



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117217841 B

(45) 授权公告日 2024.06.11

(21) 申请号 202311085020.9

G06Q 50/06 (2012.01)

(22) 申请日 2023.08.25

H02J 3/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117217841 A

(56) 对比文件

CN 111222917 A, 2020.06.02

CN 115544726 A, 2022.12.30

(43) 申请公布日 2023.12.12

WO 2023103862 A1, 2023.06.15

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150000 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

仪忠凯等. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配
电侧市场出清策略.《电力系统自动化》.2020,第
44卷(第22期),第143-151页.

(72) 发明人 周渝皓 仪忠凯 胡林献 徐英

李志民 吴永峰 李振伟

审查员 周文

(74) 专利代理机构 哈尔滨市哈科专利事务所有
限责任公司 23101

专利代理师 孟策

(51) Int. Cl.

G06Q 30/0283 (2023.01)

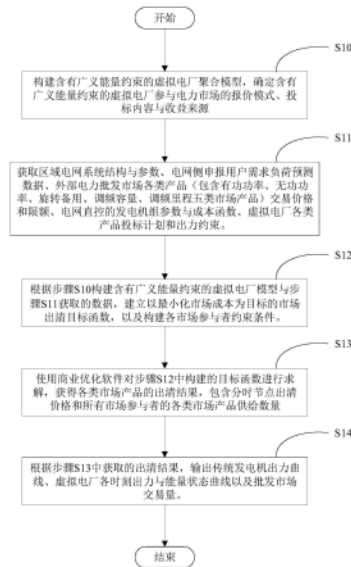
权利要求书6页 说明书16页 附图3页

(54) 发明名称

计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出
清系统优化方法

(57) 摘要

本发明公开一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法,解决了虚拟电厂能量约束时变的出清问题,提升了虚拟电厂参与电网侧电力市场的主动性与灵活性,降低调峰调频服务的成本。通过构建含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型,确定含有广义能量约束的虚拟电厂参与电力市场的报价模式、投标内容与收益来源;获取各类参数与成本函数、虚拟电厂各类产品投标计划和出力约束;构建以最小化市场成本为目标的市场出清目标函数模型,以及构建各市场参与者约束条件;使用商业优化软件对构建的市场出清目标函数模型进行求解,获得各类市场产品的出清结果。本发明能够合理优化资源配置,促进新能源消纳。



1. 一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法, 其特征在于, 步骤如下:

步骤S10: 构建含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型, 确定含有广义能量约束的虚拟电厂参与电力市场的报价模式、投标内容与收益来源; 其中, 定义含有广义能量虚拟电厂状态为虚拟电厂中各类分布式储能设备剩余能量以及楼宇和能源管道中冷能、热能、天然气与电能存在交互所有能量的状态, 虚拟电厂的广义能量约束则表示虚拟电厂可支配调度的能量范围, 构建所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型, 包括虚拟电厂功率约束和虚拟电厂广义能量约束:

$$\underline{P}^{\text{VPP}} \leq P_t^{\text{VPP}} \leq \overline{P}^{\text{VPP}} \quad (1)$$

$$\underline{E}_t^{\text{VPP}} \leq E_t^{\text{VPP}} \leq \overline{E}_t^{\text{VPP}} \quad (2)$$

$$E_t^{\text{VPP}} = E_{t-1}^{\text{VPP}} - P_t^{\text{VPP}} \quad (3)$$

式(1)表示虚拟电厂功率约束, 式中 $\overline{P}^{\text{VPP}}$ 、 P_t^{VPP} 分别为虚拟电厂有功功率上下限; P_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂输出或输入的有功量, 由于虚拟电厂带有储能性质, 因此约束下限能够为负数, 定义放电时 P_t^{VPP} 为正,

式(2)表示虚拟电厂能量约束, 式中 $\overline{E}_t^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{E}_t^{\text{VPP}}$ 分别为虚拟电厂广义能量状态的上下限; E_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂的广义能量状态;

式(3)表示虚拟电厂广义能量状态计算公式,

虚拟电厂代理将中标的有功输入或输出功率根据不同的价格区间进行分解:

$$\begin{cases} P^{\text{VPP}} = \sum_{k=1}^{-n} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n P_k^{\text{VPP}} \\ p_{k-1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq p_k^{\text{VPP}}, k \geq 2 \\ p_{k+1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq p_k^{\text{VPP}}, k \leq -2 \\ 0 \leq P_1^{\text{VPP}} \leq p_1^{\text{VPP}}, 0 \leq P_{-1}^{\text{VPP}} \leq p_{-1}^{\text{VPP}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P^{VPP} 为虚拟电厂代理商中标的有功功率输入或输出总量; P_k^{VPP} 为虚拟电厂有功功率分解后, 在第k个价格区间中有功输出或输入功率;

因此, 本次中标的虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用为:

$$c = \sum_{k=1}^{-n} b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} \quad (5)$$

在区域电网中, 将虚拟电厂的发电与用电功率按分时节点边际价格进行结算, 得到虚拟电厂的净利润, 其中主要包含售电获利与在不同时段充放电赚取差价的获利, 参与电力市场的虚拟电厂的总收益如下:

$$\pi = \sum_{t=1}^T b_t^P (P_t^{\text{VPP.sell}} - P_t^{\text{VPP.buy}}) \quad (6)$$

式中: π 为虚拟电厂的总收益; T为总运行时段数; $P_t^{\text{VPP.sell}}$ 与 $P_t^{\text{VPP.buy}}$ 分别表示t时段虚拟电厂售电量与购电量; b_t^P 表示t时段区域电网的有功边际价格;

步骤S11:获取区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品,包含:有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五类市场产品的交易价格和限额、电网直控的发电机组参数与成本函数、虚拟电厂各类产品投标计划和出力约束;

步骤S12:通过所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型与步骤S11获取的区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品的数据,构建以最小化市场成本为目标的市场出清目标函数模型,以及构建各市场参与者约束条件;其中,根据提出的市场出清机制,构建考虑虚拟电厂广义能量约束的多类市场产品出清模型,模型包括有功功率、无功功率、旋转备用和调频容量和调频里程五项电力产品交易,多元市场出清优化目标是使市场成本最小,优化目标函数如下所示:

$$\min \Phi^{\text{DN}} = c_{\text{PT}} + c_{\text{VPP}} + c_{\text{GEN}} \quad (7)$$

式中: c_{PT} 、 c_{VPP} 、 c_{GEN} 分别表示从上级批发市场购入服务的总成本,从虚拟电厂代理商购入服务的总成本,以及传统发电机组总成本;

批发市场购入服务的总成本包括:

$$c_{\text{PT}} = \sum_{t=1}^T (b_{P,t}^{\text{PT}} P_{i,t}^{\text{PT}} + b_{Q,t}^{\text{PT}} Q_{i,t}^{\text{PT}} + b_{R,t}^{\text{PT}} R_{i,t}^{\text{PT}} + b_{C,t}^{\text{PT}} C_{i,t}^{\text{PT}} + b_{D,t}^{\text{PT}} D_{i,t}^{\text{PT}}) \quad (8)$$

式中: T 为总运行时段数, $b_{P,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{Q,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{R,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{C,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{D,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在 t 时段从上级输电侧批发市场购入有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的价格; $P_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在 t 时段的节点 i 处从上级输电侧批发市场有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的购入量;

虚拟电厂代理商购入服务的总成本包括:

$$c_{\text{VPP}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} \left[\sum_{t=1}^T (F_{i,t}^{\text{VPP}} (P_{i,t}^{\text{VPP}}) + b_{Q,i,t}^{\text{VPP}} Q_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{R,i,t}^{\text{VPP}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{C,i,t}^{\text{VPP}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{D,i,t}^{\text{VPP}} D_{i,t}^{\text{VPP}}) \right] \quad (9)$$

式中: n_{VPP} 为虚拟电厂并网节点数; $b_{Q,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{R,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{C,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{D,i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为节点 i 处虚拟电厂代理商在 t 时段投标的无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程价格; $Q_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为区域电网在 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程的购入量; $F_{i,t}^{\text{VPP}}(\cdot)$ 为节点 i 处虚拟电厂代理商在 t 时段投标有功功率费用函数; $P_{i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商对区域电网有功输出或输入功率,根据阶梯分段报价方式, $P_{i,t}^{\text{VPP}}$ 表示为:

$$P_{i,t}^{\text{VPP}} = \sum_{k=1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (10)$$

式中: m_{in} 、 m_{out} 分别为虚拟电厂代理商在有功输入和输出报价区间个数; $P_{k,i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商在 k 区间中有功功率输入量或输出量;

虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用函数表示为:

$$F_{i,t}^{\text{VPP}}(P_{i,t}^{\text{VPP}}) = \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} b_{k,i,t}^{\text{VPP}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} b_{k,i,t}^{\text{VPP}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (11)$$

式中： $b_{k,i,t}^{\text{VPP}}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在k区间有功投标价格；

传统发电机组成本包括：

$$C_{\text{GEN}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} \left[\sum_{t=1}^T \left(F_{i,t}^{\text{GEN}}(P_{i,t}^{\text{GEN}}) + b_{Q,i,t}^{\text{GEN}} Q_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{R,i,t}^{\text{GEN}} R_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{C,j,t}^{\text{GEN}} C_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{D,j,t}^{\text{GEN}} D_{i,t}^{\text{GEN}} \right) \right] \quad (12)$$

式中： n_{GEN} 为发电机组总数； $b_{Q,i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{R,i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{C,j,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{D,j,t}^{\text{GEN}}$ 分别为节点i处发电机组在t时段有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程成本； $P_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、

$Q_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{GEN}}$ 分别为t时段的节点i处发电机组提供的有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程，

$F_{i,t}^{\text{GEN}}(\cdot)$ 为节点i处发电机组在t时段发电成本函数，具体表示为：

$$F_i^{\text{GEN}}(P_{i,t}^{\text{GEN}}) = a_i (P_{i,t}^{\text{GEN}})^2 + b_i P_{i,t}^{\text{GEN}} + c_i \quad (13)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为传统发电机组i的运行成本参数；

考虑到发电机组发电成本曲线与分段阶梯价格曲线的相似性，同样令传统发电机组代理商分段报价：

$$P_{i,t}^{\text{GEN}} = \sum_{l=1}^{m_g} P_{l,i,t}^{\text{GEN}} \quad (14)$$

$$F_{i,t}^{\text{GEN}}(P_{i,t}^{\text{GEN}}) = \sum_{l=1}^{m_g} b_{l,i,t}^{\text{GEN}} P_{l,i,t}^{\text{GEN}} \quad (15)$$

式中： m_g 分别为发电机组代理商发电报价区间个数； $P_{k,i,t}^{\text{GEN}}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在l区间中发电量；

其中，各市场参与者约束条件包括：

1)、电网侧运营商需要考虑区域电网系统的运行约束

其中，系统潮流分布用线性化方程来描述，如式(16) - (19)所示；式(20) - (22)表示区域电网系统的节点电压与支路潮流需要满足的系统安全运行约束；式(23)与式(24)分别表示区域电网节点的有功和无功平衡，

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (16)$$

$$Q_{ij} = -\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (17)$$

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(\frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (18)$$

$$Q_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(-\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (19)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \quad (20)$$

$$Q_{ij} \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij} \quad (21)$$

$$V_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (22)$$

$$P_i = P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{VPP}} + P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{DE}} \quad (23)$$

$$Q_i = Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{VPP}} + Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{DE}} \quad (24)$$

式中： n_b 为区域电网节点总数； P_{ij} 、 Q_{ij} 、 r_{ij} 、 x_{ij} 分别为节点i和节点j之间线路的有功潮流、无功潮流、电阻和电抗； P_i 、 Q_i 、 V_i 、 θ_i 分别为节点i处的净注入有功功率、注入无功功率、电压幅值和相角； $P_{i,t}^{\text{DE}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{DE}}$ 分别为t时刻节点i处的有功和无功负荷需求； \bar{P}_{ij} 、 \underline{P}_{ij} 、 \bar{Q}_{ij} 、 \underline{Q}_{ij} 为节点i和节点j之间线路的有功和无功潮流上下限； \bar{V}_i 和 \underline{V}_i 分别为节点i处电压上下限；

2)、电网直控的传统发电机组需要满足运行约束

式(25) - (26)分别表示发电机组的有功和无功出力约束；考虑到各类市场产品之间的耦合关系，式(27)和式(28)描述了有功功率、旋转备用和调频容量三类产品共同受到有功出力投标范围的限制，式(29)代表了调频容量和调频里程的耦合关系，

$$P_i^{\text{GEN}} \leq P_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{P}_i^{\text{GEN}} \quad (25)$$

$$Q_i^{\text{GEN}} \leq Q_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{Q}_i^{\text{GEN}} \quad (26)$$

$$P_{i,t}^{\text{GEN}} + R_{i,t}^{\text{GEN}} + C_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{P}_i^{\text{GEN}} \quad (27)$$

$$P_{i,t}^{\text{GEN}} - C_{i,t}^{\text{GEN}} \geq \underline{P}_i^{\text{GEN}} \quad (28)$$

$$\underline{\kappa} C_{i,t}^{\text{GEN}} \leq L_i^{\text{GEN}} \leq \bar{\kappa} C_{i,t}^{\text{GEN}} \quad (29)$$

$$\tan(\arccos(-\lambda_{\text{GEN}})) \leq \frac{Q_{i,t}^{\text{GEN}}}{P_{i,t}^{\text{GEN}}} \leq \tan(\arccos(\lambda_{\text{GEN}})) \quad (30)$$

式中： \bar{P}_i^{GEN} 、 $\underline{P}_i^{\text{GEN}}$ 、 \bar{Q}_i^{GEN} 、 $\underline{Q}_i^{\text{GEN}}$ 分别为节点i处发电机组在t时刻的有功和无功出力上下限； $\underline{\kappa}$ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为单位调频容量下的最小和最大利用率； λ_{GEN} 为发电机组的功率因数限制值；

3)、任意时刻下，整个系统的辅助服务需要满足供需平衡，如式(31) - (33)所示：

$$R_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} R_{i,t}^{\text{GEN}} - R_t^{\text{DE}} = 0 \quad (31)$$

$$C_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} C_{i,t}^{\text{GEN}} - C_t^{\text{DE}} = 0 \quad (32)$$

$$D_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} D_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} D_{i,t}^{\text{GEN}} - D_t^{\text{DE}} = 0 \quad (33)$$

式中： R_t^{DE} 、 C_t^{DE} 和 D_t^{DE} 分别为t时刻系统调频备用需求，调频容量需求和总调频里程需求；

4)、虚拟电厂投标模型约束

虚拟电厂投标模型约束见式(34) - (44),

(34) - (38)为虚拟电厂各类市场产品的投标范围约束,

式(34)是对每一个有功报价区间的功率范围进行限制,

式(38)表示虚拟电厂提供调频里程服务的前提是提供调频容量服务,式(39) - (40)是虚拟电厂投标的广义能量约束,

式(41)与式(42)为各类市场产品之间的耦合约束,

式(43)表示虚拟电厂代理商可以提交一个期望的虚拟电厂在市场调度周期最终时刻的广义能量状态范围,以平衡本调度周期与下一个周期的获利期望;

虚拟电厂应保持一定量的能量储备,至少能够提供有效时间 h 的连续调节服务,如式(44),调频容量有效时间 h^C 设为15min,旋转备用有效时间 h^R 设为1h;

$$0 \leq P_{k,i,t}^{VPP} \leq \bar{P}_{k,i}^{VPP} \quad (34)$$

$$\underline{Q}_i^{VPP} \leq Q_{i,t}^{VPP} \leq \bar{Q}_i^{VPP} \quad (35)$$

$$0 \leq R_{i,t}^{VPP} \leq \bar{R}_i^{VPP} \quad (36)$$

$$0 \leq C_{i,t}^{VPP} \leq \bar{C}_i^{VPP} \quad (37)$$

$$\max(\underline{\kappa}C_{i,t}^{VPP}, 0) \leq D_i^{VPP} \leq \min(\bar{\kappa}C_{i,t}^{VPP}, \bar{D}_i^{VPP}) \quad (38)$$

$$E_{i,t}^{VPP} = E_{i,t-1}^{VPP} - \sum_{k=1}^{-m_{out}} P_{k,i,t}^{VPP} + \sum_{k=1}^{m_{in}} P_{k,i,t}^{VPP} \quad (39)$$

$$\underline{E}_{i,t}^{VPP} \leq E_{i,t}^{VPP} \leq \bar{E}_{i,t}^{VPP} \quad (40)$$

$$\sum_{k=1}^{-m_{out}} P_{k,i,t}^{VPP} + R_{i,t}^{VPP} + C_{i,t}^{VPP} \leq \sum_{k=1}^{-m_{out}} \bar{P}_{k,i}^{VPP} \quad (41)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{in}} P_{k,i,t}^{VPP} - C_{i,t}^{VPP} \geq \sum_{k=1}^{m_{in}} \bar{P}_{k,i}^{VPP} \quad (42)$$

$$\underline{E}_{i,fin}^{VPP} \leq E_{i,T}^{VPP} \leq \bar{E}_{i,fin}^{VPP} \quad (43)$$

$$R_{i,t}^{VPP} h^R + C_{i,t}^{VPP} h^C \leq \min(\bar{E}_{i,t}^{VPP} - E_{i,t}^{VPP}, E_{i,t}^{VPP} - \underline{E}_{i,t}^{VPP}) \quad (44)$$

式中: $\bar{P}_{k,i,t}^{VPP}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商有功功率在k区间的上限; \underline{Q}_i^{VPP} 、 \bar{Q}_i^{VPP} 分别为t时段的节点i处虚拟电厂代理商无功出力范围的投标上下限; \bar{R}_i^{VPP} 、 \bar{C}_i^{VPP} 、 \bar{D}_i^{VPP} 分别为虚拟电厂代理商旋转备用、调频容量、调频里程投标上限; $E_{i,t}^{VPP}$ 为t时刻节点i处虚拟电厂广义能量状态; $\underline{\kappa}$ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为调频设备的最小和最大比率; $\bar{E}_{i,t}^{VPP}$ 、 $\underline{E}_{i,t}^{VPP}$ 分别为t时段的节点i处虚拟电厂广义能量状态的上下限;

步骤S13:使用商业优化软件对步骤S12中构建的市场出清目标函数模型进行求解,获得各类市场产品的出清结果,包含分时节点出清价格和所有市场参与者的各类市场产品供给数量;其中,所述的市场出清目标函数模型使用商业优化软件进行求解,引入拉格朗日乘子,得到优化问题的增广拉格朗日函数如下:

$$L(x, \mu_n, \lambda_m, \lambda_{i,t}^P, \lambda_{i,t}^Q, \lambda_t^R, \lambda_t^C, \lambda_t^D) = \left[\begin{array}{l} \Phi^{\text{DN}}(x) + \sum_{n=1}^N \mu_n (f_n(x)) + \sum_{m=1}^M \lambda_m (a_m^T x - b_m) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_{i,t}^P (P_i \cdot S_N - P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{VPP}} - P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_{i,t}^Q (Q_i \cdot S_N - Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{VPP}} - Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^R \left(R_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} R_{i,t}^{\text{GEN}} - R_t^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^C \left(C_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} C_{i,t}^{\text{GEN}} - C_t^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^D \left(D_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} D_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} D_{i,t}^{\text{GEN}} - D_t^{\text{DE}} \right) \end{array} \right] \quad (45)$$

式中： μ_n 为不等式约束的拉格朗日乘子； $\lambda_{i,t}^P$ 、 $\lambda_{i,t}^Q$ 、 λ_t^R 、 λ_t^C 和 λ_t^D 分别为等式约束条件(23)、(24)、(31)、(32)、(33)对应的拉格朗日乘子； λ_m 为其余等式约束m对应的拉格朗日乘子；

根据包络定理得到各节点的有功功率和无功功率的分时出清价格,以及旋转备用、调频容量和调频里程的分时出清价格:

$$\begin{aligned} b_{i,t}^P &= \frac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^P, \quad i=1, 2, \dots, n_b, t=1, 2, \dots, T \\ b_{i,t}^Q &= \frac{\partial L}{\partial Q_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^Q, \quad i=1, 2, \dots, n_b, t=1, 2, \dots, T \\ b_t^R &= \frac{\partial L}{\partial R_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^R, \quad t=1, 2, \dots, T \\ b_t^C &= \frac{\partial L}{\partial C_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^C, \quad t=1, 2, \dots, T \\ b_t^D &= \frac{\partial L}{\partial D_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^D, \quad t=1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (46)$$

式中： $b_{i,t}^P$ 和 $b_{i,t}^Q$ 分别为t时段的区域电网节点i处的有功和无功的节点出清价格； b_t^R 、 b_t^C 和 b_t^D 分别为t时刻区域电网旋转备用、调频容量和调频里程的边际出清价格；

步骤S14:根据步骤S13中获取的出清结果,得到电力市场各类产品出清价格,电网侧运营商进行市场统一出清优化,输出统发电机出力曲线、虚拟电厂各时刻出力与能量状态曲线以及批发市场交易量,以及分时节点出清价格。

计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力市场出清优化技术领域,具体涉及一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着加快建设以新能源为主体的新型电力系统的背景下,越来越多的分布式能源(Distributed Energy Resource,DER)参与电网运行。然而,分布式能源由于其出力具有随机性、间歇性和波动性,同时存在容量较小,数量庞大,地理位置分散,彼此间难以协调的问题,因此,当分布式能源接入传统大电网体系时,电网供电的安全性和可靠性将会受到威胁。而虚拟电厂(Virtual Power Plant,VPP)技术可以很好地解决上述问题,虚拟电厂可以聚合各类分散的源-荷-储资源,形成资源集群,从而实现整个区域电力系统的协调优化控制,获得更好的环保效益与经济效益。

[0003] 目前,我国虚拟电厂介入电力市场的商业运营模式已存在一些可供借鉴的案例,但仍存在部分的问题亟待解决。一方面,虚拟电厂标准化的外特性表征不够全面,电网调度考虑虚拟电厂的联合出清灵活性不足。虚拟电厂整合的分布式能源主要包括分布式电源、可控负荷和储能装置等,因此其外特性既可以表现为发电机与用电负荷,又可以作为储能参与电力市场。在一般情况下,虚拟电厂同时具备储能、发电机、用电负荷三者的特征,在物理约束上表现为除了具备功率上下限约束,虚拟电厂还存在能量限制。然而,目前我国电力市场机制主要是面向发电机组和用电负荷设计的,并不能很好地适应多类型虚拟电厂参与。

[0004] 随着新能源电源并网规模的不断提升,电力系统调节手段不足的问题也逐渐突显。虚拟电厂由于具备通过协调和优化需求侧灵活资源来调整其功率的技术条件和能力,因此除了提供有功功率外,还可提供无功功率、旋转备用、调频容量和调频里程等多种辅助服务,能够作为主体或被动接受者参与辅助服务市场,对不同的市场产品分别进行分时投标竞价。

[0005] 虚拟电厂参与能量市场和辅助服务市场的联合交易方法,市场结构如图1所示。市场参与者主要包含以下4类:外部电力批发市场运营商、区域电网运营商(电力市场交易中心)、虚拟电厂代理商与区域电网直控的传统发电机组代理商。所有市场产品通过电力市场交易中心进行交易。

[0006] 在电力市场环境下,虚拟电厂代理商和市场运营商各司其职,虚拟电厂参与电力市场的商业运营模式从流程上可以划分为以下4个阶段:

[0007] 1) 市场申报。首先,虚拟电厂代理商需要评估各自虚拟电厂聚合能力,根据其内部分布式能源的种类和参数确定其参与电力市场的方式;在日前市场投标阶段,虚拟电厂代理商根据可再生能源、可控负荷、分布式储能等各类灵活性资源的预测信息,获得灵活性资源的出力范围、能量范围和聚合成本特性,并在满足电力市场准入条件的情况下,向电力市场交易中心提交各类市场产品的投标价格与投标范围。电网直控的传统发电机组代理也向

电力市场交易中心提交出力范围与成本曲线。与此同时,区域电网调控中心确定所有时段电网各节点市场产品需求量,向交易中心上报需求曲线。

[0008] 2) 市场出清。区域电网运营商收集所有市场参与者投标信息,根据电网调控中心提交的需求曲线和系统安全运行约束,兼顾外部批发市场中各类市场产品价格,进行日前能量市场和辅助服务市场的联合统一出清优化。根据出清结果,区域电网运营商向直控发电机组下达调度指令,提交与批发市场之前各类市场产品的分时交互计划,同时向所有市场参与者发布日前市场分时出清结果,并将调度计划下发给调控中心。

[0009] 3) 市场运行。电力市场交易中心在完成日前市场出清后,开启实时市场。虚拟电厂代理商根据实时分布式能源预测结果,更新实时运行计划。区域电网调控中心需要将更新的负荷预测曲线上报至交易中心。区域电网运营商同时更新所有市场参与者信息,进行实时出清优化,并发布实时市场出清结果。各虚拟电厂代理商根据市场出清结果进行内部资源的优化调度,从而追踪市场调度运行指令。

[0010] 4) 市场结算。区域电网运营商根据日前和实时的出清结果对虚拟电厂代理商与其他参与者进行结算,虚拟电厂代理商对结算结果进行审核。

[0011] 综上所述,为了提高虚拟电厂参与电力市场的积极性与灵活性,同时降低调峰调频服务的成本,充分探索各类分布式能源参与辅助服务市场,电力市场需要健全虚拟电厂融入多节点资源市场的参与机制,补充虚拟电厂参与电力市场标准外特性,完善考虑辅助服务的多元市场产品耦合出清及定价策略,从而促进虚拟电厂更好地参与电力市场运营。

发明内容

[0012] 基于以上不足之处,本发明的目的是提供一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法,解决了虚拟电厂能量约束时变的出清问题,提升了虚拟电厂参与电网侧电力市场的主动性与灵活性,合理优化资源配置,能够降低调峰调频服务的成本,促进新能源消纳。

[0013] 本发明所采用的技术方案如下:一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法,步骤如下:

[0014] 步骤S10:构建含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型,确定含有广义能量约束的虚拟电厂参与电力市场的报价模式、投标内容与收益来源;

[0015] 步骤S11:获取区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品,包含:有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五类市场产品的交易价格和限额、电网直控的发电机组参数与成本函数、虚拟电厂各类产品投标计划和出力约束;

[0016] 步骤S12:通过所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型与步骤S11获取的区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品的数据,构建以最小化市场成本为目标的市场出清目标函数模型,以及构建各市场参与者约束条件;

[0017] 步骤S13:使用商业优化软件对步骤S12中构建的市场出清目标函数模型进行求解,获得各类市场产品的出清结果,包含分时节点出清价格和所有市场参与者的各类市场产品供给数量;

[0018] 步骤S14:根据步骤S13中获取的出清结果,得到电力市场各类产品出清价格,电网侧运营商进行市场统一出清优化,输出统发电机出力曲线、虚拟电厂各时刻出力与能量状态曲线以及批发市场交易量,以及分时节点出清价格。

[0019] 进一步的,步骤S10中,定义含有广义能量虚拟电厂状态为虚拟电厂中各类分布式储能设备剩余能量以及楼宇和能源管道中冷能、热能、天然气与电能存在交互所有能量的状态,虚拟电厂的广义能量约束则表示虚拟电厂可支配调度的能量范围,构建所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型,包括虚拟电厂功率约束和虚拟电厂广义能量约束:

$$[0020] \quad \underline{P}^{\text{VPP}} \leq P_t^{\text{VPP}} \leq \overline{P}^{\text{VPP}} \quad (1)$$

$$[0021] \quad \underline{E}_t^{\text{VPP}} \leq E_t^{\text{VPP}} \leq \overline{E}_t^{\text{VPP}} \quad (2)$$

$$[0022] \quad E_t^{\text{VPP}} = E_{t-1}^{\text{VPP}} - P_t^{\text{VPP}} \quad (3)$$

[0023] 式(47)表示虚拟电厂功率约束,式中 $\overline{P}^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{P}^{\text{VPP}}$ 分别为虚拟电厂有功功率上下限; P_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂输出或输入的有功量,由于虚拟电厂带有储能性质,因此约束下限能够为负数,定义放电时 P_t^{VPP} 为正。

[0024] 式(48)表示虚拟电厂能量约束,式中 $\overline{E}_t^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{E}_t^{\text{VPP}}$ 分别为虚拟电厂广义能量状态的上下限; E_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂的广义能量状态;

[0025] 式(49)表示虚拟电厂广义能量状态计算公式。

[0026] 虚拟电厂代理将中标的有功输入或输出功率根据不同的价格区间进行分解:

$$[0027] \quad \begin{cases} P^{\text{VPP}} = \sum_{k=-1}^{-n} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n P_k^{\text{VPP}} \\ p_{k-1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq p_k^{\text{VPP}}, k \geq 2 \\ p_{k+1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq p_k^{\text{VPP}}, k \leq -2 \\ 0 \leq P_1^{\text{VPP}} \leq p_1^{\text{VPP}}, 0 \leq P_{-1}^{\text{VPP}} \leq p_{-1}^{\text{VPP}} \end{cases} \quad (4)$$

[0028] 式中: P^{VPP} 为虚拟电厂代理商中标的有功功率输入或输出总量; P_k^{VPP} 为虚拟电厂有功功率分解后,在第k个价格区间中有功输出或输入功率;

[0029] 因此,本次中标的虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用为:

$$[0030] \quad c = \sum_{k=-1}^{-n} b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} \quad (5)$$

[0031] 在区域电网中,将虚拟电厂的发电与用电功率按分时节点边际价格进行结算,得到虚拟电厂的净利润,其中主要包含售电获利与在不同时段充放电赚取差价的获利,参与电力市场的虚拟电厂的总收益如下:

$$[0032] \quad \pi = \sum_{t=1}^T b_t^P (P_t^{\text{VPP.sell}} - P_t^{\text{VPP.buy}}) \quad (6)$$

[0033] 式中: π 为虚拟电厂的总收益;T为总运行时段数; $P_t^{\text{VPP.sell}}$ 与 $P_t^{\text{VPP.buy}}$ 分别表示t时段虚拟电厂售电量与购电量; b_t^P 表示t时段区域电网的有功边际价格。

[0034] 进一步的,步骤S12中,根据提出的新型市场出清机制,构建考虑虚拟电厂广义能量约束的多类市场产品出清模型,模型包括有功功率、无功功率、旋转备用和调频容量和调

频里程五项电力产品交易,多元市场出清优化目标是使市场成本最小,优化目标函数如下所示:

$$[0035] \quad \min \Phi^{\text{DN}} = c_{\text{PT}} + c_{\text{VPP}} + c_{\text{GEN}} \quad (7)$$

[0036] 式中: c_{PT} 、 c_{VPP} 、 c_{GEN} 分别表示从上级批发市场购入服务的总成本,从虚拟电厂代理商购入服务的总成本,以及传统发电机组总成本;

[0037] 批发市场购入服务的总成本包括:

$$[0038] \quad c_{\text{PT}} = \sum_{t=1}^T (b_{P,t}^{\text{PT}} P_{i,t}^{\text{PT}} + b_{Q,t}^{\text{PT}} Q_{i,t}^{\text{PT}} + b_{R,t}^{\text{PT}} R_{i,t}^{\text{PT}} + b_{C,t}^{\text{PT}} C_{i,t}^{\text{PT}} + b_{D,t}^{\text{PT}} D_{i,t}^{\text{PT}}) \quad (8)$$

[0039] 式中: T 为总运行时段数, $b_{P,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{Q,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{R,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{C,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{D,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在 t 时段从上级输电侧批发市场购入有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的价格; $P_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在 t 时段的节点 i 处从上级输电侧批发市场有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的购入量;

[0040] 虚拟电厂代理商购入服务的总成本包括:

$$[0041] \quad c_{\text{VPP}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} \left[\sum_{t=1}^T (F_{i,t}^{\text{VPP}} (P_{i,t}^{\text{VPP}}) + b_{Q,i,t}^{\text{VPP}} Q_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{R,i,t}^{\text{VPP}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{C,i,t}^{\text{VPP}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{D,i,t}^{\text{VPP}} D_{i,t}^{\text{VPP}}) \right] \quad (9)$$

[0042] 式中: n_{VPP} 为虚拟电厂并网节点数; $b_{Q,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{R,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{C,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{D,i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为节点 i 处虚拟电厂代理商在 t 时段投标的无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程价格; $Q_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为区域电网在 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程的购入量; $F_{i,t}^{\text{VPP}}(\cdot)$ 为节点 i 处虚拟电厂代理商在 t 时段投标有功功率费用函数; $P_{i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商对区域电网有功输出或输入功率,根据阶梯分段报价方式, $P_{i,t}^{\text{VPP}}$ 表示为:

$$[0043] \quad P_{i,t}^{\text{VPP}} = \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (10)$$

[0044] 式中: m_{in} 、 m_{out} 分别为虚拟电厂代理商在有功输入和输出报价区间个数; $P_{k,i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商在 k 区间中有功功率输入量或输出量;

[0045] 虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用函数表示为:

$$[0046] \quad F_{i,t}^{\text{VPP}} (P_{i,t}^{\text{VPP}}) = \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} b_{k,i,t}^{\text{VPP}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} b_{k,i,t}^{\text{VPP}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (11)$$

[0047] 式中: $b_{k,i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商在 k 区间有功投标价格;

[0048] 传统发电机组成本包括:

$$[0049] \quad c_{\text{GEN}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} \left[\sum_{t=1}^T (F_{i,t}^{\text{GEN}} (P_{i,t}^{\text{GEN}}) + b_{Q,i,t}^{\text{GEN}} Q_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{R,i,t}^{\text{GEN}} R_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{C,j,t}^{\text{GEN}} C_{i,t}^{\text{GEN}} + b_{D,j,t}^{\text{GEN}} D_{i,t}^{\text{GEN}}) \right] \quad (12)$$

[0050] 式中: n_{GEN} 为发电机组总数; $b_{Q,i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{R,i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{C,j,t}^{\text{GEN}}$ 、 $b_{D,j,t}^{\text{GEN}}$ 分别为节点 i 处发电机组在 t

时段有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程成本； $P_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{GEN}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{GEN}}$ 分别为t时段的节点i处发电机组提供的有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程，

[0051] $F_{i,t}^{\text{GEN}}(\cdot)$ 为节点i处发电机组在t时段发电成本函数，具体表示为：

$$[0052] \quad F_i^{\text{GEN}}(P_{i,t}^{\text{GEN}}) = a_i (P_{i,t}^{\text{GEN}})^2 + b_i P_{i,t}^{\text{GEN}} + c_i \quad (13)$$

[0053] 式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为传统发电机组i的运行成本参数；

[0054] 考虑到发电机组发电成本曲线与分段阶梯价格曲线的相似性，同样令传统发电机组代理商分段报价：

$$[0055] \quad P_{i,t}^{\text{GEN}} = \sum_{l=1}^{m_g} P_{l,i,t}^{\text{GEN}} \quad (14)$$

$$[0056] \quad F_{i,t}^{\text{GEN}}(P_{i,t}^{\text{GEN}}) = \sum_{l=1}^{m_g} b_{l,i,t}^{\text{GEN}} P_{l,i,t}^{\text{GEN}} \quad (15)$$

[0057] 式中： m_g 分别为发电机组代理商发电报价区间个数； $P_{k,i,t}^{\text{GEN}}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在1区间中发电量。

[0058] 进一步的，步骤S12中，各市场参与者约束条件包括：

[0059] 1、电网侧运营商需要考虑区域电网系统的运行约束

[0060] 其中，系统潮流分布用线性化方程来描述，如式(62) - (65)所示；式(66) - (68)表示区域电网系统的节点电压与支路潮流需要满足的系统安全运行约束；式(69)与式(70)分别表示区域电网节点的有功和无功平衡，

$$[0061] \quad P_{ij} = \frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (16)$$

$$[0062] \quad Q_{ij} = -\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (17)$$

$$[0063] \quad P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(\frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (18)$$

$$[0064] \quad Q_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(-\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (19)$$

$$[0065] \quad \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \quad (20)$$

$$[0066] \quad \underline{Q}_{ij} \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij} \quad (21)$$

$$[0067] \quad \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (22)$$

$$[0068] \quad P_i = P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{VPP}} + P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{DE}} \quad (23)$$

$$[0069] \quad Q_i = Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{VPP}} + Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{DE}} \quad (24)$$

[0070] 式中： n_b 为区域电网节点总数； P_{ij} 、 Q_{ij} 、 r_{ij} 、 x_{ij} 分别为节点i和节点j之间线路的有功潮流、无功潮流、电阻和电抗； P_i 、 Q_i 、 V_i 、 θ_i 分别为节点i处的净注入有功功率、注入无功功率、电压幅值和相角； $P_{i,t}^{DE}$ 和 $Q_{i,t}^{DE}$ 分别为t时刻节点i处的有功和无功负荷需求； \bar{P}_{ij} 、 \underline{P}_{ij} 、 \bar{Q}_{ij} 、 \underline{Q}_{ij} 为节点i和节点j之间线路的有功和无功潮流上下限； \bar{V}_i 和 \underline{V}_i 分别为节点i处电压上下限；

[0071] 2、电网直控的传统发电机组需要满足运行约束

[0072] 式(71) - (72)分别表示发电机组的有功和无功出力约束；考虑到各类市场产品之间的耦合关系，式(73)和式(74)描述了有功功率、旋转备用和调频容量三类产品共同受到有功出力投标范围的限制，式(75)代表了调频容量和调频里程的耦合关系，

$$[0073] \quad \underline{P}_i^{GEN} \leq P_{i,t}^{GEN} \leq \bar{P}_i^{GEN} \quad (25)$$

$$[0074] \quad \underline{Q}_i^{GEN} \leq Q_{i,t}^{GEN} \leq \bar{Q}_i^{GEN} \quad (26)$$

$$[0075] \quad P_{i,t}^{GEN} + R_{i,t}^{GEN} + C_{i,t}^{GEN} \leq \bar{P}_i^{GEN} \quad (27)$$

$$[0076] \quad P_{i,t}^{GEN} - C_{i,t}^{GEN} \geq \underline{P}_i^{GEN} \quad (28)$$

$$[0077] \quad \underline{\kappa} C_{i,t}^{GEN} \leq L_i^{GEN} \leq \bar{\kappa} C_{i,t}^{GEN} \quad (29)$$

$$[0078] \quad \tan(\arccos(-\lambda_{GEN})) \leq \frac{Q_{i,t}^{GEN}}{P_{i,t}^{GEN}} \leq \tan(\arccos(\lambda_{GEN})) \quad (30)$$

[0079] 式中： \bar{P}_i^{GEN} 、 \underline{P}_i^{GEN} 、 \bar{Q}_i^{GEN} 、 \underline{Q}_i^{GEN} 分别为节点i处发电机组在t时刻的有功和无功出力上下限； $\underline{\kappa}$ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为单位调频容量下的最小和最大利用率； λ_{GEN} 为发电机组的功率因数限制值；

[0080] 3、任意时刻下，整个系统的辅助服务需要满足供需平衡，如式(77) - (79)所示：

$$[0081] \quad R_t^{PT} + \sum_{i=1}^{n_{VPP}} R_{i,t}^{VPP} + \sum_{i=1}^{n_{GEN}} R_{i,t}^{GEN} - R_t^{DE} = 0 \quad (31)$$

$$[0082] \quad C_t^{PT} + \sum_{i=1}^{n_{VPP}} C_{i,t}^{VPP} + \sum_{i=1}^{n_{GEN}} C_{i,t}^{GEN} - C_t^{DE} = 0 \quad (32)$$

$$[0083] \quad D_t^{PT} + \sum_{i=1}^{n_{VPP}} D_{i,t}^{VPP} + \sum_{i=1}^{n_{GEN}} D_{i,t}^{GEN} - D_t^{DE} = 0 \quad (33)$$

[0084] 式中： R_t^{DE} 、 C_t^{DE} 和 D_t^{DE} 分别为t时刻系统调频备用需求，调频容量需求和总调频里程需求；

[0085] 4、虚拟电厂投标模型约束

[0086] 虚拟电厂投标模型约束见式(80) - (90)，

[0087] (80) - (84)为虚拟电厂各类市场产品的投标范围约束，

[0088] 式(80)是对每一个有功报价区间的功率范围进行限制，

[0089] 式(84)表示虚拟电厂提供调频里程服务的前提是提供调频容量服务，

[0090] 式(85) - (86)是虚拟电厂投标的广义能量约束，

[0091] 式(87)与式(88)为各类市场产品之间的耦合约束，

[0092] 式(89)表示虚拟电厂代理商可以提交一个期望的虚拟电厂在市场调度周期最终时刻的广义能量状态范围,以平衡本调度周期与下一个周期的获利期望。

[0093] 虚拟电厂应保持一定量的能量储备,至少能够提供有效时间 h 的连续调节服务,如式(90),调频容量有效时间 h^C 设为15min,旋转备用有效时间 h^R 设为1h;

$$[0094] \quad 0 \leq P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (34)$$

$$[0095] \quad \underline{Q}_i^{\text{VPP}} \leq Q_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{Q}_i^{\text{VPP}} \quad (35)$$

$$[0096] \quad 0 \leq R_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{R}_i^{\text{VPP}} \quad (36)$$

$$[0097] \quad 0 \leq C_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{C}_i^{\text{VPP}} \quad (37)$$

$$[0098] \quad \max(\kappa C_{i,t}^{\text{VPP}}, 0) \leq D_i^{\text{VPP}} \leq \min(\bar{\kappa} C_{i,t}^{\text{VPP}}, \bar{D}_i^{\text{VPP}}) \quad (38)$$

$$[0099] \quad E_{i,t}^{\text{VPP}} = E_{i,t-1}^{\text{VPP}} - \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (39)$$

$$[0100] \quad \underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}} \leq E_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}} \quad (40)$$

$$[0101] \quad \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} + R_{i,t}^{\text{VPP}} + C_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (41)$$

$$[0102] \quad \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - C_{i,t}^{\text{VPP}} \geq \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (42)$$

$$[0103] \quad \underline{E}_{i,\text{fin}}^{\text{VPP}} \leq E_{i,T}^{\text{VPP}} \leq \bar{E}_{i,\text{fin}}^{\text{VPP}} \quad (43)$$

$$[0104] \quad R_{i,t}^{\text{VPP}} h^R + C_{i,t}^{\text{VPP}} h^C \leq \min(\bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}} - E_{i,t}^{\text{VPP}}, E_{i,t}^{\text{VPP}} - \underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}}) \quad (44)$$

[0105] 式中: $\bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}}$ 为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商有功功率在 k 区间的上限; $\underline{Q}_i^{\text{VPP}}$ 、 \bar{Q}_i^{VPP} 分别为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂代理商无功出力范围的投标上下限; \bar{R}_i^{VPP} 、 \bar{C}_i^{VPP} 、 \bar{D}_i^{VPP} 分别为虚拟电厂代理商旋转备用、调频容量、调频里程投标上限; $E_{i,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时刻节点 i 处虚拟电厂广义能量状态; κ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为调频设备的最小和最大比率; $\bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为 t 时段的节点 i 处虚拟电厂广义能量状态的上下限。

[0106] 进一步的,步骤S13中,所述的市场出清目标函数模型使用商业优化软件进行求解,引入拉格朗日乘子,得到优化问题的增广拉格朗日函数如下:

$$[0107] \quad L(x, \mu_n, \lambda_m, \lambda_{i,t}^P, \lambda_{i,t}^Q, \lambda_t^R, \lambda_t^C, \lambda_t^D) = \left[\begin{array}{l} \Phi^{\text{DN}}(x) + \sum_{n=1}^N \mu_n (f_n(x)) + \sum_{m=1}^M \lambda_m (a_m^T x - b_m) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_{i,t}^P (P_i \cdot S_N - P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{VPP}} - P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_{i,t}^Q (Q_i \cdot S_N - Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{VPP}} - Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^R \left(R_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} R_{i,t}^{\text{GEN}} - R_t^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^C \left(C_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} C_{i,t}^{\text{GEN}} - C_t^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_t^D \left(D_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} D_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} D_{i,t}^{\text{GEN}} - D_t^{\text{DE}} \right) \end{array} \right] \quad (45)$$

[0108] 式中： μ_n 为不等式约束的拉格朗日乘子； $\lambda_{i,t}^P$ 、 $\lambda_{i,t}^Q$ 、 λ_t^R 、 λ_t^C 和 λ_t^D 分别为等式约束条件(69)、(70)、(77)、(78)、(79)对应的拉格朗日乘子； λ_m 为其余等式约束m对应的拉格朗日乘子；

[0109] 根据包络定理得到各节点的有功功率和无功功率的分时出清价格，以及旋转备用、调频容量和调频里程的分时出清价格：

$$[0110] \quad \begin{aligned} b_{i,t}^P &= \frac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^P, \quad i=1,2,\dots,n_b, t=1,2,\dots,T \\ b_{i,t}^Q &= \frac{\partial L}{\partial Q_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^Q, \quad i=1,2,\dots,n_b, t=1,2,\dots,T \\ b_t^R &= \frac{\partial L}{\partial R_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^R, \quad t=1,2,\dots,T \\ b_t^C &= \frac{\partial L}{\partial C_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^C, \quad t=1,2,\dots,T \\ b_t^D &= \frac{\partial L}{\partial D_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^D, \quad t=1,2,\dots,T \end{aligned} \quad (46)$$

[0111] 式中： $b_{i,t}^P$ 和 $b_{i,t}^Q$ 分别为t时段的区域电网节点i处的有功和无功的节点出清价格； b_t^R 、 b_t^C 和 b_t^D 分别为t时刻区域电网旋转备用、调频容量和调频里程的边际出清价格。

[0112] 本发明具有如下的有益效果及优点：本发明的多元市场出清系统优化运行方法，能够获得电力市场中各类产品出清价格，并根据市场出清价格实现区域电网中多个虚拟电厂的联合优化调度。本发明充分考虑了虚拟电厂广义能量约束对优化模型的影响，提出虚拟电厂广义能量约束模型，补充虚拟电厂参与电力市场标准外特性，所提方法解决了虚拟电厂广义能量约束时变的出清问题，提升了虚拟电厂参与电网侧电力市场的主动性与灵活性，提高了整个电力市场的经济性。本发明的多元市场出清系统优化运行方法囊括了四类运营主体，充分适应多种电力市场环境，应用范围广。同时方法考虑了五种服务的运营成本，有效弥补以新能源为主体的新型电力系统复杂环境下对多主体、多服务优化运行的需求；本发明同时兼顾虚拟电厂根据功率成本阶梯报价的情况，并根据边际出清价格合理优化资源配置，能够降低调峰调频服务的成本，促进新能源消纳。

附图说明

- [0113] 图1为虚拟电厂参与电力市场商业运营模式架构图；
 [0114] 图2为计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法流程图；
 [0115] 图3为有功功率分段阶梯价格曲线示意图。

具体实施方式

[0116] 下面根据说明书附图举例对本发明做进一步的说明：

[0117] 实施例1

[0118] 如图2所示，一种计及虚拟电厂广义能量约束的多元市场出清系统优化方法，步骤如下：

[0119] 步骤S10：构建含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型，确定含有广义能量约束的虚拟电厂参与电力市场的报价模式、投标内容与收益来源；

[0120] 考虑到虚拟电厂内部具有多种类型的灵活性资源，可以为电网提供多种服务，因此，虚拟电厂参与电力市场需要根据其内部各类需求侧和电源侧资源特征构建虚拟电厂聚合模型。对于参与日前和实时经济调度的虚拟电厂出清优化问题，虚拟电厂广义能量状态定义为虚拟电厂中各类分布式储能设备剩余能量(State of Energy, SOE)以及楼宇和能源管道中冷能、热能、天然气各类与电能存在交互所有能量的状态。虚拟电厂的广义能量约束则表示虚拟电厂可支配调度的能量范围。虚拟电厂的广义能量状态并不需要完全统计整个虚拟电厂的总能量储备。可以在任意时刻赋予虚拟电厂一个广义能量状态值，主要目的是为了研究接下来一段时间内虚拟电厂广义能量状态值的变化。所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型包括虚拟电厂功率约束和虚拟电厂广义能量约束：

$$[0121] \quad \underline{P}^{\text{VPP}} \leq P_t^{\text{VPP}} \leq \overline{P}^{\text{VPP}} \quad (47)$$

$$[0122] \quad \underline{E}_t^{\text{VPP}} \leq E_t^{\text{VPP}} \leq \overline{E}_t^{\text{VPP}} \quad (48)$$

$$[0123] \quad E_t^{\text{VPP}} = E_{t-1}^{\text{VPP}} - P_t^{\text{VPP}} \quad (49)$$

[0124] 式(47)表示虚拟电厂功率约束。式中 $\overline{P}^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{P}^{\text{VPP}}$ 分别为虚拟电厂有功功率上下限； P_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂输出或输入的有功量。由于虚拟电厂带有储能性质，因此约束下限能够为负数，定义放电时 P_t^{VPP} 为正。式(48)表示虚拟电厂能量约束。式中 $\overline{E}_t^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{E}_t^{\text{VPP}}$ 分别为虚拟电厂广义能量状态的上下限； E_t^{VPP} 为t时刻虚拟电厂的广义能量状态。式(49)表示虚拟电厂广义能量状态计算公式。

[0125] 需要注意的是，虚拟电厂广义能量约束具有时变性，主要包含以下3个原因：

[0126] (1) 由于可控负荷与分布式储能具有时变性，虚拟电厂广义能量边界也存在随着电网运行周期变化的特征。例如，电动汽车在白天多处于运行状态，而到夜晚则可以聚合为移动储能参与调度。

[0127] (2) 大多数虚拟电厂内部同时存在风电、光伏等新能源发电机组与用电负荷，其内部调度一般无法实现发电与用电之间的绝对平衡，而能量的冗余或缺口的正是需要与上级电力市场交易进行出售或补充。虚拟电厂广义能量边界也会表现出这部分能量变化。

[0128] (3) 虚拟电厂内部的能量转换器在进行能量形式的转换时，会产生一部分能量损

耗。由于难以直接统计这部分能量变化对虚拟电厂广义能量状态值的影响,可以用广义能量边界的降低抵消这部分影响。

[0129] 在该虚拟电厂聚合模型中,式(48)、(49)完善虚拟电厂的能量特征,能够将各种分布式资源纳入虚拟电厂并统一由上级电网调度。一般虚拟电厂模型只包含式(47),这种情况下,仅由分布式储能构成的虚拟电厂则无法参与电力市场经济调度。该模型可以拓展电力市场的决策范围,提高虚拟电厂参电力市场的灵活性。

[0130] 较早期电力市场交易模型中虚拟电厂有功功率投标往往采用与传统火电等主体一样的模式。在这种模式下,虚拟电厂仅进行售电,申报内容仅包含每个时间段内的电价曲线和有功功率范围。在这种机制下虚拟电厂实际申报的功率范围较小,灵活性较低,不利于电力市场和虚拟电厂的发展。

[0131] 随着新能源的发展,虚拟电厂报量模式应运而生。在报量模式中,虚拟电厂根据新能源发电预测结果,向电力市场提交各个时段的发电量,最后根据市场出清价格进行结算。这种模式要求虚拟电厂对不同时间段的边际电价进行预测,并根据预测的市场出清电价对报量策略进行优化,以获取最大化收益,并保证市场出清结果可行。

[0132] 但在电力市场实际运营过程中,每个虚拟电厂代理掌握的市场信息有限,只能根据虚拟电厂内部的运营情况分散决策,无法准确预知其他市场主体的投标数量,因此不能实现准确预测市场出清价格,在传统的报量或报价的市场机制下也就难以制定自身的最优投标策略,这导致虚拟电厂的实际收益会与预期产生一定偏差。同时,电力市场运营只能根据各市场参与者的投标信息进行市场出清,这不仅会造成市场运营总成本的增加,造成资源的浪费,同时还会给区域市场运营商带来一定的风险。在极端情况下,市场参与者的分散投标策略会导致市场出清结果不唯一甚至是无解的情况。

[0133] 对于现存市场机制的缺陷,本实施例引入虚拟电厂广义能量状态约束,补充了虚拟电厂外特性。同时,对于虚拟电厂有功报价模式,可以令每个虚拟电厂代理商使用如图3中的分段阶梯价格曲线向电网侧提交投标价格。由于虚拟电厂在内部调度时,分布式发电、储能、可控负荷等资源随提供的有功量增加,边际成本也会递增。同时,虚拟电厂作为电力市场参与者,其输入或输出的有功功率跨度较大,实际电量单价存在较大波动。因此,最终虚拟电厂有功报价曲线应该是一条递增曲线。

[0134] 将虚拟电厂代理商中标的有功输入或输出功率根据不同的价格区间进行分解:

$$[0135] \begin{cases} P^{\text{VPP}} = \sum_{k=-1}^{-n} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n P_k^{\text{VPP}} \\ P_{k-1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}}, k \geq 2 \\ P_{k+1}^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}} \leq P_k^{\text{VPP}}, k \leq -2 \\ 0 \leq P_1^{\text{VPP}} \leq P_1^{\text{VPP}}, 0 \leq P_{-1}^{\text{VPP}} \leq P_{-1}^{\text{VPP}} \end{cases} \quad (50)$$

[0136] 式中: P^{VPP} 为虚拟电厂代理商中标的有功功率输入或输出总量; P_k^{VPP} 为虚拟电厂有功功率分解后,在第k个价格区间中有功输出或输入功率。

[0137] 因此,本次中标的虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用为:

$$[0138] \quad c = \sum_{k=-1}^{-n} b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} - \sum_{k=1}^n b_k^{\text{VPP}} P_k^{\text{VPP}} \quad (51)$$

[0139] 此外,本实施例市场允许虚拟电厂代理申报期望的市场调度周期最终时刻的虚拟电厂广义能量状态范围。虚拟电厂可以提前预测较长一段时间内的新能源出力和需求负荷等情况,通常大于一个电力市场的调度周期,因而虚拟电厂代理希望能够提前规划后续的调度周期内的盈利策略。从结果来看,这种机制可以以平衡虚拟电厂本调度周期与下一个周期的获利期望,同时提高了虚拟电厂的自由度,有利于虚拟电厂与电力市场的发展。

[0140] 在区域电网中,将虚拟电厂的发电与用电功率按分时节点边际价格进行结算,可以得到虚拟电厂的净利润,其中主要包含售电获利(对于用电型虚拟电厂,则是从电网购电的总费用)与在不同时段充放电赚取差价的获利两部分收益。

[0141] 式(52)说明虚拟电厂参与电力市场的总收益(或总费用)来源。

$$[0142] \quad \pi = \sum_{t=1}^T b_t^P (P_t^{\text{VPP.sell}} - P_t^{\text{VPP.buy}}) \quad (52)$$

[0143] 式中: π 为虚拟电厂的总收益; $P_t^{\text{VPP.sell}}$ 与 $P_t^{\text{VPP.buy}}$ 分别表示t时段虚拟电厂售电量与购电量; b_t^P 表示t时段区域电网的有功边际价格。

[0144] 步骤S11:获取区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品,包含:有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五类市场产品的交易价格和限额、电网直控的发电机组参数与成本函数、虚拟电厂各类产品投标计划和出力约束;

[0145] 步骤S12:通过所述的含有广义能量约束的虚拟电厂聚合模型与步骤S11获取的区域电网系统结构与参数、电网侧申报用户需求负荷预测数据、外部电力批发市场各类产品的数据,建立以最小化市场成本为目标的市场出清目标函数模型,以及构建各市场参与者约束条件;

[0146] 其中,虚拟电厂聚合模型涉及有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量和调频里程5项电力产品交易。多元市场优化出清目标是最小化市场成本,优化目标函数如下所示:

$$[0147] \quad \min \Phi^{\text{DN}} = c_{\text{PT}} + c_{\text{VPP}} + c_{\text{GEN}} \quad (53)$$

[0148] 式中: c_{PT} 、 c_{VPP} 、 c_{GEN} 分别表示从上级批发市场购入服务的总成本,从虚拟电厂代理商购入服务的总成本,以及传统发电机组总成本。

[0149] 批发市场购入服务的总成本包括:

$$[0150] \quad c_{\text{PT}} = \sum_{t=1}^T (b_{P,t}^{\text{PT}} P_{i,t}^{\text{PT}} + b_{Q,t}^{\text{PT}} Q_{i,t}^{\text{PT}} + b_{R,t}^{\text{PT}} R_{i,t}^{\text{PT}} + b_{C,t}^{\text{PT}} C_{i,t}^{\text{PT}} + b_{D,t}^{\text{PT}} D_{i,t}^{\text{PT}}) \quad (54)$$

[0151] 式中:T为总运行时段数, $b_{P,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{Q,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{R,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{C,t}^{\text{PT}}$ 、 $b_{D,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在t时段从上级输电侧批发市场购入有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的价格; $P_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $R_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{PT}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{PT}}$ 分别为区域电网在t时段的节点i处从上级输电侧批发市场有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程五项服务的购入量。

[0152] 虚拟电厂代理商购入服务的总成本包括:

$$[0153] \quad c_{\text{VPP}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} \left[\sum_{t=1}^T (F_{i,t}^{\text{VPP}} (P_{i,t}^{\text{VPP}}) + b_{Q,i,t}^{\text{VPP}} Q_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{R,i,t}^{\text{VPP}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{C,i,t}^{\text{VPP}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + b_{D,i,t}^{\text{VPP}} D_{i,t}^{\text{VPP}}) \right] \quad (55)$$

[0154] 式中: n_{VPP} 为虚拟电厂并网节点数; $b_{Q,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{R,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{C,i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $b_{D,i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为节点i处虚拟电

厂代理商在t时段投标的无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程价格； $Q_{i,t}^{VPP}$ 、 $R_{i,t}^{VPP}$ 、 $C_{i,t}^{VPP}$ 、 $D_{i,t}^{VPP}$ 分别为区域电网在t时段的节点i处虚拟电厂代理商无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程的购入量； $F_{i,t}^{VPP}(\cdot)$ 为节点i处虚拟电厂代理商在t时段投标有功功率费用函数； $P_{i,t}^{VPP}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商对区域电网有功输出或输入功率，根据阶梯分段报价方式， $P_{i,t}^{VPP}$ 可以表示为：

$$[0155] \quad P_{i,t}^{VPP} = \sum_{k=-1}^{-m_{out}} P_{k,i,t}^{VPP} - \sum_{k=1}^{m_{in}} P_{k,i,t}^{VPP} \quad (56)$$

[0156] 式中： m_{in} 、 m_{out} 分别为虚拟电厂代理商在有功输入和输出报价区间个数； $P_{k,i,t}^{VPP}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在k区间中有功功率输入量或输出量。

[0157] 虚拟电厂代理商投标有功功率服务费用函数可表示为：

$$[0158] \quad F_{i,t}^{VPP}(P_{i,t}^{VPP}) = \sum_{k=-1}^{-m_{out}} b_{k,i,t}^{VPP} P_{k,i,t}^{VPP} - \sum_{k=1}^{m_{in}} b_{k,i,t}^{VPP} P_{k,i,t}^{VPP} \quad (57)$$

[0159] 式中： $b_{k,i,t}^{VPP}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在k区间有功投标价格。

[0160] 传统发电机组成本包括：

$$[0161] \quad c_{GEN} = \sum_{i=1}^{n_{GEN}} \left[\sum_{t=1}^T \left(F_{i,t}^{GEN}(P_{i,t}^{GEN}) + b_{Q,i,t}^{GEN} Q_{i,t}^{GEN} + b_{R,i,t}^{GEN} R_{i,t}^{GEN} + b_{C,j,t}^{GEN} C_{i,t}^{GEN} + b_{D,j,t}^{GEN} D_{i,t}^{GEN} \right) \right] \quad (58)$$

[0162] 式中： n_{GEN} 为发电机组总数； $b_{Q,i,t}^{GEN}$ 、 $b_{R,i,t}^{GEN}$ 、 $b_{C,j,t}^{GEN}$ 、 $b_{D,j,t}^{GEN}$ 分别为节点i处发电机组在t时段有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程成本； $P_{i,t}^{GEN}$ 、 $Q_{i,t}^{GEN}$ 、 $R_{i,t}^{GEN}$ 、 $C_{i,t}^{GEN}$ 、 $D_{i,t}^{GEN}$ 分别为t时段的节点i处发电机组提供的有功功率、无功功率、旋转备用、调频容量、调频里程。 $F_{i,t}^{GEN}(\cdot)$ 为节点i处发电机组在t时段发电成本函数，具体可表示为：

$$[0163] \quad F_{i,t}^{GEN}(P_{i,t}^{GEN}) = a_i (P_{i,t}^{GEN})^2 + b_i P_{i,t}^{GEN} + c_i \quad (59)$$

[0164] 式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为传统发电机组i的运行成本参数。

[0165] 考虑到发电机组发电成本曲线与分段阶梯价格曲线的相似性，同样可以令传统发电机组代理商分段报价：

$$[0166] \quad P_{i,t}^{GEN} = \sum_{l=1}^{m_g} P_{l,i,t}^{GEN} \quad (60)$$

$$[0167] \quad F_{i,t}^{GEN}(P_{i,t}^{GEN}) = \sum_{l=1}^{m_g} b_{l,i,t}^{GEN} P_{l,i,t}^{GEN} \quad (61)$$

[0168] 式中： m_g 分别为发电机组代理商发电报价区间个数； $P_{k,i,t}^{GEN}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商在l区间中发电量。

[0169] 约束条件包括：

[0170] (1) 电网侧运营商需要考虑区域电网系统的运行约束。

[0171] 其中,系统潮流分布可以用线性化方程来描述,如式(62) - (65)所示。此外,式(66) - (68)表示区域电网系统的节点电压与支路潮流需要满足的系统安全运行约束。式(69)与式(70)分别表示区域电网节点的有功和无功平衡。

$$[0172] \quad P_{ij} = \frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (62)$$

$$[0173] \quad Q_{ij} = -\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (63)$$

$$[0174] \quad P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(\frac{x_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{r_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (64)$$

$$[0175] \quad Q_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{n_b} \left(-\frac{r_{ij}(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + \frac{x_{ij}(V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right) \quad (65)$$

$$[0176] \quad \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \quad (66)$$

$$[0177] \quad \underline{Q}_{ij} \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij} \quad (67)$$

$$[0178] \quad \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (68)$$

$$[0179] \quad P_i = P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{VPP}} + P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{DE}} \quad (69)$$

$$[0180] \quad Q_i = Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{VPP}} + Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{DE}} \quad (70)$$

[0181] 式中: n_b 为区域电网节点总数; P_{ij} 、 Q_{ij} 、 r_{ij} 、 x_{ij} 分别为节点i和节点j之间线路的有功潮流、无功潮流、电阻和电抗.; P_i 、 Q_i 、 V_i 、 θ_i 分别为节点i处的净注入有功功率、注入无功功率、电压幅值和相角; $P_{i,t}^{\text{DE}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{DE}}$ 分别为t时刻节点i处的有功和无功负荷需求; \bar{P}_{ij} 、 \underline{P}_{ij} 、 \bar{Q}_{ij} 、 \underline{Q}_{ij} 为节点i和节点j之间线路的有功和无功潮流上下限; \bar{V}_i 和 \underline{V}_i 分别为节点i处电压上下限。

[0182] (2) 电网直控的传统发电机组需要满足运行约束。

[0183] 式(71)、(72)分别表示发电机组的有功和无功出力约束;考虑到各类市场产品之间的耦合关系,式(73)和式(74)描述了有功功率、旋转备用和调频容量3类产品共同受到有功出力投标范围的限制,式(75)代表了调频容量和调频里程的耦合关系。

$$[0184] \quad \underline{P}_i^{\text{GEN}} \leq P_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{P}_i^{\text{GEN}} \quad (71)$$

$$[0185] \quad \underline{Q}_i^{\text{GEN}} \leq Q_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{Q}_i^{\text{GEN}} \quad (72)$$

$$[0186] \quad P_{i,t}^{\text{GEN}} + R_{i,t}^{\text{GEN}} + C_{i,t}^{\text{GEN}} \leq \bar{P}_i^{\text{GEN}} \quad (73)$$

$$[0187] \quad P_{i,t}^{\text{GEN}} - C_{i,t}^{\text{GEN}} \geq \underline{P}_i^{\text{GEN}} \quad (74)$$

$$[0188] \quad \underline{K}C_{i,t}^{\text{GEN}} \leq L_i^{\text{GEN}} \leq \bar{K}C_{i,t}^{\text{GEN}} \quad (75)$$

$$[0189] \quad \tan(\arccos(-\lambda_{\text{GEN}})) \leq \frac{Q_{i,t}^{\text{GEN}}}{P_{i,t}^{\text{GEN}}} \leq \tan(\arccos(\lambda_{\text{GEN}})) \quad (76)$$

[0190] 式中： \bar{P}_i^{GEN} 、 $\underline{P}_i^{\text{GEN}}$ 、 \bar{Q}_i^{GEN} 、 $\underline{Q}_i^{\text{GEN}}$ 分别为节点*i*处发电机组在*t*时刻的有功和无功出力上下限； $\underline{\kappa}$ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为单位调频容量下的最小和最大利用率； λ_{GEN} 为发电机组的功率因数限制值。

[0191] (3) 任意时刻下,整个系统的辅助服务需要满足供需平衡,如式(77) - (79)所示。

$$[0192] \quad R_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} R_{i,t}^{\text{GEN}} - R_t^{\text{DE}} = 0 \quad (77)$$

$$[0193] \quad C_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} C_{i,t}^{\text{GEN}} - C_t^{\text{DE}} = 0 \quad (78)$$

$$[0194] \quad D_t^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{VPP}}} D_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GEN}}} D_{i,t}^{\text{GEN}} - D_t^{\text{DE}} = 0 \quad (79)$$

[0195] 式中： R_t^{DE} 、 C_t^{DE} 和 D_t^{DE} 分别为*t*时刻系统调频备用需求,调频容量需求和总调频里程需求。

[0196] (4) 虚拟电厂投标模型约束。

[0197] 虚拟电厂投标模型约束见式(80) - (90),其中(80) - (84)为虚拟电厂各类市场产品的投标范围约束,其中式(80)是对每一个有功报价区间的功率范围进行限制,式(84)表示虚拟电厂提供调频里程服务的前提是提供调频容量服务;式(85) - (86)是虚拟电厂投标的广义能量约束,式(87)与式(88)为各类市场产品之间的耦合约束;式(89)表示虚拟电厂代理商可以提交一个期望的虚拟电厂在市场调度周期最终时刻的广义能量状态范围,以平衡本调度周期与下一个周期的获利期望。

[0198] 考虑到电力系统运行的随机性,上级市场运营商发布的辅助服务指令在虚拟电厂监管范围内也存在不确定性。特别是调频服务,在每一个市场运行时段,调频指令无法预测,可能存在调节范围内多次随机变化的情况。因此,为了降低风险,避免辅助服务指令的不确定性带来的损失,虚拟电厂应保持一定量的能量储备,至少能够提供有效时间*h*的连续调节服务。如式(90),一般情况下,调频容量有效时间 h^{C} 设为15min,旋转备用有效时间 h^{R} 设为1h。

$$[0199] \quad 0 \leq P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (80)$$

$$[0200] \quad \underline{Q}_i^{\text{VPP}} \leq Q_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{Q}_i^{\text{VPP}} \quad (81)$$

$$[0201] \quad 0 \leq R_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{R}_i^{\text{VPP}} \quad (82)$$

$$[0202] \quad 0 \leq C_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{C}_i^{\text{VPP}} \quad (83)$$

$$[0203] \quad \max(\underline{\kappa} C_{i,t}^{\text{VPP}}, 0) \leq D_i^{\text{VPP}} \leq \min(\bar{\kappa} C_{i,t}^{\text{VPP}}, \bar{D}_i^{\text{VPP}}) \quad (84)$$

$$[0204] \quad E_{i,t}^{\text{VPP}} = E_{i,t-1}^{\text{VPP}} - \sum_{k=-1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} \quad (85)$$

$$[0205] \quad \underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}} \leq E_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}} \quad (86)$$

$$[0206] \quad \sum_{k=1}^{-m_{\text{out}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} + R_{i,t}^{\text{VPP}} + C_{i,t}^{\text{VPP}} \leq \sum_{k=1}^{-m_{\text{out}}} \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (87)$$

$$[0207] \quad \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} P_{k,i,t}^{\text{VPP}} - C_{i,t}^{\text{VPP}} \geq \sum_{k=1}^{m_{\text{in}}} \bar{P}_{k,i}^{\text{VPP}} \quad (88)$$

$$[0208] \quad \underline{E}_{i,\text{fin}}^{\text{VPP}} \leq E_{i,T}^{\text{VPP}} \leq \bar{E}_{i,\text{fin}}^{\text{VPP}} \quad (89)$$

$$[0209] \quad R_{i,t}^{\text{VPP}} h^R + C_{i,t}^{\text{VPP}} h^C \leq \min(\bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}} - E_{i,t}^{\text{VPP}}, E_{i,t}^{\text{VPP}} - \underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}}) \quad (90)$$

[0210] 式中： $\bar{P}_{k,i,t}^{\text{VPP}}$ 为t时段的节点i处虚拟电厂代理商有功功率在k区间的上限； $\underline{Q}_i^{\text{VPP}}$ 、 \bar{Q}_i^{VPP} 分别为t时段的节点i处虚拟电厂代理商无功出力范围的投标上下限； \bar{R}_i^{VPP} 、 \bar{C}_i^{VPP} 、 \bar{D}_i^{VPP} 分别为虚拟电厂代理商旋转备用、调频容量、调频里程投标上限； $E_{i,t}^{\text{VPP}}$ 为t时刻节点i处虚拟电厂广义能量状态； $\underline{\kappa}$ 和 $\bar{\kappa}$ 分别为调频设备的最小和最大比率； $\bar{E}_{i,t}^{\text{VPP}}$ 、 $\underline{E}_{i,t}^{\text{VPP}}$ 分别为t时段的节点i处虚拟电厂广义能量状态的上下限。

[0211] 步骤13:使用商业优化软件对步骤S12中构建的市场出清目标函数进行求解,获得各类市场产品的出清结果,包含分时节点出清价格和所有市场参与者的各类市场产品供给数量,其中,市场出清目标函数模型为混合整数二次规划(Mixed Integer Quadratic Program, MIQP)问题,使用gurobi商业优化软件进行求解,引入拉格朗日乘子,可以得到优化问题的增广拉格朗日函数如下:

$$[0212] \quad L(x, \mu_n, \lambda_m, \lambda_{i,t}^P, \lambda_{i,t}^Q, \lambda_{i,t}^R, \lambda_{i,t}^C, \lambda_{i,t}^D) = \left[\begin{array}{l} \Phi^{\text{DN}}(x) + \sum_{n=1}^N \mu_n (f_n(x)) + \sum_{m=1}^M \lambda_m (a_m^T x - b_m) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_h} \lambda_{i,t}^P (P_i \cdot S_N - P_{i,t}^{\text{PT}} - P_{i,t}^{\text{VPP}} - P_{i,t}^{\text{GEN}} + P_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_h} \lambda_{i,t}^Q (Q_i \cdot S_N - Q_{i,t}^{\text{PT}} - Q_{i,t}^{\text{VPP}} - Q_{i,t}^{\text{GEN}} + Q_{i,t}^{\text{DE}}) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_{i,t}^R \left(R_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} R_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} R_{i,t}^{\text{GEN}} - R_{i,t}^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_{i,t}^C \left(C_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} C_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} C_{i,t}^{\text{GEN}} - C_{i,t}^{\text{DE}} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \lambda_{i,t}^D \left(D_{i,t}^{\text{PT}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{VPP}}} D_{i,t}^{\text{VPP}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} D_{i,t}^{\text{GEN}} - D_{i,t}^{\text{DE}} \right) \end{array} \right] \quad (91)$$

[0213] 式中： μ_n 为不等式约束的拉格朗日乘子； $\lambda_{i,t}^P$ 、 $\lambda_{i,t}^Q$ 、 $\lambda_{i,t}^R$ 、 $\lambda_{i,t}^C$ 和 $\lambda_{i,t}^D$ 分别为等式约束条件(69)、(70)、(77)、(78)、(79)对应的拉格朗日乘子； λ_m 为其余等式约束m对应的拉格朗日乘子。

[0214] 根据包络定理(Envelope Theorem),可以得到各节点的有功功率和无功功率的分时出清价格,以及旋转备用、调频容量和调频里程的分时出清价格:

$$\begin{aligned}
 b_{i,t}^P &= \frac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^P, \quad i=1,2,\dots,n_b, t=1,2,\dots,T \\
 b_{i,t}^Q &= \frac{\partial L}{\partial Q_{i,t}^{\text{DE}}} = \lambda_{i,t}^Q, \quad i=1,2,\dots,n_b, t=1,2,\dots,T \\
 [0215] \quad b_t^R &= \frac{\partial L}{\partial R_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^R, \quad t=1,2,\dots,T \\
 b_t^C &= \frac{\partial L}{\partial C_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^C, \quad t=1,2,\dots,T \\
 b_t^D &= \frac{\partial L}{\partial D_t^{\text{DE}}} = \lambda_t^D, \quad t=1,2,\dots,T
 \end{aligned} \tag{92}$$

[0216] 式中： $b_{i,t}^P$ 和 $b_{i,t}^Q$ 分别为t时段的区域电网节点i处的有功和无功的节点出清价格； b_t^R 、 b_t^C 和 b_t^D 分别为t时刻区域电网旋转备用、调频容量和调频里程的边际出清价格。

[0217] 步骤S14:根据步骤S13中获取的出清结果,得到电力市场各类产品出清价格,电网侧运营商进行市场统一出清优化,输出统发电机出力曲线、虚拟电厂各时刻出力与广义能量状态曲线以及批发市场交易量,以及分时节点出清价格。

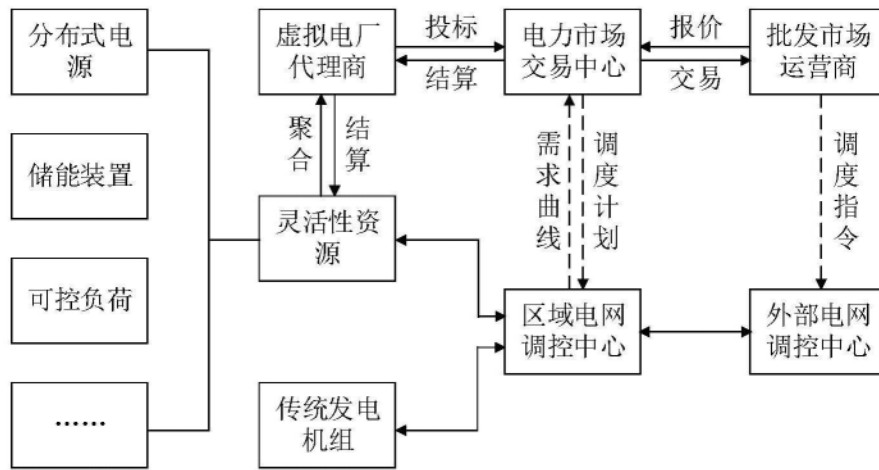


图1

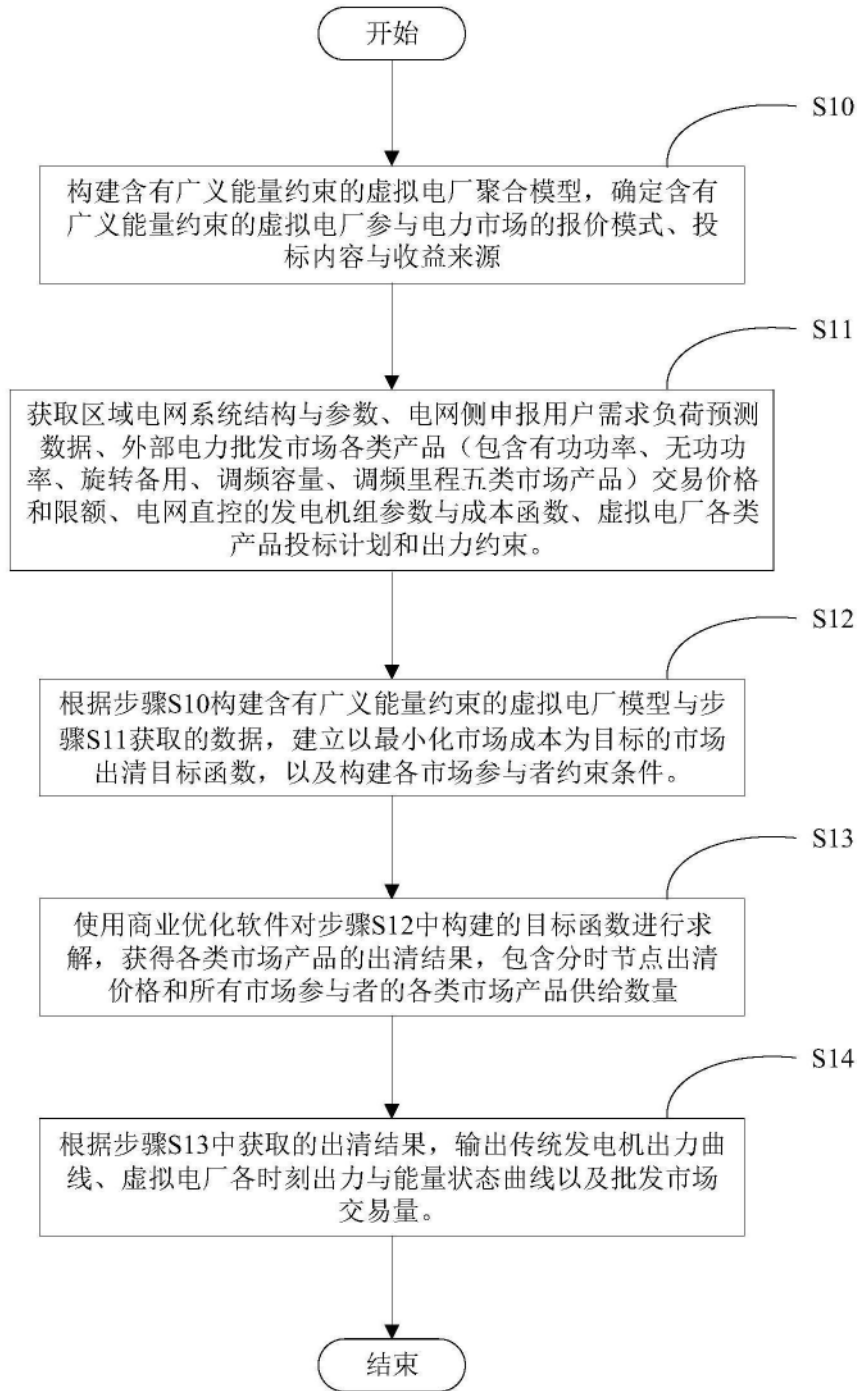


图2

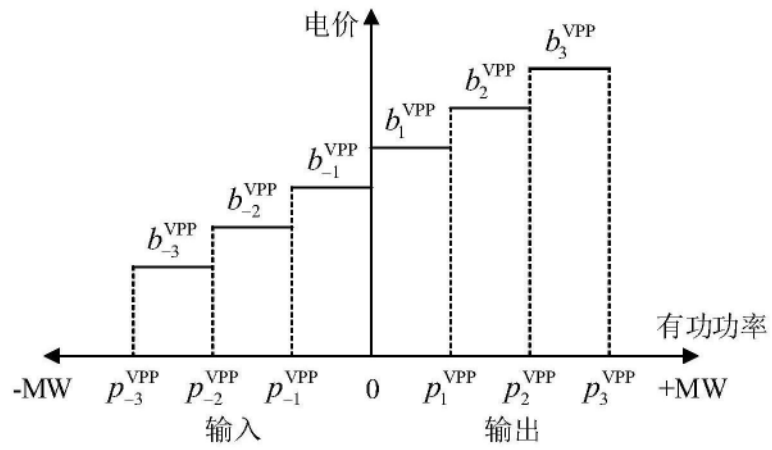


图3