成最大化问题

$$\begin{aligned} Q(x, u) = & \max_{\lambda, \mu} -g^\top \lambda + (Ax + Cu - d)^\top \mu \\ \text{s.t. } & f + G^\top \lambda + B^\top \mu = 0 \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

式中: λ 和 μ 为原问题(17)的对偶变量。

将 Q 替代成对偶形式, 则(24)变换为

$$\begin{aligned} h_u^\top u + \sum_k h_{v,k}^\top v_k + h_0 \geq & Q_i^-(x, u) + \mu_i^\top Cu \\ & \forall (u, v) \in \Xi \quad \forall i \in I \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $Q_i^-(x, u) = -g^\top \lambda_i + (Ax - d)^\top \mu_i$ 独立于不确定性 u ; i 和 I 分别为极端对偶变量的索引与集合。式(25)本质上将对偶变量 λ 和 μ 用其极端值固定, 从而约束中只含不确定性 u 。

基于对偶原理, 将约束(26)等效成确定性约束

$$\begin{cases} -C^\top \mu_i + h_u - \underline{\pi}_i + \bar{\pi}_i - W^\top \underline{\sigma}_i + W^\top \bar{\sigma}_i + \underline{\tau}_i e = 0 \\ h_{v,k} - \underline{\tau}_{i,k} + \bar{\tau}_{i,k} \geq 0 \quad \forall k \\ h_0 - Q_i^-(x, u) + \underline{\pi}_i^\top u - \bar{\pi}_i^\top \bar{u} + \underline{\sigma}_i^\top \underline{\theta} - \bar{\sigma}_i^\top \bar{\theta} \\ - \sum_k \underline{\tau}_{i,k} d_k - \sum_k \bar{\tau}_{i,k} \bar{v}_k \geq 0 \\ \underline{\pi}_i, \bar{\pi}_i, \underline{\sigma}_i, \bar{\sigma}_i, \underline{\tau}_{i,k}, \bar{\tau}_{i,k} \geq 0 \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (27)$$

式中: $\underline{\pi}_i/\bar{\pi}_i, \underline{\sigma}_i/\bar{\sigma}_i, \underline{\tau}_{i,k}/\bar{\tau}_{i,k}$ 为不确定性集 Ξ 中各条件的对偶变量; e 为元素均为1的列向量。

经过式(24)一式(27), 微电网日前分布鲁棒调度(16)最终被变换为

$$\begin{aligned} \min_{x \in X, h_u \geq 0, h_v, h_0, (\sigma, \tau) \geq 0} & c^\top x + h_u^\top \tilde{u} + \sum_k h_{v,k}^\top \tilde{v}_k + h_0 \\ \text{s.t. } & \text{Eq.(27)} \quad \forall i \in I \end{aligned} \quad (28)$$

2.2 极端对偶变量生成

上述转换过程的关键在于确定第二阶段成本 Q 的极端对偶变量。极端对偶变量即第二阶段对偶变量可行域的顶点, 其数目非常庞大。为此, 可将约束式(24)影响最大的极端对偶变量找出, 而当不再新增对偶变量违背约束式(24)时, 该约束变紧。上述极端对偶变量生成算法的详细步骤见外层迭代。该算法构成微电网日前调度的主子问题外层迭代。主问题为微电网分布鲁棒日前调度转化后的确定性问题。子问题确定对约束式(24)影响最大的第二阶段问题对偶变量。主问题优化调度决策 x , 以及极端期望成本对应偶变量 h_0, h_u, h_v , 子问题将这些变量固定为常数, 其是一个双线性问题, 本文利用交替优化^[15]求解, 参考内层迭代。

2.2.1 外层迭代-微电网主子问题交替求解

(1) 初始化: 令外层迭代步 $i=0$, 极端对偶变量的集合 $I=\emptyset$ 。

(2) 求解主问题(28), 确定预决策 x , 极端成本期望值问题的对偶变量 h_u, h_v, h_0 。

(3) 求解子问题(上述变量固定为常数), 得到对约束影响最大的极端变量 (λ, μ)

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, \mu} & h_u^\top u + \sum_k h_{v,k}^\top v_k + h_0 + \\ & g^\top \lambda - (Ax + Cu - d)^\top \mu \\ \text{s.t. } & f + G^\top \lambda + B^\top \mu = 0, \lambda \geq 0 \quad (u, v) \in \Xi \end{aligned} \quad (29)$$

(4) 如果子问题目标值 $f_{\text{sub}} \geq -\varepsilon_1$, 迭代收敛; 否则, 将新确定的极端对偶变量 (λ, μ) 并入到集合 I , 更新 $i=i+1$, 并回到第2步。

2.2.2 内层迭代-子问题凸化求解

(1) 初始化: 令内层迭代步 $j=0$, 以及不确定性变量 u_0 为期望值。

(2) 将不确定性固定为 $u=u_j$, 求解子问题

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, \mu, (u_j, v) \in \Xi} & h_u^\top u_j + \sum_k h_{v,k}^\top v_k + h_0 + \\ & g^\top \lambda - (Ax + Cu_j - d)^\top \mu \\ \text{s.t. } & f + G^\top \lambda + B^\top \mu = 0 \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (30)$$

式(30)问题确定 u_{j+1} , 目标值为 SA_{j+1} 。

(3) 将对偶变量固定为 $u=u_{j+1}$, 求解子问题

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, (u, v) \in \Xi} & h_u^\top u + \sum_k h_{v,k}^\top v_k + h_0 + \\ & g^\top \lambda - (Ax + Cu - d)^\top \mu_{j+1} \\ \text{s.t. } & f + G^\top \lambda + B^\top \mu_{j+1} = 0 \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

式(31)问题确定 u_{j+1} , 目标值为 SB_{j+1} 。

(4) 若满足 $|SA_{j+1} - SB_{j+1}| \leq \varepsilon_2 SB_{j+1}$, 迭代收敛, 添加极端对偶变量 (λ, μ) 到集合 I ; 若不满足, 则更新 $j=j+1$, 并回到第2步。

2.3 算法适应性分析

所提算法的计算复杂度与主问题类型(即第一阶段决策有无整数变量), 以及第二阶段问题极端对偶变量的规模有关。本文模型第一阶段无整数决策变量, 且由于本文微电网涉及的可调资源种类不是很多, 第二阶段问题对偶变量的可行域不算特别复杂, 因此极端对偶变量规模不是非常庞大。考虑到日前调度对于求解时间的容忍度较高, 本文方法可适应一般微电网系统。对于更加复杂的微电网系统, 可通过两种策略来降低计算复杂度: ① 将第二阶段决策近似成线性决策, 从而将微电网两阶段调度问题转化为单阶段问题。② 降低第二阶段问题时段耦合程度, 即减小第二阶段问题优化规模。微电网时段间耦合主要体现在需求响应负荷和储能, 可对这两种资源进行相应处理。

3 仿真分析

构造如图1所示的典型微电网作为仿真算例以验证所提微电网日前分布鲁棒优化调度的有效性。日前调度周期为1天,从早上07:00至第二天凌晨06:00,时间间隔为1 h。所有程序在CPU为Intel(R) Xeon(R) Silver 4216,内存为16 GB的工作站上运行,并利用Cplex进行求解。光伏与常规负荷的预测值分别如图2和图3所示,最大预测误差为预测值的 $\pm 30\%$ 。日前电力交易价格如图4所示。日前优化调度输出最优决策,仿真还需测试日前调度决策在日内阶段的实际运行效果,即样本外表现。具体测试:①历史分布期望成本,即根据历史数据随机抽样3 000个场景并求其均值。②极端分布期望成本,即将日前决策代入问题(16)求得的成本。实际分布一般不会偏离历史分布太远,因而历史分布期望成本可用于评估日前决策在一般情景下的经济性。同时,实际分布又是不确定的,极端分布期望成本可评估日前决策在恶劣情景下的鲁棒性。为方便分析,下文运行结果如无特殊说明,用历史分布即3 000个随机场景下的平均结果来分析。

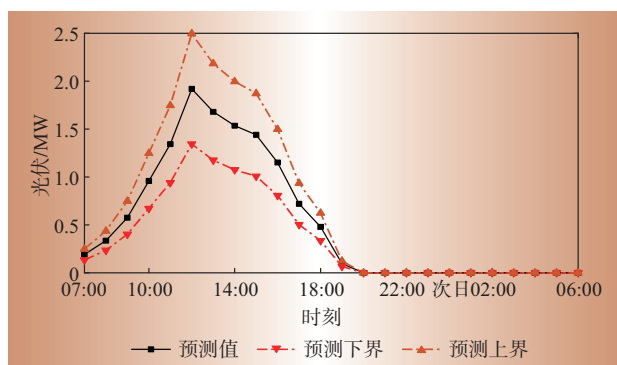


图2 光伏预测信息

Fig. 2 Prediction of photovoltaic power

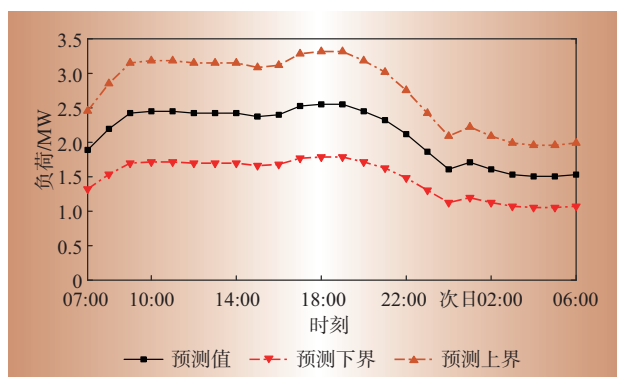


图3 常规负荷预测信息

Fig. 3 Prediction of conventional power demand

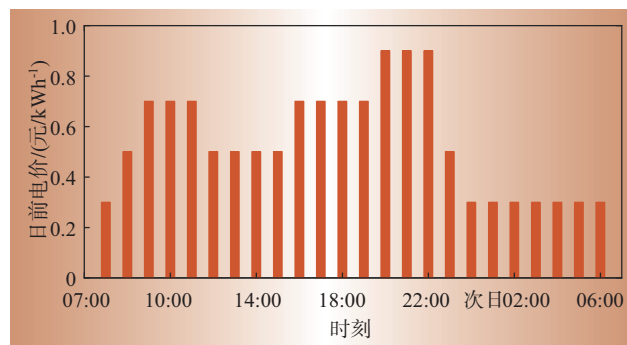


图4 日前电价

Fig. 4 Day-ahead power transaction price

3.1 调度计划分析

在调度模型中,日前预决策 $\mathbf{x} = \{P_t^T, \forall t\}$, 日内再调整变量 $\mathbf{y} = \{\delta_t^+, \delta_t^-, P_t^G, P_t^{S+}, P_t^{S-}, S_t, P_{it}^{DR}, \forall t\}$ 。下文以3 000个场景的平均值对调度计划进行分析。在调度07:00—08:00时段、13:00—15:00时段以及23:00—次日06:00时段,日前电价低于微型燃气轮机发电费用,因此,如图5所示,微电网在此期间尽量从外部进行购电。而在调度09:00—11:00时段和16:00—22:00时段,日前电价大于微型燃气轮机发电费用,因而微电网充分利用微型燃气轮机发电。此外,在调度17:00—22:00时段,由于此时微电网负荷需求较大,而光伏功率又极低,因而日前交易电量和微型燃气轮机功率均维持在较高水平以保证电力供应。需要注意的是,微电网需对源荷不确定性预留一定的备用,因此在某些时段内,日前购电功率或微型燃气轮机的输出功率并不会达到上/下限值。

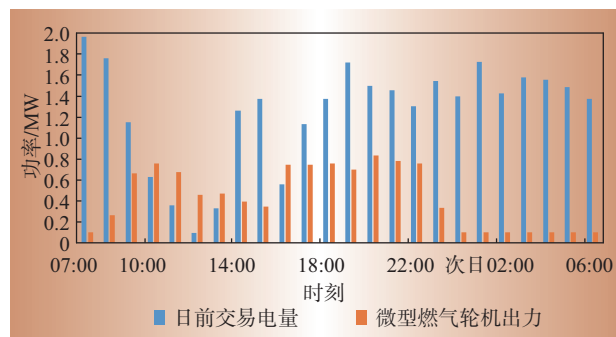


图5 日前交易电量和微型燃气轮机功率

Fig. 5 Day-ahead trading power and outputs of micro gas turbine

图6展示了储能系统的充电/放电功率。在调度07:00—08:00时段和23:00—次日03:00时段,日前电力交易价格最低,微电网尽可能在电力市场上购电,并将多余的电力存储在储能系统中。在调度09:00—11:00时段和16:00—22:00时段,日前电力交易价格较高,而微型燃气轮机的输出功率又处于较高水平,因而微电网从电力市场购买的电力较小,

其利用储能放电以辅助供应负荷。而在 12:00—15:00 时段,光伏发电处于峰值,电力冗余,储能充电。最后,在 04:00—06:00 时段,储能放出少部分电量使得其储电量恢复到初始位置。通过储能的充放电过程,微电网可以更灵活地参与电力交易,从而降低其运行成本。

此外,图 7 展示了需求响应负荷的分布情况。需求响应负荷总的可转移为 14:00—18:00 时段,其主要将负荷分配到交易电价较低的时段 14:00—15:00 时段,从而降低微电网运行成本。

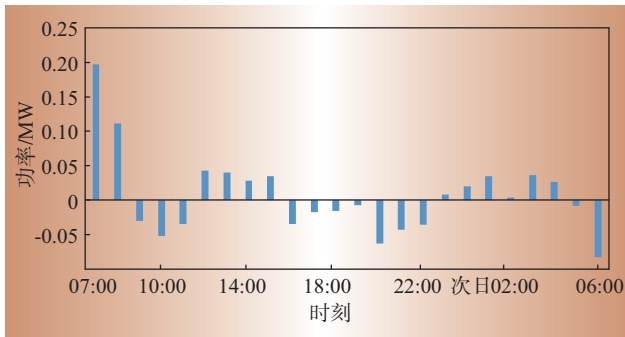


图6 储能充放电功率

Fig. 6 Charging/discharging power of energy storage

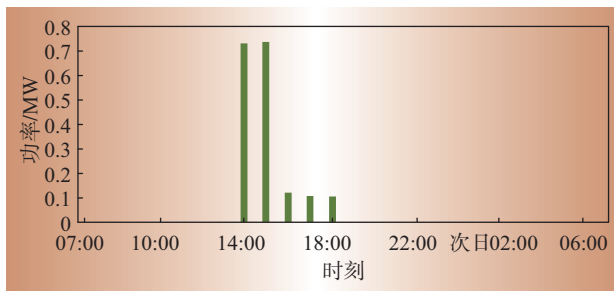


图7 需求响应负荷分布

Fig. 7 Distribution of demand-response load

3.2 确定性与鲁棒模型对比

为说明考虑源荷不确定性的必要性,本节将所提分布鲁棒模型与确定性模型进行比较。确定性模型直接优化预测基准场景下的运行成本。图 8 为确定性模型和所提分布鲁棒模型得到的微电网日内电力市场交易功率情况,其中,正交易功率为微电网从电力市场购电,而负交易功率为向电力市场售电。如图 8 所示,除了少数几个时间段内,确定性模型的日内购/售电均大于分布鲁棒模型。由于日内购/售电价一般大于/小于日前电价^[16],因而确定性模型实际上将增加购电成本并减少售电收入。因此,确定性模型是不经济的。表 1 进一步比较了确定性模型与分布鲁棒模型的优化和运行结果,可

以看出,本文所提出的考虑源荷不确定性的分布鲁棒模型可有效降低微电网运行成本。

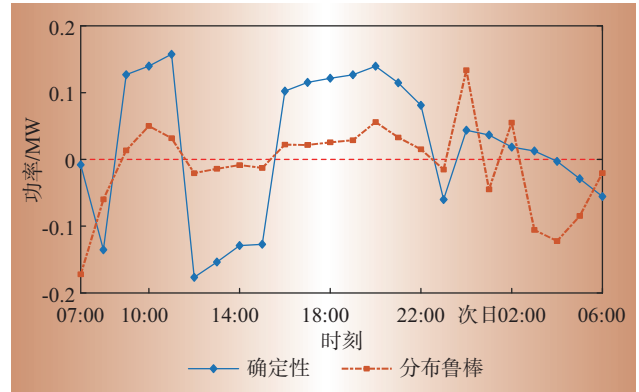


图8 确定性和分布鲁棒模型日内交易功率对比

Fig. 8 Comparison of intraday trading power between deterministic and distributionally robust model

表 1 确定性模型和分布鲁棒模型结果对比

Table 1 Comparison of deterministic model and distributionally robust model

模型	优化结果		运行结果(历史分布)		
	成本/元	耗时/s	日内购电/ MW	日内售电/ MW	成本/元
确定性	21 307	2	1.779 8	1.319 1	22 449
分布鲁棒	22 894	931	0.827 5	1.021 2	22 380

3.3 不确定性方法对比

为评估所采用分布鲁棒优化在平衡鲁棒性与经济性方面的表现,本节将其与常用的随机优化与传统鲁棒优化对比。随机优化、传统鲁棒优化、以及分布鲁棒优化的优化成本分别针对历史分布的成本期望值,极端场景成本和极端分布成本期望值。各方法的优化与运行结果对比如表 2。随机优化针对历史分布,因而其在历史分布下的经济性最优。然而,随机优化在较极端分布下的鲁棒性明显不如分布鲁棒优化。而传统鲁棒优化过度保守,产生较高成本。对于分布鲁棒优化,其历史分布期望成本略高于随机优化,然而其在极端分布下的期望成本明显低于随机优化。考虑到源荷不确定性真实分布一般不会严格服从历史分布,需提高调度决策的鲁棒性来应对分布偏差。同时,分布鲁棒优化可以增加模糊集中的分布约束使其结果逐步逼近随机优化,其灵活性更高。此外,随机优化难以覆盖源荷不确定性的所有场景,在实际应用时难以应对微电网运行风险。综上所述,分布鲁棒优化可权衡微电网运行的鲁棒性与经济性。

表2 不确定性方法对比

Table 2 Comparison of methods for uncertainty

方法	优化结果		运行结果	
	成本/元	耗时/s	历史分布成本/元	极端分布成本/元
随机优化	22 012	7	22 308	23 081
鲁棒优化	29 955	11	23 636	24 055
分布鲁棒优化	22 894	931	22 380	22 894

另一方面,在传统分布鲁棒优化中,微电网的第二阶段决策通常被近似成线性决策,以提高分布鲁棒优化的计算效率。然而,线性决策极大限制了决策变量的优化空间,从而影响日前调度最优性。表3对比了线性决策分布鲁棒优化以及本文所提自适应决策分布鲁棒优化的优化与运行结果,可以看到,尽管本文所提自适应决策分布鲁棒优化计算时间较长,但其优化目标值要明显好于线性决策分布鲁棒优化。考虑到日前调度对于计算时间的要求并不高,自适应决策分布鲁棒优化更具优势。

表3 线性决策和自适应优化决策对比

Table 3 Comparison of linear decision and adaptive optimization-based decision

决策策略	优化成本/元	耗时/s
线性决策	23 308	5
自适应优化决策	22 894	931

3.4 算法收敛性分析

本文分布鲁棒优化方法求解微电网日前调度采用内外层嵌套迭代的方式。其中,外层为主子问题迭代,而内层迭代求解双线性的极端对偶变量子问题。随着外层迭代的进行,整个算法的目标值和耗时如图9所示。由于微电网日前调度是一个多时段问题,第二阶段子问题的极端对偶变量数目较多,分布鲁棒优化方法的迭代次数较多,在60次迭代附近收敛。而对于计算时间,每一次迭代的耗时大约在15 s,其耗时大都集中于子问题的内层迭代中。由于求极端对偶变量子问题是一个非凸的双线性问题,本文利用交替优化对其进行求解,并且为提高求解质量,作者均匀设置10个初始点,最终选择一个最恶劣的结果作为子问题产生的极端对偶变量,并且对于子问题计算时间,作者统计的是10个初始点迭代的总耗时,事实上,若采用并行资源进行计算,分布鲁棒优化方法的总耗时将更少。考虑到日前调度问题对计算时间要求并不高,本文算法的求解时间是能被接受的。

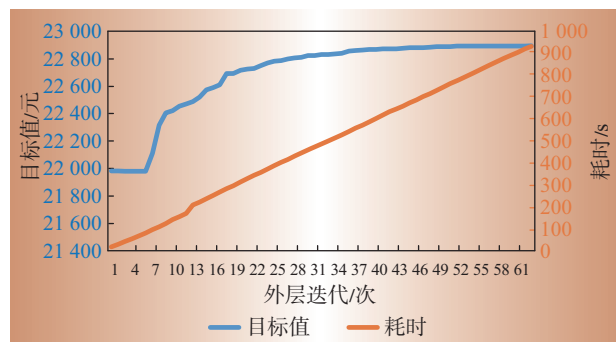


图9 目标值、求解时间与迭代次数的关系

Fig. 9 Relationship between objective value, solving time and iteration steps

4 结束语

本文构建了源荷不确定性条件下的微电网日前分布鲁棒调度模型,并提出一种基于极端对偶变量生成的两阶段迭代优化方法求解该模型。在此日前调度模型中,微电网有效协调电力市场交易电量、微型燃气轮机、新能源、储能和需求响应负荷等调节资源,以提高其经济效益。与确定性模型相比,分布鲁棒调度模型可处理实时功率不平衡和电价波动,从而降低微电网运行成本。通过与随机优化和传统鲁棒优化的对比可知,分布鲁棒优化牺牲一定的历史分布期望成本以提高其鲁棒性,同时,分布鲁棒优化可通过增加模糊集中的分布约束使其结果逐步逼近随机优化,其灵活性更高。最后,与传统的基于线性决策的分布鲁棒优化相比,本文所提基于自适应优化决策的分布鲁棒优化经济性明显更优。

本文模型针对微电网基础模型,未来将考虑更多的调节资源包括电动汽车等提高模型的适用性。此外,针对分布鲁棒调度第二阶段含整数决策变量的问题,作者也将在今后工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [2] 姜建国,韩锦涛,毕洪波,等. 基于混合正余弦算子改进鲸鱼算法的微电网优化运行[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(2): 42-47.

- JIANG Jianguo, HAN Jintao, BI Hongbo, et al. Microgrid optimization based on hybrid sine and cosine operators improved whale algorithm [J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(2):42-47.
- [3] 郭杉,郭洋,刘小恺,等. 含光-储-充的微电网日前经济调度方法研究[J]. 山东电力技术,2025,52(3):1-11.
- GUO Shan, GUO Yang, LIU Xiaokai, et al. Research on the day-ahead economic dispatch method of microgrid including solar-ESS-EV [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(3):1-11.
- [4] 黄景光,陈波,林湘宁,等. 基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 162-168.
- HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):162-168.
- [5] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17):55-62.
- HOU Hui, XUE Mengya, CHEN Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17):55-62.
- [6] 姜宇,陈翔宇,傅守强. 计及风电功率相关性的微电网日前随机优化调度方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1):46-54.
- JIANG Yu, CHEN Xiangyu, FU Shouqiang. Day-ahead stochastic optimization method of microgrid considering the correlation of wind power [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1):46-54.
- [7] 梁海峰,徐力,杨鹏伟,等. 考虑需求响应的交直流微电网多时间尺度随机优化调度[J]. 华北电力大学学报, 2025, 52(3):21-31.
- LIANG Haifeng, XU Li, YANG Pengwei, et al. Multi-time scale stochastic optimal scheduling of AC-DC hybrid microgrid considering demand response [J]. Journal of North China Electric Power University, 2025, 52(3): 21-31.
- [8] 魏斌,乔森,孟润泉,等. 基于数据驱动不确定集的微电网两阶段鲁棒优化调度[J]. 高电压技术, 2025, 51(2):852-863.
- WEI Bin, QIAO Sen, MENG Runquan, et al. Two-stage robust optimization scheduling of microgrids based on data-driven uncertain sets [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2):852-863.
- [9] 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):2 608-2 627.
- DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin. Research review on optimal scheduling considering wind power uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7):2 608-2 627.
- [10] 侯慧,甘铭,吴细秀,等. 考虑移动氢能存储的港口多能微电网两阶段分布鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8):3 078-3 092.
- HOU Hui, GAN Ming, WU Xixiu, et al. Two-stage distributionally robust optimal scheduling for port multi-energy microgrid considering mobile hydrogen energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8):3 078-3 092.
- [11] ZHANG K, TROITZSCH S, HAN X. Distributionally robust co-optimized offering for transactive multi-energy microgrids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143:108 451.
- [12] ZHAI J, WANG S, GUO L, et al. Data-driven distributionally robust joint chance-constrained energy management for multi-energy microgrid [J]. Applied Energy, 2022, 326:119 939.
- [13] ZHENG X, KHODAYAR M E, WANG J, et al. Distributionally robust multistage dispatch with discrete recourse of energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(6):6 960-6 973.
- [14] QU K, CHEN Y, ZHAO C. Approximately adaptive distributionally robust optimization for energy and reserve dispatch [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(3):1 762-1 775.
- [15] LI P, YANG M, WU Q. Confidence interval based distributionally robust real-time economic dispatch approach considering wind power accommodation risk [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1):58-69.
- [16] 刘一欣,郭力,王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4 013-4 022.
- LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14):4 013-4 022.

作者简介:

周华皓(1995),男,江苏东台人,硕士研究生,研究方向为智能用电技术、负荷管理研究;

瞿凯平(1993),男,江苏泰州人,博士,讲师,研究方向为电力系统优化运行研究。

(责任编辑 方德康)