

计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法

白浩¹, 袁智勇¹, 周长城¹, 潘姝慧¹, 叶琳浩², 蔡建逸¹

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 配电网中分布式电源的出力由于波动具有不确定性与相关性, 会对配电网的调度方案产生深远影响。为了研究新能源出力的波动对配电网在最大供电能力下调度方案的影响, 采用数据驱动技术构建了新能源出力不确定集。随后构建了考虑新能源出力最差情况下的配电网双层鲁棒优化调度模型。下层模型以发电成本最低为目标, 使得调度结果具有较好的经济性。上层模型考虑新能源出力不确定性最差情况, 使得调度结果具有较强的鲁棒性。通过 KKT 条件将双层模型简化为单层, 并以重复潮流法进行迭代, 最终得到计及新能源波动的配电网最大供电能力调度方法。通过仿真验证了该算法的有效性与经济性, 并得到了提高配电网最大供电能力的运行策略。

关键词: 新能源; 鲁棒分析; 不确定性; 数据驱动; 双层优化调度

Dispatching method of maximum power supply capacity of a power distributed network considering fluctuation and correlation of renewable energy

BAI Hao¹, YUAN Zhiyong¹, ZHOU Changcheng¹, PAN Shuhui¹, YE Linhao², CAI Jianyi¹

(1. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510663, China;

2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The uncertainty and correlation of distributed renewable energy generators caused by fluctuation has a large impact on power distribution system dispatch. To study the impact on the dispatch strategy of the distribution system considering maximum power supply capacity, this paper builds an uncertainty set of renewable energy output using a data-driven technique. A bi-level robust optimization dispatch model is established considering the worst scenario of renewable energy output. The lower model aims to minimize the generating cost and thus improves the economy of the dispatch strategy. The upper model takes the worst scenario of the renewable energy output into account and improves the robustness of the dispatch strategy. The proposed bi-level model is simplified into a single model by KKT conditions. Then, the single model considers the uncertainties of renewable energy and the maximum power supply capacity and uses a repeat power flow algorithm. The simulation results demonstrate that the proposed method is effective and economical, and helps to improve the maximum power supply capacity of the distribution system.

This work is supported by the Science and Technology of China Southern Power Grid (No. ZBKJXM20180068).

Key words: new energy; robust analysis; uncertainty; data-driven; bi-level optimization

0 引言

随着环境问题的不断恶化与可再生能源技术的发展, 以风能、太阳能为代表的可再生能源在配电网中接入的比例不断增加。随着高比例的分布式可再生能源接入配电网, 其特有的不确定性与波动性给电网的安全稳定运行带来了极大的挑战^[1-8]。因此, 考虑新能源出力不确定性的配电网调度方案能

较为全面地掌握配电网的供电能力^[9]。随着电力市场化改革的推进, 市场化环境对电力系统的供电可靠性、稳定性提出了更高的要求, 因此, 提升配电网的最大供电能力, 对保障其在市场环境下的安全稳定运行具有重要意义^[10]。

国内外学者对未考虑可再生能源并网的传统配电网供电能力进行了大量研究^[11-12]。对于含高渗透率分布式新能源电源的配电网, 研究重点在于考虑新能源出力不确定性对电网安全稳定运行带来的影响。文献[13]通过计算风电与光伏的时序特性曲

线预测其出力, 基于大量统计数据总结了新能源出力规律。文献[14]建立了含分布式电源配电网中不确定因数的盲数模型, 结合重复潮流法计算了基于盲数理论的供电能力评估指标。该方法避免了分布估计时引入的不确定性, 实用性较强。文献[15]基于拉丁超立方采样与蒙特卡罗模拟, 采用变步长重复潮流法计算了配电网的供电能力。上述研究均需要利用大量的新能源出力数据研究其不确定性, 当数据量较少时实验精度会受到影响。针对这一问题, 本文采用不确定集描述新能源出力不确定性, 大大降低了算法对新能源出力数据量的需求。鲁棒分析在处理不确定性方面具有较好的效果, 许多研究用其处理电力系统中的不确定因素均取得了良好的效果^[16-18]。

因此, 本文基于鲁棒分析构建了计及新能源出力波动与相关性的双层模型。该模型采用数据驱动技术构建了新能源出力不确定集进行描述, 充分利用了新能源出力历史数据。求解过程中通过 KKT 条件解耦, 将双层模型转换为单层模型, 简化了求解过程。随后通过变步长重复潮流法增加节点负荷, 最终求得配电网在最大供电能力下的调度方案。对改进的 IEEE33 节点配电网系统进行的仿真实验结果表明, 本文所提的双层鲁棒优化调度模型, 上层模型保证了调度场景选取的鲁棒性, 下层模型保证了调度方案的经济性。

1 双层模型构建

1.1 目标函数

构建计及新能源波动与相关性的电网优化调度双层模型时, 下层目标函数为配电网的总体出力成本, 为最小优化问题。配电网可以通过与主网相连的节点与主网进行电能交互, 由于文中设定配电网分布式电源装机容量小于负荷总量, 不会出现配电网向主网返送电的情形。因此, 下层模型中的目标函数只包含配电网从主网的购电成本, 不包含配电网向主网的售电收益。下层模型目标函数 F_{down} 为

$$F_{\text{down}} = \sum_{t=1}^T (C_M^t \cdot P_t^M + \sum_{j=1}^{N_{\text{T DG}}} C_{j,t}^{\text{T DG}} (P_{j,t}^{\text{T DG}})) \quad (1)$$

式中: T 为调度时段; C_M^t 为 t 时刻主网的购电电价; P_t^M 为 t 时刻配电网从主网购电的购电量; $N_{\text{T DG}}$ 为配电网中传统的分布式电源的数量; $C_{j,t}^{\text{T DG}}$ 为传统分布式电源的发电成本; $P_{j,t}^{\text{T DG}}$ 为传统分布式机组的发电量。对于传统的燃煤、燃气机组, 发电成本与有功出力的函数关系为

$$C_{i,t}^{\text{T DG}} (P_{i,t}^{\text{T DG}}) = \alpha_i \cdot (P_{i,t}^{\text{T DG}})^2 + \beta_i \cdot P_{i,t}^{\text{T DG}} + \gamma_i \quad (2)$$

式中, α_i 、 β_i 与 γ_i 为机组的成本系数, 可由实验获得。

在构建上层优化的目标函数时, 由于本模型基于鲁棒分析, 考虑新能源出力最差情况下的优化调度问题, 上层目标函数应对新能源的出力偏差进行惩罚。 F_{up} 表达式为

$$F_{\text{up}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ng}}} \sum_{t=1}^T C_{i,t}^n \cdot \Delta P_{i,t}^N \quad (3)$$

式中: N_{ng} 为分布式新能源电源的数量; T 为调度时段; $C_{i,t}^n$ 为新能源出力与预期出力相差的惩罚电价; $\Delta P_{i,t}^N$ 为新能源电源 i 在 t 时刻的出力与预期的偏差绝对值。

上层模型考虑了新能源出力最差情况, 为最大优化问题; 下层模型以经济最优为目的对配电网的调度进行优化, 为最小优化问题。因此建立如下双层模型:

$$F = \max_{\Delta P_{i,t}^N} \{F_{\text{up}} + \min_{P_t^M, P_{j,t}^{\text{T DG}}} F_{\text{down}}\} \quad (4)$$

1.2 约束条件

现对下层模型的约束条件进行分析。

1) 功率平衡约束

$$P_t^M + P_{i,t}^N + P_{i,t}^{\text{T DG}} + P_{mi,t} = P_{in,t} + P_{i,t}^L \quad (5)$$

式中: P_t^M 仅在与主网互联的节点处存在; $P_{i,t}^N$ 为 t 时刻 i 节点的新能源发电量, 仅在含新能源的节点处存在; $P_{i,t}^{\text{T DG}}$ 为 t 时刻 i 节点的传统分布式电源的发电量, 仅在含分布式电源的节点处存在; $P_{mi,t}$ 为 t 时刻流入节点 i 的有功; $P_{in,t}$ 为 t 时刻流出节点 i 的有功; $P_{i,t}^L$ 为 t 时刻节点 i 的负荷量。

2) 机组最大最小出力约束

$$P_{\min}^{\text{T DG}} \leq P_{i,t}^{\text{T DG}} \leq P_{\max}^{\text{T DG}} \quad (6)$$

式中: $P_{\max}^{\text{T DG}}$ 与 $P_{\min}^{\text{T DG}}$ 分别为传统分布式机组出力的上下限; $P_{i,t}^{\text{T DG}}$ 为传统机组 i 在 t 时刻的出力。

3) 机组爬坡约束

$$P_{\max}^{\text{down}} \leq P_{i,t}^{\text{T DG}} - P_{i,t-1}^{\text{T DG}} \leq P_{\max}^{\text{up}} \quad (7)$$

式中, $P_{\max}^{\text{up}}$ 与 $P_{\max}^{\text{down}}$ 分别为爬坡功率的上下限。

4) 线路潮流约束

$$-P_{ij,\max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,\max} \quad (8)$$

式中, $P_{ij,\max}$ 为线路之间允许通过的最大潮流。定义潮流由标号小的节点流向标号大的节点为正向, 反之潮流为负值。

上层模型考虑了新能源出力的惩罚电价, 因此约束条件为新能源电源出力约束条件。对于分布式

新能源电源, 按其预期出力计算所得调度结果的鲁棒性将较差。因此, 有必要考虑其出力的不确定性。

5) 不确定性约束: 本模型采用数据驱动算法构建新能源出力不确定集^[10], 数据驱动的方法见 2.1 节。对于由数据驱动得到的不确定边界 $P_{i,t,\min}^N$ 与 $P_{i,t,\max}^N$, 由式(9)一式(12)构建鲁棒分析不确定集。

$$(1 - z_{i,t}^-) \cdot \overline{p_{i,t}} + z_{i,t}^- \cdot P_{i,t,\min}^N \leq P_{i,t}^N \leq (1 - z_{i,t}^+) \cdot \overline{p_{i,t}} + z_{i,t}^+ \cdot P_{i,t,\max}^N \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_t z_{i,t}^+ + z_{i,t}^- \leq \Gamma \quad (10)$$

$$z_{i,t}^+ + z_{i,t}^- = 1; \forall i, t \quad (11)$$

$$z_{i,t}^+, z_{i,t}^- \in \{0, 1\} \quad (12)$$

式中: $\overline{p_{i,t}}$ 为其期望; $z_{i,t}^+$ 与 $z_{i,t}^-$ 为二进制变量, 当其取值为 1 时, 分别代表新能源出力高于预期功率和低于预期功率, 为 0 时则表示不高于与不低于预期功率; Γ 表示保守性系数, 数值越大调度方案的鲁棒性越强。通过调整 Γ 值的大小, 可以得到不同风险性下的调度方案。

2 鲁棒模型求解

2.1 数据驱动求解不确定集

对于采样得到的长度为 n 的新能源出力数据上界 $\overline{P_k^N}$ 与下界 $\underline{P_k^N}$, 其服从的真实累积分布函数 $F(P_k^N)$ 虽然未知, 但满足在 $\overline{F(P_k^N)}$ 与 $\underline{F(P_k^N)}$ 两条曲线之间波动, 因此对历史数据进行驱动可得到新能源出力的统计特性。文献[19]证明了独立采样于相同连续分布时, $F(P_k^N) \sim \beta(k, n-k+1)$ 。给定重要性系数 $1-\alpha'$, β 分布的参数 α 定义为

$$\alpha = \exp \left(\frac{-c_1(\alpha') - c_2(\alpha') \sqrt{\ln[\ln(n)]}}{-c_3(\alpha') [\ln(n)]^{c_4(\alpha')}} \right) \quad (13)$$

式中: $c_1(\alpha') = -2.75 - 1.04 \ln(\alpha')$, $c_2(\alpha') = 4.76 - 1.20 \alpha'$, $c_3(\alpha') = 1.15 - 2.39 \alpha'$, $c_4(\alpha') = -3.96 + 1.72(\alpha')^{0.171}$ 。累积分布 $F(P_i^N \leq P_k^N)$ 的上下限 $f(\overline{P_k^N})$ 与 $f(\underline{P_k^N})$ 满足

$$\begin{cases} f(\overline{P_k^N}) = \beta_{n,k}^{\alpha/2} \\ f(\underline{P_k^N}) = \beta_{n,k}^{1-\alpha/2} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\beta_{n,k}^{\alpha/2}$ 表示 $\beta(k, n-k+1)$ 分布的 α 分位数。累计分布的上下界曲线为

$$\begin{cases} \underline{F(P_k^N)} = \max\{f(\underline{P_k}): P_k \leq \underline{P_k^N}\} \\ \overline{F(P_k^N)} = \min\{f(\overline{P_k}): P_k \geq \overline{P_k^N}\} \end{cases} \quad (15)$$

当新能源出力历史数据的样本逐渐增大时, $\underline{F(P_k^N)}$ 与 $\overline{F(P_k^N)}$ 两条曲线将逐渐逼近真实新能源出力累积概率分布。由于对于相同的 P_k^N , $\overline{F(P_k^N)}$ 位于 $\underline{F(P_k^N)}$ 上方, 因此对于给定的风险概率 R , $P_{i,t,\min}^N$ 为 $\overline{F(P_k^N)}$ 的下 R 分位数, $P_{i,t,\max}^N$ 为 $\underline{F(P_k^N)}$ 的上 R 分位数^[20-21]。利用数据驱动技术确定不确定性边界的过程如图 1 所示。对由数据驱动得到的 $P_{i,t,\min}^N$ 与 $P_{i,t,\max}^N$, 将其代入式(9)即可构建上层新能源出力不确定集。

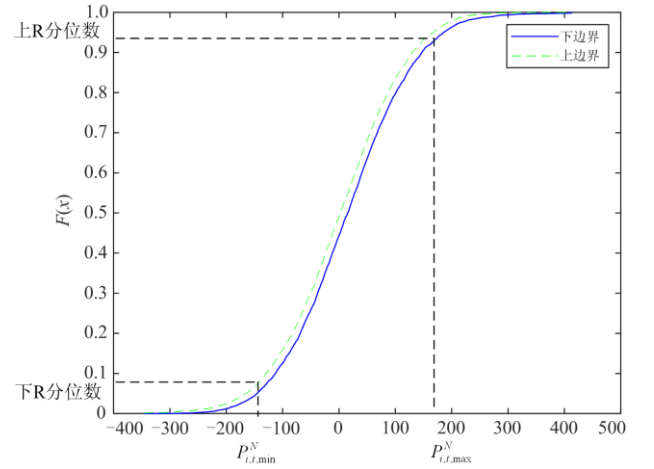


图 1 数据驱动确定不确定边界

Fig. 1 Determine the boundary using data driven

2.2 自适应步长重复潮流法

重复潮流法是求解最大供电能力的经典算法。通过不断增加各节点的负荷量计算配电网中的潮流情况进行迭代过程。当约束条件出现越限情况时, 说明系统的供电能力达到最大, 此时的配电网达到最大供电能力。在增加负荷的过程中, 可以根据需要整体增加所有节点或局部节点的负荷量, 以研究针对整体或部分节点的供电能力。本文采用自适应步长重复潮流法计算配电网最大供电能力, 负荷增加的步长随求解结果自适应变化。在迭代过程中, 以固定步长 Δp 增加负荷时, 如果出现越限情况, 则在上次迭代的基础上以 $\Delta p/2$ 为新步长。重复上述过程直至步长达到精度要求, 结束迭代。

2.3 最大供电能力下配电网调度求解流程

本文算法的流程见图 2, 具体步骤如下:

1) 根据配电网中分布式新能源电源出力参数与历史数据, 利用数据驱动构建确定新能源出力不确定集, 确定考虑新能源出力最差情况的上层调度模型。根据配电网中各分布式能源发电成本参数, 构建最小化配电网调度成本的下层调度模型。得到

双层鲁棒优化模型。

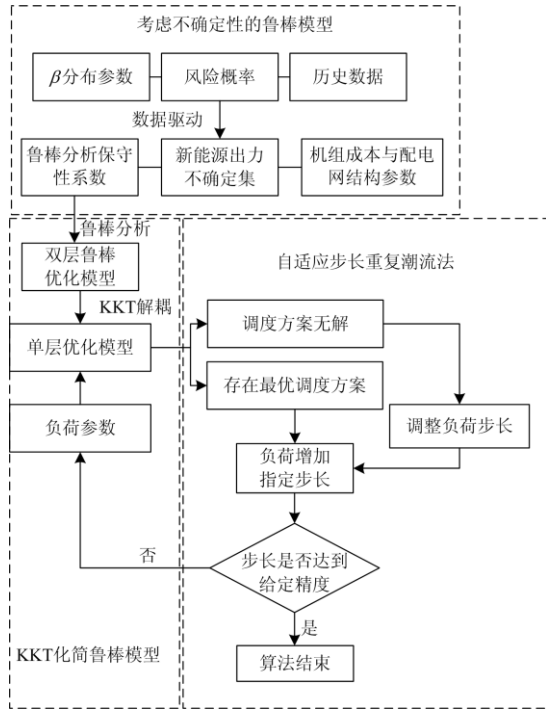


图2 本文算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm proposed in this paper

2) 下层模型的成本函数通常设定为二次函数或一次函数^[22], 其二次项可分段线性化, 因此下层模型为线性规划问题。可采用 KKT 条件将下层模型转换为上层优化问题的约束条件, 进而将双层模型转化为单层模型求解问题。KKT 条件通过引入松弛变量将原约束变为互补松弛条件。对于不等式约束 $g \geq 0$, KKT 条件将增加下列约束:

$$\begin{cases} \mu \cdot g = 0 \\ \mu \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中, μ 为对应于条件 g 的互补松弛变量。通过引入二进制变量 δ 与足够大的正数 M , 可得

$$\begin{cases} 0 \leq g \leq \delta \cdot M \\ 0 \leq \mu \leq (1 - \delta) \cdot M \end{cases} \quad (17)$$

对式(5)一式(8)引入互补松弛变量 $\lambda_{i,t}, \mu_{i,t}^{\min}, \mu_{i,t}^{\max}, \omega_{i,t}^{\min}, \omega_{i,t}^{\max}, \eta_{ij,t}^{\min}, \eta_{ij,t}^{\max}$, 得

$$\begin{cases} P_t^M + P_{i,t}^N + P_{i,t}^{\text{TDG}} + P_{mi,t} = P_{in,t} + P_{i,t}^L : \lambda_{i,t} \\ P_{\min}^{\text{TDG}} \leq P_{i,t}^{\text{TDG}} \leq P_{\max}^{\text{TDG}} : \mu_{i,t}^{\min}, \mu_{i,t}^{\max} \\ P_{\min}^{\text{down}} \leq P_{i,t}^{\text{TDG}} - P_{i,t-1}^{\text{TDG}} \leq P_{\max}^{\text{up}} : \omega_{i,t}^{\min}, \omega_{i,t}^{\max} \\ -P_{ij,\max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,\max} : \eta_{ij,t}^{\min}, \eta_{ij,t}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

新能源不确定性约束为上层最大优化问题的决策变量, 因此不用引入互补松弛变量。根据目标

函数与互补松弛变量, 构造下层模型的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & \sum_{t=1}^T (C_M^t \cdot P_t^M + \sum_{j=1}^{N_{\text{TDG}}} C_{j,t}^{\text{TDG}} (P_{j,t}^{\text{TDG}})) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_b} \lambda_{i,t} \cdot (P_t^M + P_{i,t}^N + P_{i,t}^{\text{TDG}} + P_{mi,t} - P_{in,t} - P_{i,t}^L) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{TDG}}} \mu_{i,t}^{\min} \cdot (P_{i,t}^{\text{TDG}} - P_{\min}^{\text{TDG}}) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{TDG}}} \mu_{i,t}^{\max} \cdot (P_{\max}^{\text{TDG}} - P_{i,t}^{\text{TDG}}) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{TDG}}} \omega_{i,t}^{\min} \cdot (P_{i,t}^{\text{TDG}} - P_{i,t-1}^{\text{TDG}} - P_{\max}^{\text{down}}) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{TDG}}} \omega_{i,t}^{\max} \cdot (P_{\max}^{\text{up}} - P_{i,t}^{\text{TDG}} + P_{i,t-1}^{\text{TDG}}) - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_L} \eta_{ij,t}^{\min} \cdot (P_{ij,t} + P_{ij,\max}) - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_L} \eta_{ij,t}^{\max} \cdot (P_{ij,\max} - P_{ij,t}) \end{aligned} \quad (19)$$

式中: N_b 为配电网节点总数; N_L 为配电网支路总数。根据拉格朗日函数与下层模型的 KKT 条件, 将下层模型转化为上层模型的约束, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} C_M^t = \sum_{i=1}^{N_b} \lambda_{i,t} \\ \frac{\partial C_{j,t}^{\text{TDG}} (P_{j,t}^{\text{TDG}})}{\partial P_{j,t}^{\text{TDG}}} = \lambda_{i,t} + \mu_{i,t}^{\min} - \mu_{i,t}^{\max} + \omega_{i,t}^{\min} - \omega_{i,t}^{\max} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{TDG}} - P_{\min}^{\text{TDG}} \leq \alpha_{\mu,\min} \cdot M \\ 0 \leq \mu_{i,t}^{\min} \leq (1 - \alpha_{\mu,\min}) \cdot M \\ 0 \leq P_{\max}^{\text{TDG}} - P_{i,t}^{\text{TDG}} \leq \alpha_{\mu,\max} \cdot M \\ 0 \leq \mu_{i,t}^{\max} \leq (1 - \alpha_{\mu,\max}) \cdot M \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{TDG}} - P_{i,t-1}^{\text{TDG}} - P_{\max}^{\text{down}} \leq \alpha_{\omega,\min} \cdot M \\ 0 \leq \omega_{i,t}^{\min} \leq (1 - \alpha_{\omega,\min}) \cdot M \\ 0 \leq P_{\max}^{\text{up}} - P_{i,t}^{\text{TDG}} + P_{i,t-1}^{\text{TDG}} \leq \alpha_{\omega,\max} \cdot M \\ 0 \leq \omega_{i,t}^{\max} \leq (1 - \alpha_{\omega,\max}) \cdot M \\ 0 \leq P_{ij,t} + P_{ij,\max} \leq \alpha_{\eta,\min} \cdot M \\ 0 \leq \eta_{ij,t}^{\min} \leq (1 - \alpha_{\eta,\min}) \cdot M \\ 0 \leq P_{ij,\max} - P_{ij,t} \leq \alpha_{\eta,\max} \cdot M \\ 0 \leq \eta_{ij,t}^{\max} \leq (1 - \alpha_{\eta,\max}) \cdot M \end{cases} \quad (20)$$

式中, M 为无穷大, 在实际计算中可取一个较大的数值; $\alpha_{\mu,\min}, \alpha_{\mu,\max}, \alpha_{\omega,\min}, \alpha_{\omega,\max}, \alpha_{\eta,\min}$ 和 $\alpha_{\eta,\max}$ 为引入的二进制变量。式(9)一式(15)与式(20)共同构成单层模型的约束条件。采用 KKT 条件,

原双层优化问题变为单层优化问题,可采用商业优化软件直接求解。

3) 确定重复潮流法中负荷增长步长与精度等参数,采用自适应步长重复潮流法求解最大供电能力下配电网的调度方案^[23]。

3 算例分析

3.1 模型结构

本文采用改进的 IEEE 33 节点配电网系统对算法进行验证,在 13 与 21 节点添加了风电机组,装机容量为 96 kW;在 25 节点添加了光伏设备,装机容量为 50 kW;在 22 与 32 节点添加了传统燃煤机组。配电网的拓扑结构如图 3 所示。风电节点与光伏节点的出力见图 4。

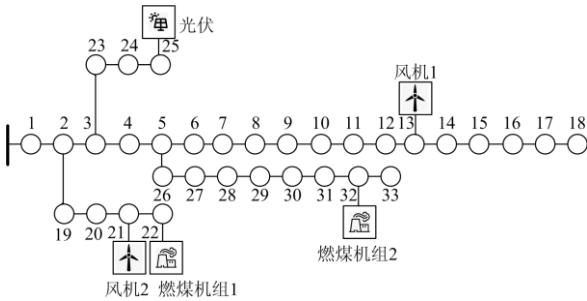


图 3 改进 33 节点配电网

Fig. 3 Improved 33-bus distribution network

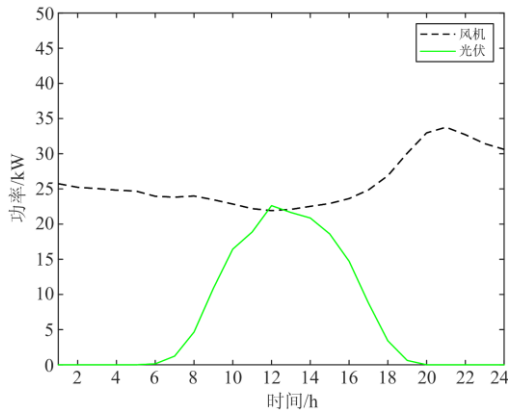


图 4 新能源电源出力曲线

Fig. 4 New energy resources output curve

假定燃煤机组 1、2 的成本函数为一次函数,其一次项系数取值分别为 1.766 美元/kWh 和 1.067 美元/kWh,常数项设定为 0。当配电网与主网进行电力交易时,电力市场中 24 h 内主网的电价如图 5 所示。在选取新能源实际出力与预测偏差惩罚电价时,如果惩罚电价高于主网电价最高值 7 美元/kWh,会导致调度结果忽略主网购电成本;如果惩罚电价过低会导致调度结果忽略出力偏差惩罚成本。因

此,惩罚电价选取与各时段主网电价偏差相对较小的 3 美元/kWh,调度间隔时间 T 取值为 1 h。

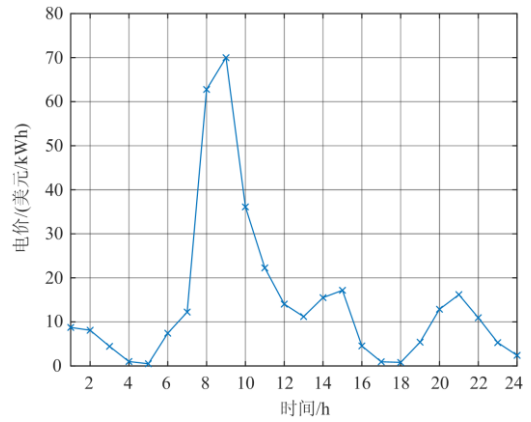


图 5 主网 24 h 电价曲线

Fig. 5 Prices curve in market in 24 h

3.2 仿真分析

1) 不确定性、经济性与最大供电能力分析。不同保守性系数下配电网的调度成本与最大供电能力关系见图 6。从图 6 可以看出,随着保守性系数的提高,调度方案的鲁棒性得到了提高,同时调度成本在逐渐增加。说明为得到鲁棒性较好的调度结果需要提高调度成本,决策者可根据对风险的偏好程度对调度方案的经济性与鲁棒性进行平衡。最大供电能力在保守性系数较小时会随着鲁棒性的提高得到提高,但当鲁棒性达到一定阈值时不会出现增加。这是因为新能源在小范围内波动可以改变配电网中主网购电与分布式电源的出力,进而改善配电网的潮流分布,提高最大供电能力。但这种改善能力有限,当负载增加到一定程度后制约最大供电能力的因素为系统结构与分布式电源参数。此时的新能源波动无法继续提高最大供电能力。

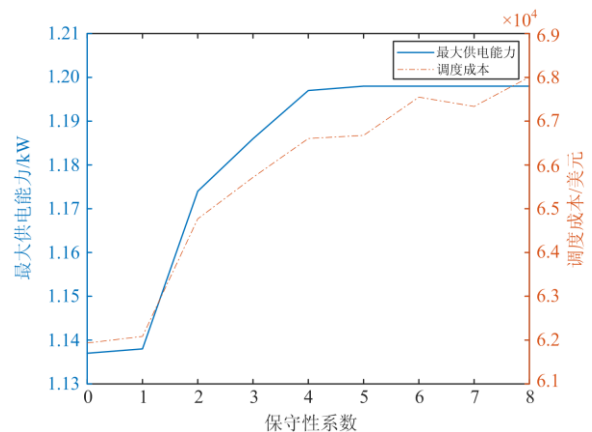


图 6 考虑保守性系数的调度成本与最大供电能力变化曲线

Fig. 6 Curve of dispatch cost and maximum power supply capacity considering conservative coefficients

2) 机组调度方案分析。保守性系数为 8 时配电网在正常负荷水平与最大供电能力下的调度方案如图 7 和图 8 所示。

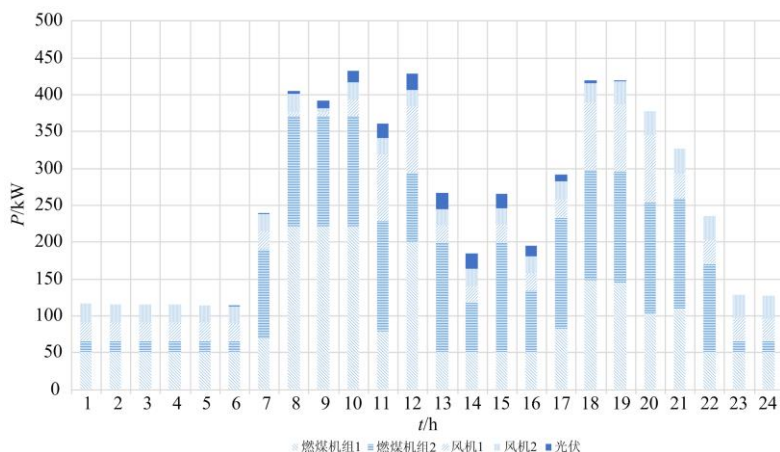


图 7 正常负荷水平下调度方案

Fig. 7 Dispatch scheme with normal power load

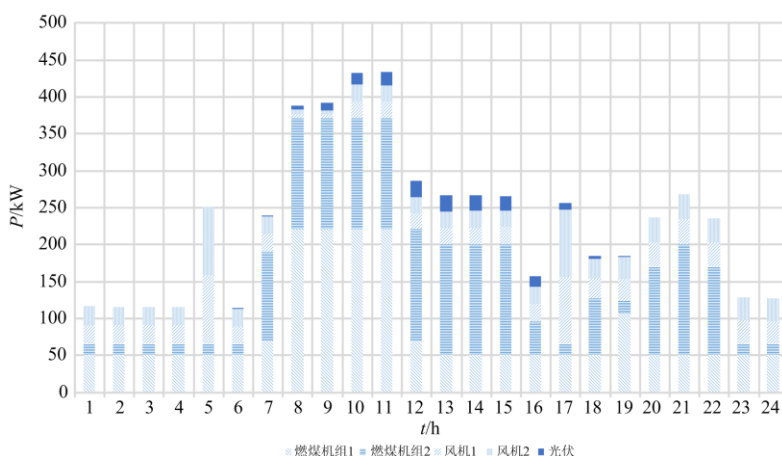


图 8 最大供电能力下调度方案

Fig. 8 Dispatch scheme with maximum power supply capacity

从图 7 可以看出，正常负荷下调度成本最高的方案中风机 1、2 在 8、9 时刻出现了少发，在 5 与 17 时刻出现了超发。从图 8 中可以看出，风机 1 在 8、9 时刻，风机 2 在 9 时刻出现了少发的情况，风机 1 在 11、12、18、19、20 时刻出现了超发情况。这说明在最大供电能力的约束下，新能源出力的正向或反向波动都会增大调度的成本。当主网电价较高时，新能源出力的降低会增加主网购电量，进而增加调度成本。在电价较低的时刻出现供电过剩的现象，会导致从主网购入较为便宜的电量减少，间接增加购电成本，同时惩罚电价的增加也会增加调度成本。

在图 7 中，燃煤机组 2 的出力与主网电价具有较好的相关性，燃煤机组 1 则与主网电价负相关，除了节点电价较高的 8—11 时刻以最大出力运行，

其余时刻基本以最小出力运行。从图 8 可以看出，在主网购电价较高的 8、9、10 时刻，两台燃煤机组均以最大出力运行，随后的 11、13—20 时刻，由于燃煤机组 2 的边际成本低于燃煤机组 1，燃煤机组 2 的出力始终大于机组 1。在 12 时刻由于风机 1 出力增加，为保证电网安全运行，燃煤机组 1 出力短时地大于了机组 2。在其余的时刻由于主网购电价均低于燃煤机组出力，两台机组均以最小出力运行。从燃煤机组的调度方案可以看出分布式机组会对电力市场中的电价做出显著的响应，在电价较高时刻增加自身出力，在电价较低时刻减少出力以获得最大利润。因此，在高渗透率分布式电源的配电网中，电价作为反映电力资源稀缺性的指标对分布式电源的出力调度具有决定性作用。

3) 提升最大供电能力分析。为研究配电网最大

供电能力与受分布式新能源装机容量、位置、出力相关性与最大线路容量等因素影响, 分别将风机 1 与风机 2 的出力提高到原始出力的 1.5 倍与 2 倍, 并用不同相关系数的风电出力替代风机 2 出力, 计算得到不同条件下配电网最大供电能力, 见表 1, 其中风机 2 出力的相关性构建采用了 Cholesky 分解排序法, 算法详细内容见文献[13]。

表 1 不同新能源出力下最大供电能力

Table 1 Maximum power supply capacity under different new energy output

影响因素	改变数值	最大供电能力
风机 1 出力	出力变为 1.5 倍	1.150
	出力变为 2 倍	1.162
风机 2 出力	出力变为 1.5 倍	1.137
	出力变为 2 倍	1.137
风机 2 相关系数	相关系数为 0.8	1.137
	相关系数为 0.6	1.137

从表 1 可以看出, 增加风机 1 出力可以有效改善配电网的最大供电能力。但风机 2 出力的增加无法提高配电网的最大供电能力。对计算过程中的约束条件进行分析, 发现在最大供电能力下节点 2 与节点 3 相连的线路容量到达了临界值, 这说明此时系统的最大供电能力受该线路容量的约束。因此当系统中的负荷总体增加时, 以该线路为界, 提高靠近主网侧节点的新能源出力(风机 2)无法满足远离主网侧节点的负荷需求, 进而导致配电网最大供电能力无法提高。而增加远离主网侧节点的新能源出力(风机 1)则可以满足该侧节点的负荷增长, 对于靠近主网侧节点的负荷需求可以通过主网购电或其他分布式电源的出力提高得到满足。为检验新能源装机位置对配电网最大供电能力的影响, 改变风机 1 的位置, 将其分别移动到节点 3-18、23-24、26-31 并计算配电网最大供电能力, 发现配电网最大供电能力一直为 1.137。该现象与上述结论相符。因为以容量过载线路为界, 在远离主网侧的节点处, 在任意节点增加的新能源出力都能通过远离主网侧的各线路输送到远离主网侧的各节点。从表 1 中可以看出改变风机 2 出力的相关系数, 发现最大供电能力没有发生改变, 这说明最大供电能力与风电出力相关性无关。

综上所述, 配电网的最大供电能力受新能源出力与线路容量约束的共同影响。为提高配电网的最大供电能力, 首先应求得容量达到临界值的线路, 以该线路为界, 增加远离主网侧的分布式新能源出力, 可以提高配电网的最大供电能力。

4 结论

本文构建了计及新能源出力波动及相关性的双层调度模型, 采用变步长重复潮流法得到最大供电能力下的调度策略, 相关结论如下:

1) 采用数据驱动技术构建了新能源出力不确定集, 采用 KKT 条件将双层模型简化为单层, 并利用变步长重复潮流法, 可以高效地得到最大供电能力下的调度策略。

2) 仿真结果表明, 鲁棒性的提高伴随着经济性的下降; 新能源出力在高电价时刻的反向波动与低电价时刻的正向波动都会增大调度的成本。适当增加过载线路远离主网侧的分布式电源出力可以有效提高配电网最大供电能力。

参考文献

- [1] 应益强, 王正风, 吴旭, 等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 38-42.
YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 34-42.
- [2] 宋平凡, 佟胜伟, 段森园. 新能源发电并网对电网电能质量的影响分析[J]. 通信电源技术, 2019, 36(12): 139-140.
SONG Pingfan, TONG Shengwei, DUAN Senyuan. Analysis of the impact of grid-connected new energy generation on power quality of power grid[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(12): 139-140.
- [3] 罗捷, 袁康龙, 钟杰峰, 等. 考虑新能源接入对系统调峰性能影响的随机生产模拟算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 180-187.
LUO Jie, YUAN Kanglong, ZHONG Jiefeng, et al. Probabilistic production simulation algorithm considering new energy's impact on regulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 180-187.
- [4] WU Y, LAU V K N, TSANG D H K, et al. Optimal energy scheduling for residential smart grid with centralized renewable energy source[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2): 562-576.
- [5] WU H, SHAHIDEPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Demand response exchange in the stochastic day-ahead scheduling with variable renewable generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 516-525.
- [6] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [7] 周安平, 杨明, 赵斌, 等. 电力系统运行调度中的高阶不确定性及其对策评述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 173-183.
ZHOU Anping, YANG Ming, ZHAO Bin, et al. Higher-order uncertainty and corresponding strategies of operation

- and dispatching for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 173-183.
- [8] 段偲默, 苗世洪, 霍雪松, 等. 基于动态 Copula 的风光联合出力建模及动态相关性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 35-42.
- DUAN Simo, MIAO Shihong, HUO Xuesong, et al. Modeling and dynamic correlation analysis of wind/solar power joint output based on dynamic Copula[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 35-42.
- [9] 高亚静, 朱静, 程华新, 等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6076-6085.
- GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, et al. Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6076-6085.
- [10] ZHANG Y, LIU K, QIN L, et al. Deterministic and probabilistic interval prediction for short-term wind power generation based on variational mode decomposition and machine learning methods[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 208-219.
- [11] 白浩, 于力, 姜臻, 等. 考虑售电侧放开后的配电网供电能力计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 99-105.
- BAI Hao, YU Li, JIANG Zhen, et al. Calculation method of power supply capacity of a distribution network considering the opening of power sale side[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 99-105.
- [12] 甄国栋, 高新智, 于树刚, 等. 配电网的剩余供电能力实用模型[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3420-3432.
- ZHEN Guodong, GAO Xinzhi, YU Shugang, et al. Practical model of residual power supply capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3420-3432.
- [13] 李振生. 智能电网背景下含分布式电源配电网的最大供电能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- LI Zhensheng. Study on total supply capability of distribution network with DG under the background of smart grid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [14] 张嘉堃, 韦钢, 朱兰, 等. 基于盲数模型的含分布式电源配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 64-70.
- ZHANG Jiakun, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 64-70.
- [15] ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3215-3225.
- [16] 丁浩, 高峰, 刘坤, 等. 基于鲁棒优化的含风电工业微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 160-167.
- DING Hao, GAO Feng, LIU Kun, et al. An economic dispatch model in an industrial microgrid with wind power based on robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 160-167.
- [17] DING T, LIU S Y, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [18] LORCA A, SUN X A. Multistage robust unit commitment with dynamic uncertainty sets and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1678-1688.
- [19] 张津珩, 王旭, 蒋传文, 等. 新型城镇下含热电联产机组的配电网两阶段鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 155-172.
- ZHANG Jinhui, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Two-stage robust optimization of distribution network with combined heat and power units in new-type urbanization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 155-172.
- [20] 汲国强, 吴文传, 张伯明. 考虑风电不确定性的机组检修鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2919-2926.
- JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust optimization method of generator maintenance schedule considering wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2919-2926.
- [21] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119.
- LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119.
- [22] 甘宇翔, 蒋传文, 白宏坤, 等. 市场环境下游区售电商的最优报价和运行优化[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 707-715.
- GAN Yuxiang, JIANG Chuanwen, BAI Hongkun, et al. Optimal bidding strategy and operation of industrial park electricity retailer in electricity market[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 707-715.
- [23] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39, 62.

收稿日期: 2020-06-31; 修回日期: 2020-08-21

作者简介:

白浩(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化、主动配电网和人工智能应用等; E-mail: baihao@csg.cn

袁智勇(1978—), 男, 博士, 教高, 研究方向为智能配电网、微电网等; E-mail: yuanzy1@csg.cn

周长城(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划、运行以及分布式能源并网技术。E-mail: zhoucc@csg.cn

(编辑 周金梅)