

考虑虚拟电厂的售电公司购售电策略优化

余欣梅, 刘升伟, 王星华, 贺小平

引用本文:

余欣梅, 刘升伟, 王星华, 等. 考虑虚拟电厂的售电公司购售电策略优化[J]. 南方能源建设, 2021, 8(S1): 110–116.

YU Xinmei, LIU Shengwei, WANG Xinghua, et al. [Decision-making Optimization of Procurement and Sale Strategies for Power Sales Companies Considering Virtual Power Plants](#)[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(S1): 110–116.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[社区型能源互联网下的虚拟电厂参与电力市场策略分析](#)

Strategy Analysis of Virtual Power Plants Participation in Electric Power Market with Community Energy Internet

南方能源建设. 2019, 6(3): 40–47 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.007>

[基于电网经济效率评估的发电和输电协调规划方法研究](#)

Research on the Coordination Planning Method of Power Generation and Transmission Based on Economic Efficiency Assessment of Power Grid

南方能源建设. 2020, 7(3): 38–45 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.005>

[多种绿色能源形态下的虚拟电厂定价机制研究](#)

Research on Pricing Mechanism of Virtual Power Plants Containing Multiple Green Energy Sources

南方能源建设. 2020, 7(1): 133–139 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.022>

[电能量—调频市场联合优化模式研究](#)

Study on the Joint Optimization Mode of Electric Energy and Regulation Market

南方能源建设. 2020, 7(3): 55–61 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.007>

[基于电力市场改革的典型微网经济分析](#)

Economic Analysis of Typical Micro-grid Based on the Electricity Market Reform

南方能源建设. 2016, 3(4): 18–22 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.004>

考虑虚拟电厂的售电公司购售电策略优化

余欣梅^{1,✉}, 刘升伟², 王星华², 贺小平³

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006;
3. 华润电力(广东)销售有限公司, 广州 510006)

摘要: [目的] 由于售电公司面临着批发侧现货市场电价波动及零售侧用户需求不确定性, 为了平衡收益与风险, 需要确定合理的中长期市场和现货市场购电比例以及面向用户的分时电价。[方法] 利用需求-价格响应曲线模拟售电商在中长期合约市场的博弈行为, 提出基于条件风险价值(CVaR)的交易风险损失指标量化方法。[结果] 通过柔性负荷及分布式发电实现基于虚拟电厂的需求响应, 以平衡电量偏差和现货市场电价波动风险, 在此基础上建立了综合考虑售电公司在批发侧市场的购电策略和零售侧售电收益的双层优化模型, 并利用纵横交叉算法进行优化求解。[结论] 算例仿真结果表明了方法的有效性。

关键词: 售电公司; 中长期合约市场; 现货市场; 需求响应; 虚拟电厂

中图分类号: TK01; F272.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)S1-0110-07

开放科学(资源服务)二维码:



Decision-making Optimization of Procurement and Sale Strategies for Power Sales Companies Considering Virtual Power Plants

YU Xinmei^{1,✉}, LIU Shengwei², WANG Xinghua², HE Xiaoping³

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
3. China Resources Power (Guangdong) Sales Co., Ltd., Guangzhou 510006, China)

Abstract: [Introduction] The electricity sales company faces the fluctuation of electricity price in the spot market of the wholesale side and the uncertainty of the demand power of the retail side. In order to balance the benefits and risks, it is necessary to determine a reasonable proportion of electricity purchase in the medium and long-term market and the spot market and the time-of-use electricity price for consumers. [Method] The demand price response curve was used to simulate the contesting of electricity sales companies in the medium and long-term contract market, and a quantitative method of transaction risk loss index based on conditional value at risk (CVaR) was proposed. [Result] The demand response based on virtual power plant is realized through flexible load and distributed power generation, so as to balance the power deviation and the risk of price fluctuation in the spot market. On this basis, a two-level optimization model considering the power purchase strategy of electricity sales companies in the wholesale side market and the revenue of power selling on the retail side is established, and the crisscross optimization algorithm is used for solving the problem. [Conclusion] The simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: power sales company; medium and long term contract market; spot market; demand response; virtual power plant

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

2015年,“9号文”的发布推动了我国电力市场的进一步发展^[1],催生大量连接发电商和用户的售电公司,但是中长期合约市场与现货市场价格差

异、电量预测偏差及实时电价波动,使其运行环境具备双重的不确定性风险^[2-3]。

已有大量国内外学者对售电公司的购售电及运营策略展开了研究。文献[4]建立的批发侧售电公司购电模型设定中长期市场电价均值固定,且高

于现货市场电价。但中长期合约市场和现货市场价格会受市场供应能力、预期购电量及电量预测偏差的影响^[4], 因此如何平衡售电公司在两市场的购电量成为其运营策略的重要环节。实际运行中, 售电公司制定 DR 项目为用户提供市场参与渠道^[5], 并调用柔性负荷资源实现需求响应来平衡偏差电量在现货市场的价差风险^[6]。文献 [7] 中, 售电公司通过可中断负荷合同来降低偏差考核风险和市场价格波动风险, 但由于 DR 项目执行的不确定性而不符合预期^[7], 需引入售电公司可控的激励型 DR 项目。对于面向用户的价格型 DR, 若实时电价项目中用户直接面对价格波动容易产生“响应疲劳”^[7], 因此面向需求侧时, 多数售电公司选择分时电价 DR 项目^[8]。

传统 DR 项目可控性差, 售电公司通常选择部分电量在现货市场购入, 因此现货市场出现尖峰电价时会增大整体运营风险。近年来, 虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 概念逐渐得到重视^[9]。VPP 是由能量管理系统控制的小型分布式发电与用户柔性负荷聚合成的集成性等价电厂, 通过“通讯”和“聚合”实现内部单元间协调, 增强整体可控性, 实现双向需求响应, 从而可以更积极地参与市场, 提高风险平衡能力, 售电公司则可利用 VPP 在中长期和现货市场购电过程中实施更为灵活的策略。

据此, 考虑到售电公司所面临的现货价格波动和负荷预测偏差的风险, 本文提出利用基于虚拟电厂的 DR 项目进行风险平衡的购售电策略模型, 通过条件风险价值 (Conditional Value at Risk) 进行期望风险价值量化, 结合 VPP 的需求响应特性, 建立了包含多个价格区间、多阶段的交易决策和分时电价的双层优化模型。利用实际市场的真实数据构造算例, 研究了售电公司购售电比例、风险承受能力以及分时电价策略对收益的影响, 并通过多种方案的对比论证了模型优化结果的有效性。

1 计及 VPP 的售电公司交易模型

售电公司首先需确定批发侧市场中长期合约电量, 并根据用户的电价敏感度, 确定零售侧分时电价。现货交易阶段中, 则需根据实际电量与中长期市场购电量的偏差, 通过批发侧现货市场购买电

量, 并在出现尖峰电价预警时执行基于 VPP 的 DR 项目。

1.1 售电公司中长期市场购电费用

市场供给容量确定时, 需求和价格关系决定了中长期市场交易价格会随购电需求增大逐步增加, 因此售电公司中长期合约量价曲线如图 1 所示^[10]。

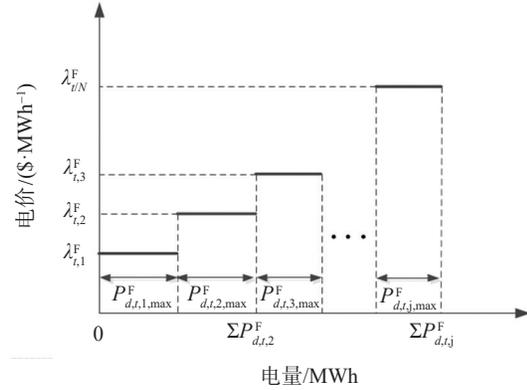


图 1 中长期市场量价曲线

Fig. 1 Medium and long term market volume price curve

据此, 售电公司中长期市场的购电总费用 C^F 计算如式 (1):

$$C^F = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^{J-1} P_{d,t,j,max}^F \lambda_{t,j}^F + P_{d,t,J}^F \lambda_{t,J}^F \right) \quad (1)$$

$$P_{d,t}^F = P'_{d,t} \alpha = \sum_{j=1}^{J-1} P_{d,t,j,max}^F + P_{d,t,J}^F \quad (2)$$

式中: $\lambda_{t,j}^F$ 为中长期合约 t 时段第 j 个电量区间的电价 ($\$/MWh$); $P_{d,t,j,max}^F$ 为售电公司 d 日 t 时段第 j 个量价区间电量 (MWh); $P_{d,t}^F$ 为中长期合约市场 d 日 t 时段的总购电量 (MWh); $P'_{d,t}$ 为售电公司用户的 d 日 t 时段预测需求电量 (MWh); α 为中长期市场购电比例, 取值范围 $[0, 1]$; D 为决策周期的天数 (天); $T=24$ 为每天时段数 (h); J 为售电公司合约形成的价格区间总数。

1.2 售电公司现货市场购电费用

售电公司在现货市场中的购电费用 C^S 为:

$$C^S = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{d,t}^S \lambda_{d,t}^S \quad (3)$$

式中: $P_{d,t}^S$ 、 $\lambda_{d,t}^S$ 为现货市场中售电公司在 d 日 t 时段的购电量 (MWh) 和实时电价 ($\$/MWh$)。

1.3 零售市场收益模型

用户交易电量与分时电价结构密切相关, 价格因素决定了用户可能更换售电公司或改变用电习惯以降低电费支出, 售电公司零售市场收入 IN^R 为:

$$IN^R = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{d,t}^R \lambda_t^R \quad (4)$$

式中： λ_t^R 为售电公司定制的 t 时段用户侧分时电价（\$/MWh）； $P_{d,t}^R$ 为需求侧总电量（MWh）。

需求电量受电价的影响如式（5）所示：

$$P_{d,t}^R = P_{d,t}^O - \left(1 - \frac{\lambda_t^R}{\lambda_t^S}\right) \chi P_{d,t}^O \quad (5)$$

式中： λ_t^S 、 $P_{d,t}^O$ 为 t 时段历史平均零售价（\$/MWh）和相应 d 日 t 时段需求电量（MWh）； χ 为面向整个售电公司统计的价格敏感系数。

1.4 基于VPP的DR项目收益模型

基于VPP的双向需求响应，售电公司可以更灵活地安排中长期合约购电量，实时电量偏差则通过DR项目平衡，通过DR获得的收入 IN^{DR} 为：

$$IN^{DR} = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (P_{d,t}^S \lambda_{d,t}^S - P_{d,t}^{S1} \lambda_{d,t}^S - P_{d,t}^B \lambda_{d,t}^B) \mu_{d,t} \quad (6)$$

$$\mu_{d,t} = \begin{cases} 1 & \text{DR启动时} \\ 0 & \text{DR不启动} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{d,t}^S = P_{d,t}^R - P_{d,t}^F \\ P_{d,t}^{S1} = P_{d,t}^S - P_{d,t}^B \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_{d,t}^{S1}$ 为售电公司启动尖峰DR项目后从现货市场购电的实际电量（MWh）； $P_{d,t}^B$ 、 $\lambda_{d,t}^B$ 为售电公司在 d 日 t 时段执行DR项目的偏差电量（MWh）和DR项目调用价格（\$/MWh）。

通过基于VPP的DR项目，售电公司可以平衡中长期市场购电量偏差，特别是在出现尖峰电价时可利用VPP的出力增长降低批发侧现货市场购电。相比于传统DR项目，基于VPP的DR项目可实现偏差电量的双向平衡，并减少执行可中断负荷DR项目的执行次数，保障用户供电并降低对用户的可中断电价补偿，从而实现售电公司和用户双方之间的共赢。

2 售电公司优化策略目标函数及求解过程

计及VPP需求响应的售电公司优化决策过程需分为两层：中长期决策优化和VPP项目优化。

2.1 交易风险指标

本文采用条件风险度量指标CVaR量化评估现货市场中售电公司的交易风险^[12-13]，如式（9）所示：

$$R_{CVaR,\beta} = R_{VaR,\beta} + \left(\frac{1}{1-\beta}\right) \sum_d \pi(d) [f(d) - R_{VaR,\beta}]^+ \quad (9)$$

式中： $R_{VaR,\beta}$ 表示一天内售电公司在置信度 β 下的最大可能损失（\$）； $[f(d) - R_{VaR,\beta}]^+$ 是指只考虑损失值大于 $R_{VaR,\beta}$ 的情况，即当 $f(d)$ 大于 $R_{VaR,\beta}$ 时，取差值，否则取0； $f(d)$ 表示交易策略损失函数，当交易出现损失时为正，获利时为负（\$）。

2.2 中长期合约市场购电策略优化目标

参考文献[10]，中长期市场购电决策的目标函数 f_1 定义如式（11）：

$$E = IN^R + IN^{DR} - C^F - C^S \quad (10)$$

$$f_1 = \max [E - \theta R_{CVaR,\beta}] \quad (11)$$

式中： E 为售电公司在本决策周期的期望总收益（\$）； θ 为风险承受系数，其值表明售电公司风险承受意愿， θ 值越小表明承受交易风险的意愿越强。

2.3 现货市场的DR项目优化

中长期市场决策变量参数确定后，当售电公司在现货市场根据现货价格与阈值电价的差异启动基于VPP的DR项目优化，替代现货市场购电，其目标函数 f_2 表示如下：

$$f_2 = \max [IN^{DR}] \quad (12)$$

2.4 约束条件

2.4.1 供需电能平衡约束

$$P_{d,t}^F + P_{d,t}^{S1} + P_{d,t}^B - P_{d,t}^R = 0 \quad (13)$$

2.4.2 峰平谷零售电价约束

$$\lambda_{\min}^{R,P} \leq \lambda^{R,P} \leq \lambda_{\max}^{R,P} \quad (14)$$

$$\lambda_{\min}^{R,F} \leq \lambda^{R,F} \leq \lambda_{\max}^{R,F} \quad (15)$$

$$\lambda_{\min}^{R,V} \leq \lambda^{R,V} \leq \lambda_{\max}^{R,V} \quad (16)$$

式中： $\lambda^{R,P}$ 、 $\lambda^{R,F}$ 、 $\lambda^{R,V}$ 为峰、平、谷时段的零售电价（\$/MWh）； $\lambda_{\max}^{R,P}$ 、 $\lambda_{\max}^{R,F}$ 、 $\lambda_{\max}^{R,V}$ 、 $\lambda_{\min}^{R,P}$ 、 $\lambda_{\min}^{R,F}$ 、 $\lambda_{\min}^{R,V}$ 为对应时段的零售电价上下限（\$/MWh）。

2.4.3 VPP整体调节范围约束

$$P_{d,t}^B \leq P_{d,t,\max}^B \quad (17)$$

$$\lambda^{R,P} \leq \lambda_{d,t}^B \leq \lambda_{d,t,\max}^B \quad (18)$$

式中： $P_{d,t,\max}^B$ 为可回购最大负荷或VPP最大出力（MWh）； $\lambda_{d,t,\max}^B$ 为最大回购电价（\$/MWh）； $\lambda^{R,P}$ 为峰时零售电价（\$/MWh）。

2.4.4 基于VPP的DR项目启动阈值

$$\varepsilon \lambda_{\max}^{R,P} \leq \lambda_{d,t}^S \quad (19)$$

式中： ε 为现货市场出现尖峰电价的阈值参数。

2.5 优化算法及流程

优化过程中，上层优化确定中长期市场购电策略中的购电量和峰、平、谷零售电价，下层优化则

则需在现货市场出现尖峰电价时确定基于VPP的DR项目回购电量及启动次数。若将启动次数设为 N , 则总的决策变量数为 $N+4$ 。

本文采用纵横交叉优化算法 (crisscross optimization, CSO) 求解, 具体算法流程见文献 [11]。求解步骤如下:

1) 生成包含 $\lambda^{R,P}$ 、 $\lambda^{R,F}$ 、 $\lambda^{R,V}$ 、 α 四个随机变量的个体并计算适应度, 形成初始种群。

2) 基于CSO算法进行上层优化, 迭代更新直至达到收敛条件, 输出中长期市场的最优决策变量 $\lambda^{R,P}$ 、 $\lambda^{R,F}$ 、 $\lambda^{R,V}$ 、 α 。

3) 根据可调节负荷约束及上层优化结果, 确定现货市场购电量和VPP需求响应启动次数 N 。

4) 基于此构造DR项目优化初始种群: 随机生成 N 个DR项目的回购电量并计算适应度。

5) 基于CSO算法进行优化, 输出现货决策优化结果, 即尖峰电价下VPP的DR项目回购电量。

3 仿真分析

3.1 数据来源和仿真参数设置

本文模型验证采用的平均现货电价数据来自美国PJM, 负荷数据来自美国能源局OpenEI (Open Energy Information)。

以180天的PJM交易电量数据和现货电价数据作为售电公司中长期市场的交易依据。对于相应的负荷数据, 则通过随机抽样设定可调节负荷与不可调节负荷的用户比例为1:1, 其他参数如表1所示。

表1 优化参数设定

Tab. 1 Setting of optimization parameters

参数项目	参数
可调节负荷比例	40%
价格敏感系数 χ	5
启动阈值 ε	1.5
置信度 β	0.95

3.2 购电策略对比

对比了四种不同典型方案的期望收益、风险损失, 如表2所示。四种方案设定如下:

- 1) 中长期市场购入全部电量。
- 2) 现货市场购入全部电量。
- 3) 接受部分风险 ($\theta = 0.2$) 的购电优化

策略。

- 4) 无视风险 ($\theta = 0$) 的购电优化策略。

表2 不同购电策略优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimal power purchasing strategy

优化结果	方案1	方案2	方案3	方案4
期望总收益(10^7 \$)	1.40	1.51	1.61	1.71
CVaR(10^4 \$)	-6.3	6.9	-3.6	2.1
中长期合约购电占比	100%	0	67%	39%
$\lambda^{R,P}$	70.4	70.5	68.9	67.5
$\lambda^{R,F}$	64.6	61.6	63.0	60.3
$\lambda^{R,V}$	44.9	41.4	43.2	41.0

由表2可知, 通过中长期合约购买全部预测电量方案的期望总收益最低, 但受现货市场电价波动影响最小, 其风险来自售电公司在现货市场中购买的不平衡电量, 因其购电量较小出现尖峰价格时的风险最小。而全现货市场购电方案的期望收益相对于方案1更高, 但现货市场的价格不确定性导致售电公司收益波动, 若出现尖峰电价其风险最大。

方案3、4为购电策略模型确定的优化购电方案。方案3表示售电公司希望在承担适度风险 ($\theta = 0.2$) 的基础上追求高收益, 因此增大中长期合约购电量; 方案4表示售电商忽略了实时电价波动风险 ($\theta = 0$), 虽然其期望收益最高, 但CVaR数值表明其收益波动较大。综上可知, 参数 θ 可以有效帮助售电公司平衡收益和风险。

3.3 VPP方案对售电公司和用户收益的影响

通过比较方案3与未考虑VPP策略的方案5, 论证VPP策略在提高售电公司收益和降低风险方面的有效性, 仿真结果如表3所示。

表3 VPP方案对收益的影响

Tab. 3 Influence of VPP scheme on revenue

VPP项目收益	计及VPP(方案3)	未考虑VPP
售电公司的总收益增量(10^5 \$)	1.6	0
参与VPP的用户总收益(10^4 \$)	9.0	0
CVaR(10^4 \$)	-3.6	-3.3

仿真过程中, 两个方案的分时电价及中长期市场购电占比相同。对比表中方案3和方案5, VPP方案的执行使得售电公司收益均有上升, 同时降低了售电公司的交易风险, 可以在一定程度上提升售电公司应对现货市场尖峰电价的能力, 同时降低用

户用电成本,更易激发用户参与DR的主动性。图3、图4比较了现货市场购电量、回购电量、购电价格和回购价格。

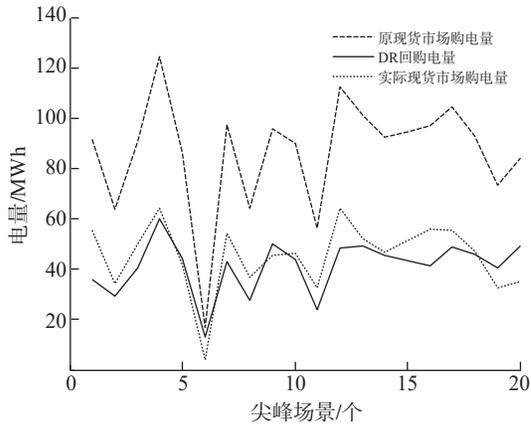


图3 VPP项目对现货市场购电量和回购电量的影响
Fig. 3 Influence of VPP program on purchased and repurchased electricity in the spot market and demand side

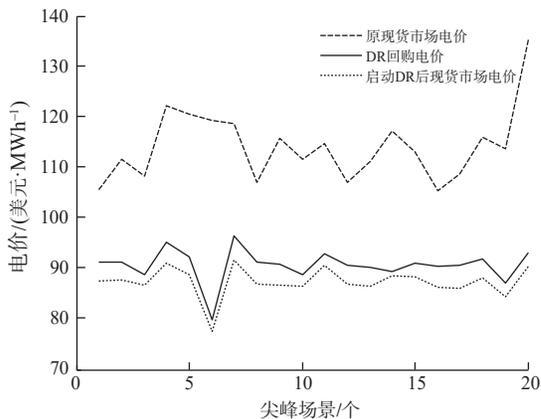


图4 VPP项目对现货市场电价和回购电价的影响
Fig. 4 Influence of VPP program on electricity price and repurchase price

分析图3、图4可知,当高峰负荷阶段用电紧张时,利用需求侧回购降低了现货市场的购电量,缓解发电侧压力,使高峰负荷变平缓,同时避免调用发电成本高昂的部分调峰机组,降低了发电成本,维持了出清价格和整个市场的稳定。从图3、图4可知,随着VPP项目的执行需求响应负荷调用量的增加,现货市场的需求量下降,而系统的调用DR的单位成本逐渐上升,有效抑制了现货市场尖峰价格的出现,市场价格趋于平衡。

3.4 阈值参数对VPP启动次数的影响

中断阈值参数 ε 是影响VPP项目启动的重要参数,阈值变化时VPP项目启动次数和天数如图5所示。

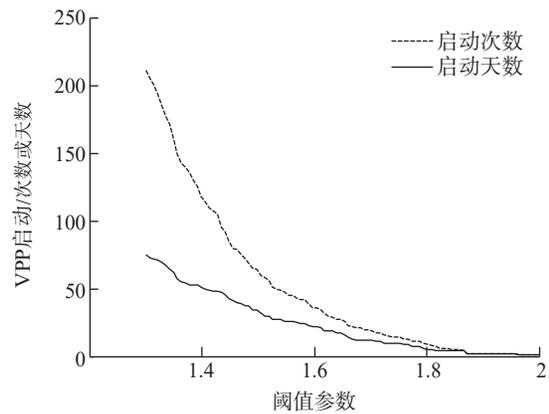


图5 阈值参数对VPP启动的影响

Fig. 5 Impact of threshold parameters on VPP startup

随着阈值参数 ε 的增大,启动VPP项目的限制变得严格,启动的次数和天数都明显下降。VPP项目带来的收益也逐渐下降,如表4所示。因此售电公司需要综合考虑用户参与VPP的意愿,通过调节阈值参数 ε 来控制VPP项目的启动次数。

表4 阈值参数对VPP项目收益的影响

Tab. 4 Impact of threshold parameters on VPP project

收益	$\varepsilon = 1.2$	$\varepsilon = 1.3$	$\varepsilon = 1.4$	$\varepsilon = 1.5$
售电公司VPP收益(10^4 \$)	2.41	2.13	1.61	1.10
期望日收益(10^4 \$)	8.98	8.96	8.93	8.90
CVaR(10^4 \$)	-3.85	-3.75	-3.60	-3.58

4 结论

本文提出一种售电公司在中长期侧市场和现货市场中批发侧、零售侧的整体购售电决策模型,同时考虑了来自批发侧现货市场价格波动和需求侧负荷预测误差的风险,可以有效提升售电公司的收益风险平衡能力。该模型基于需求-价格曲线,考虑了售电公司在中长期市场购售电量对价格的影响和VPP的双向需求响应能力对现货市场交易的影响,在可接受风险范围内形成最佳购售电策略。

算例仿真结果说明,本文方法可以有效地平衡期望收益和收益波动风险,合理分配中长期市场和现货市场购电比例。而基于VPP项目的DR方案,可以通过调用需求侧的柔性负荷在一定程度上降低售电公司在现货市场中承受尖峰电价交易的风险,具备更强的市场竞争力,同时帮助用户节约用电成本,降低用电高峰期发电侧发电压力,减少电价波动,从而稳定现货市场价格体系。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革若干意见(中发[2015]9号)[Z]. 2015-03-15.
The State Council of the CPC Central Committee. Several opinions on further deepening the reform of electric power system (ZF[2015]No. 9) [Z]. 2015-03-15.
- [2] SEKIZAKI S, NISHIZAKI I, HAYASHIDA T. Decision making of electricity retailer with multiple channels of purchase based on fractile criterion with rational responses of consumers [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 2(105):877-893.
- [3] 张江林, 夏榆杭, 段登伟, 等. 基于WCVaR评估的虚拟发电厂能量市场收益——风险模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9):77-83.
ZHANG J L, XIA Y H, DUAN D W, et al. Benefit-risk model of virtual power plant in energy market based on WCVaR assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):77-83.
- [4] 罗舒瀚, 蒋传文, 王旭, 等. 新电改背景下售电公司的购电策略及风险评估[J]. 电网技术, 2019, 43(3):944-953.
LUO S H, JIANG C W, WANG X, et al. Power trading strategy and risk assessment of electricity retailing company under power system reform [J]. Power System Technology, 2019, 43(3):944-953.
- [5] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3576-3589.
TIAN S M, WANG B B, ZHANG J. Key technologies for demand response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3576-3589.
- [6] 杨萌, 艾欣, 唐亮, 等. 计及风险规避的售电公司平衡市场优化交易策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(11):3300-3309.
YANG M, AI X, TANG L, et al. Optimal trading strategy in balancing market for electricity retailer considering risk aversion [J]. Power System Technology, 2016, 40(11):3300-3309.
- [7] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3630-3637.
NIU W J, LI Y, WANG B B. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3630-3637.
- [8] 韩峰, 曾成碧, 苗虹. 基于分时电价和需求响应的家庭微电网负荷优先级控制[J]. 电测与仪表, 2018, 55(19):41-45+53.
HAN F, ZENG C B, MIAO H. Load priority control for home micro-grid considering time-of-use [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(19):41-45+53.
- [9] 边晓燕, 杨帅帅, 黄铃燃, 等. 虚拟电厂接入配电网的电力系统调度灵活性研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3):66-71.
BIAN X Y, YANG S S, HUANG L R, et al. Research on power system scheduling flexibility of virtual power plant accessing to distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3):66-71.
- [10] CHARWAND M, AHMADI A, HEIDARI A R, et al. Benders decomposition and normal boundary intersection method for multiobjective decision making framework for an electricity retailer in energy markets [J]. Systems Journal IEEE, 2015, 9(4):1475-1484.
- [11] MENG A, PENG M, HAO Y, et al. Crisscross optimization algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problem [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 11(105):1303-1317.
- [12] GREEN J R, MASCOLELL A, WHINSTON M. Microeconomic theory [M]. 1995.
- [13] 刘升伟. 计及需求响应的售电主体运营策略研究[D]. 广州:广东工业大学, 2020.
LIU S W. Research on operation strategy of electricity sales subject considering demand response [D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology, 2020.

作者简介:



余欣梅 (通信作者)

1978-, 女, 浙江衢州人, 高级工程师、注册咨询师, 工学博士, 主要从事能源与电力规划咨询研究的工作 (e-mail) yuxinmei@gedi.com.cn。

余欣梅

刘升伟

1995-, 男, 广东惠州人, 硕士, 从事电力市场和负荷预测研究 (e-mail) 425875266@qq.com。

王星华

1972-, 男, 江苏扬州人, 副教授, 工学硕士, 从事电力系统高级应用软件开发, 大数据分析、含分布式发电的配电网规划优化研究 (e-mail) 1805211@qq.com。

贺小平

1993-, 男, 江西吉安人, 硕士, 从事电力市场运行分析研究 (e-mail) lightinghxp@foxmail.com。

(责任编辑 李辉)

《南方能源建设》摘要和参考文献格式

《南方能源建设》是南方电网数字传媒科技有限公司主管、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司主办的能源行业科技类期刊，2014年12月创刊，季刊，刊号为CN 44-1715/TK，ISSN 2095-8676，国内外公开发行人。《南方能源建设》论文模板详见网址 <https://www.energychina.press/>，其中中英文摘要和参考文献格式如下：

1 中英文摘要

中英文摘要严格按照 [目的 Introduction]、[方法 Method]、[结果 Result]、[结论 Conclusion] 四要素撰写；600字以内，独立成篇，意义完整，用词准确无误，简明扼要，信息具体，以文字叙述为主，避免使用公式，严禁使用图和表。[目的]——研究、研制、调查等的前提、目的和任务以及所涉及的主题范围；[方法]——涉及的原理、理论、条件、对象、材料、工艺、结构、手段、装备、程序等；[结果]——课题的结果、数据，被确定的关系，观察的结果，得到的效果、性能等；[结论]——结果的分析、研究、比较、评价、应用，以及提出的课题、假设、启发、建议、预测等。

2 参考文献

参考文献只列出作者阅读过、在正文中被引用过、正式发表的主要文献资料（以连续出版物为主，尽量避免引用图书），不应有二次文献出现，同时近5年的文献应占70%，总数量10篇以上为宜；按正文中对参考文献引用的先后顺序，对其编码。如果是非英文文献，则必须同时提供相应的英文。

- 期刊：[序号]作者.题名[J].刊名，年，卷（期）：页码范围
- [1] 徐伟，廖民传，郑志源，等. 500 kV海底电缆雷电过电压研究[J]. 南方能源建设，2016，3(2)：62-66.
XU W, LIAO M C, ZHENG Z Y, et al. Research on lightning overvoltage of 500 kV submarine cable lines [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 62-66.
- [2] ARAKI H, SAJIS, OKABE T, et al. Solidation of mechanically alloyed Al-10.7%Ti powder at low temperature and high pressure of 2 GPa [J]. Mater. Trans. JIM., 1995, 36 (3): 465.
- 专著：[序号]著者.题名[M].出版地：出版者，出版年。
- [3] 戴树森，费鹤良，王玲玲，等. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京：国防工业出版社，1983.
DAI S S, FEI H L, WANG L L, et al. Reliability test and statistical analysis [M]. Beijing: National Defense Industrial

Press, 1983.

会议论文：[序号]作者.题名[C]//会议举办者.会议名称，会议地点，会议时间.出版地：出版者，出版年：页码范围。

- [4] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T M. A model-based controller in rotating reference frame for hybrid HVDC [C]//ATLANTA G A. Energy Conversion Congress and Exposition, Toronto, Canada, Feb. 1-8, 2015. Toronto: IEEE, 2010:1578-1584.

学位论文：[序号]作者.题名[D].城市：大学，年代。

- [5] 郑永超. 密云铁矿尾矿制备高强结构材料研究[D]. 北京：北京科技大学，2010.
ZHENG Y C. Study on high-strength structural material with iron tailings of Miyun [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.

报告：[序号]作者.题名[R].城市：单位，年代。

- [6] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京：清华大学核能技术设计研究院，1997.

专利：[序号]专利所有者.专利题名：专利号[P].专利国别，公开日期。

- [7] 李谋渭，边新孝，陈工，等. 活套辊式平坦度检测装置：201034548 [P]. 中国专利，2008-03-12.
LI M W, BIAN X X, CHEN G, et al. Strip flatness measurement device of looper type: 201034548 [P]. China Patent. 2008-03-12.

标准：[序号]责任者.标准名称：标准代号[S].出版地：出版者，出版年。

- [8] 中国工程建设标准化协会. 城市综合管廊工程技术规范：GB 50838—2015 [S]. 北京：中国计划出版社出版，2015.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical code for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015

电子文献：[序号]责任者.题名[J/OL].出版者(更新或修改日期)[引用日期].获取和访问路径。

- [9] 范杜平. 混煤哈氏可磨性指数[J/OL]. 中国科技论文在线.(2007-12-27) [2010-09-10]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/200712-756>.
FAN D P. Hargrove grindability index of the coal blended [J/OL]. Sciencepaper Online. (2007-12-27) [2010-09-10]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/200712-756>.

网络优先出版：[序号]作者.题名[J].刊名，DOI号。

- [10] 张夏平. 天然气网络对含新能源电力系统短期调度运行影响[J]. 南方能源建设，2019, doi: <http://dx.doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001>.
ZHANG X P. Impact of natural gas system on short-term scheduling with volatile renewable energy [J]. Southern Energy Construction, 2019, online, doi: <http://dx.doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001>.

(《南方能源建设》编辑部)