

能量及调频市场下含储联盟体的竞价行为分析

李佩樾, 王致杰, 金珈辉

(上海电机学院电气学院, 上海 201306)

摘要: 随着储能调频市场的不断发展, 关于含储联盟体的决策行为对出清结果的影响及最大化自身收益的问题亟待解决。为探求能量及调频市场下申报不同的功率及电价所带来的影响, 提出调频参与度概念, 并搭建以最大化含储联盟体的收益及最小化配电系统运营商(DSO)成本为目标的双层优化模型, 以跟踪中心轨迹内点法及遗传算法对联盟体间的博弈均衡问题进行求解, 确定市场的纳什均衡点, 得到 2 个市场下含储联盟体所采取的最优运行策略。最后, 在 IEEE 33 节点系统算例中对所提模型及方法的可行性进行验证, 分析不同调频参与度影响下的出清结果及自身收益情况, 得出对调频参与度进行合理选择相比只参与能量市场时可获得更高收益的结论。

关键词: 储能; 能量市场; 调频市场; 调频参与度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.002 中图分类号: TM727 文章编号: 1673-9140(2023)03-0014-10

The analysis of the bidding behavior of alliance containing energy storage in the energy and regulation markets

LI Peiyue, WANG Zhijie, JIN Jiahui

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the development of energy storage in the frequency regulation market, it is urgent to solve the impact of the decision-making behavior of alliance containing energy storage on the clearance result and the problem of the maximization of its own profit. First, the concept of degree of participation is proposed to explore the influence of the difference of declared power and price in the energy and frequency regulation markets, and then a bi-level optimization model is constructed to maximize the profits of the alliances and to minimize the cost of distribution system operator (DSO). The game equilibrium problem is solved by the path-following interior point algorithm and genetic algorithm, and the Nash equilibrium of the markets is achieved for obtaining the optimal bidding strategies of alliances in two markets. Finally, the proposed model and algorithm are validated on IEEE 33-bus system. The market clearing result and its own profit under the influence of different degree of participation are analyzed, and the results show that reasonable selection of degree of participation can obtain higher profits.

Key words: energy storage; energy market; regulation market; degree of participation

近年来,随着电力技术的快速发展,中国风机、光伏装机容量迅速增加,对电力系统频率的稳定性造成了极大冲击。同时,大量分布式能源也存在不

能实时平衡供需的问题,上述问题都需要配置储能系统来解决^[1-2]。而传统储能的投资成本较大,基于共享经济的理念,可使储能与其他分布式能源在博

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 上海市自然科学基金(15ZR1417300)

通信作者: 王致杰(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事风力发电控制、并网与集成技术方面的研究; E-mail: wzjdstu@163.com

弈层面形成联盟关系^[3]。发掘含储联盟体参与电力市场的市场规律,使其展开策略性报价以提高自身收益显得尤为重要。

在电力市场研究领域中,对于储能及联盟体的竞价运行策略问题学术界开展了大量研究。基于能量市场中风光出力具有不确定性的问题,文献[4]提出了一种风电、光伏及储能运行商独立运行的联盟机制,验证了该机制对减少清洁能源出力偏差及提升自身收益的有效性;当集中太阳能发电厂的电力到现货市场时,文献[5]对5种不同的热量存储配置在成本和性能方面进行了评估,得出斜温层储热罐是最有利可图的储热装置;文献[6]设计了不同市场参与者与储能形成联盟关系的合作模型,旨在促进可再生能源及储能系统的推广并提高其运营收益。

上述研究主要集中于在能量市场内,含储能系统在竞价方面的策略研究。据国外电力市场已有的运营经验可知,售电商参与辅助市场时所获收益有时要高于其他市场^[7]。相比于只参与能量市场的含储联盟体的竞价策略,允许含储联盟体同时参与能量和调频市场,更有利于缓解调频压力,提升自身收益,顺应电网日后的发展态势^[8]。文献[9]提出了一个基于概率场景的智能能源枢纽短期高效管理决策框架,该框架通过一种随机混合整数线性规划方法,对风储联盟系统在能量和调频市场中的竞标行为进行优化而获得最高收益;文献[10]提出了一种需求响应负荷联盟与储能系统之间点对点的交易模式,结果表明,与传统的交易模式相比可减少偏差惩罚,提高全社会的综合效益;文献[11]在当前碳中和的背景下,构建了考虑碳中和的综合能源系统与储能系统的合作博弈模型,并分析了两者间合作联盟的驱动力,设计了收益分配策略,实现了双方的互利共赢。由于充电汽车所具有的能量和功率相对较低,直接参与电力市场中的能源买卖不太现实,文献[12]考虑到选择电动汽车停车场聚合体向电动汽车市场提供购售电价,并提出了电动汽车停车场聚合体报价模型,以日前市场及二级备用市场的总成本最小为目标。

以上文献侧重于研究同时参与能量和调频市场时如何兼顾配电网运营商和售电商的利益的问题。

售电商收益与市场出清结果紧密相关,售电商不同的报价策略会对市场出清结果造成影响;同样,市场出清结果亦会影响售电商可能的交易行为,二者是相辅相成的关系^[13]。为了最大化市场主体收益,需要研究决策主体竞价行为带来的市场影响,掌握市场运行规律,这对市场参与者在做出市场决策方面更具现实指导意义。文献[14]将电网侧储能联盟作为主要研究对象,发掘使其收益最大化的竞价策略,并探寻了储能在系统中装机占比大小对市场规律的影响,但未研究其竞价行为带来的市场影响。现货市场的建设在中国仍是初期阶段,查找文献发现,当含储联盟体同时参与能量及调频市场时,关于其决策行为对出清结果及自身收益影响的研究则较少;同时,含储联盟体在2个市场中分配功率的不同也会对其收益产生影响。因此有必要在能量及调频市场下,对含储联盟体的竞价行为所带来的市场影响及最大化自身收益进行综合的研究和分析。

基于以上考虑,本文针对配电侧能量及调频市场,提出调频参与度的概念,以便更好地研究含储联盟体在2个市场中因竞标行为的不同而对市场及其收益造成的影响;同时,提出一种2层的优化模型以解决最优化报价运行策略和配电系统运营商(dental service organizations, DSO)市场运行成本最小的问题。其中,采取内点法对底层市场出清及最优化经济能量管理问题进行优化求解;采用遗传算法求解上层模型中含储联盟体在同时参与2个市场时的最优竞价策略问题;基于含储联盟体间动态博弈的方法,求解导致市场纳什均衡。通过IEEE 33系统的仿真结果,对调频参与度的影响及产生原因做出进一步分析。

1 电力市场交易框架

在日前市场中,大部分现货市场的电量在这里完成竞价,从而使得日前市场占据了较为重要的地位。本文主要研究的是日前市场下集中式的电力市场交易框架,如图1所示。

集中式电力市场所采用的是联合优化方式,该方式是将能量及调频市场进行联合出清。在电力

市场的交易框架下,能量市场的作用是弥补合约交易电量的不足及短时负荷需求的差异,而辅助服务交易市场的作用是维持稳定的电能质量。在日前市场交易日的前一天,市场参与者以实现自身收益最大化为目标开展策略性竞价,按预测负荷将包含功率及电价的报价方案上报给DSO。DSO完成能量及调频市场的联合出清,同时告知市场参与者出清结果^[15]。除向含储联盟体购电外,DSO的购电来源还包括以出清电价向批发市场购电。

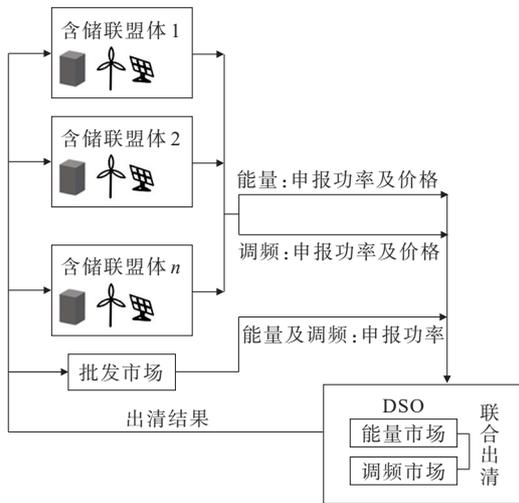


图1 电力市场交易框架

Figure 1 Transaction framework of electricity market

2 市场主体数学模型

2.1 调频参与度

能量市场解决的只是电量方面的竞争,而电能的质量还表现在电压、频率、事故恢复能力和可靠性等方面^[16]。为了维持电力系统的电能质量,跟踪负荷能力强或具有调频装置的机组及储能系统应提供调频、事故备用和电压支持的服务,以满足电能的调频需求,与此同时,在调频市场中发电机组对调频需求进行竞争,发电机组提供上述服务时也需要付出相应代价,例如在现货市场上放弃部分竞价机会^[17]。

在市场参与者发电量有限的现实条件下,同时参与能量市场和调频市场可能会比传统只参与能量市场时获得更高的收益,而且收益也会因在能量市场和调频市场中分配功率的不同而发生改变。

含储联盟体在参与调频市场后,会削减能量市场下的可用容量,从而减少相应的能量收益,但却有可能增加调频收益,因此,同时考虑2个市场对研究含储联盟体的竞价策略很有必要。为了对含储联盟体市场行为进行具体而深入的研究,本文定义调频参与度的概念,以表征含储联盟体对调频市场的参与程度,即

$$D_{\tau,t} = \frac{P_{\tau,t}^{\text{cap,max}}}{\sum_k P_{\tau,t,k}^{\text{offer}} + P_{\tau,t}^{\text{cap,max}}}, \forall \tau \in \Omega, t \in \Gamma \quad (1)$$

式中, $P_{\tau,t,k}^{\text{offer}}$ 为能量市场下 t 时段 τ 机组第 k 段下的申报出力,其中 k 表示 t 时段内市场的出清次数; $P_{\tau,t}^{\text{cap,max}}$ 为 t 时段 τ 机组的调频申报功率。

本文中的能量市场出清时长为15 min,调频辅助服务出清时长为60 min,因此,能量市场中对 t 进行划分,辅助服务市场中不对 t 进行划分^[18]; τ 可代表第 i 个分布式发电(distributed generation, DG)机组或储能(energy storage, ES)机组。

2.2 配电网运营商

DSO的目标在于最小化能量及调频市场下系统的联合购电运行成本。其中,能量市场下的购电成本包含储能电能量购电成本、分布式发电及批发市场电能量购电成本;调频市场下的购电成本包含储能参与调频的服务总成本及分布式发电机组及批发市场调频服务总成本。

1) 向储能单元购电的能量成本 F_1 。

$$F_1 = \sum_i \sum_t (\lambda_{ES,i,t}^{\text{Disoffer}} P_{ES,i,t}^{\text{Dis}} - \lambda_{ES,i,t}^{\text{Chaoffer}} P_{ES,i,t}^{\text{Cha}}), \quad \forall i \in \varphi, t \in \Gamma \quad (2)$$

式中, $\lambda_{ES,i,t}^{\text{Chaoffer}}$ 和 $\lambda_{ES,i,t}^{\text{Disoffer}}$ 、 $P_{ES,i,t}^{\text{Dis}}$ 和 $P_{ES,i,t}^{\text{Cha}}$ 分别为充/放电电价、充/放电功率。

储能参与能量市场的约束条件为扣除调频申报功率后的最大、最小充/放电功率以及始、末、临近段的荷电状态(state of charge, SOC)约束,分别为

$$0 \leq P_{ES,i,t}^{\text{Dis}} \leq P_{ES,i,t}^{\text{Dismax}} - P_{ES,i,t}^{\text{Cap,max}} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{ES,i,t}^{\text{Cha}} \leq P_{ES,i,t}^{\text{Chamax}} - P_{ES,i,t}^{\text{Cap,max}} \quad (4)$$

$$E_{ES,i,0} = E_{ES,i}^{\text{ini}} \quad (5)$$

$$E_{ES,i,T} = E_{ES,i}^{\text{fin}} \quad (6)$$

$$E_{ES,i,t} = E_{ES,i,t-1} + P_{ES,i,t}^{\text{Cha}} \eta_{ES,i}^{\text{Cha}} - P_{ES,i,t}^{\text{Dis}} / \eta_{ES,i}^{\text{Dis}} \quad (7)$$

式(3)~(7)中, $P_{ES,i,t}^{\text{Chamax}}$ 、 $P_{ES,i,t}^{\text{Dismax}}$ 分别为第 i 个ES机组最大充、放电功率; $P_{ES,i,t}^{\text{Cap,max}}$ 为第 i 个ES机组调频申报容

量; $\eta_{ES,t}^{\text{Cha}}$ 、 $\eta_{ES,t}^{\text{Dis}}$ 分别为充、放电效率; $E_{ES,t}^{\text{mi}}$ 、 $E_{ES,t}^{\text{fn}}$ 分别为第 i 个 ES 机组在始、末段期望达到的 SOC; $E_{ES,0}$ 、 $E_{ES,T}$ 分别为第 i 个 ES 机组开始计时、计时结束时段达到的 SOC; $E_{ES,x}$ 为第 i 个 ES 机组在第 x 个优化周期所达到的 SOC。

将电力平衡约束的对偶乘子作为系统的节点电价:

$$\sum_{i \in b} P_{DG,t} + \sum_{i \in b} P_{DG,t}^{\text{Dis}} + P_{\text{sub},t} = \sum_{i \in b} P_{ES,t}^{\text{Cha}} + P_{b,t}^{\text{D}} : \lambda_{b,t}, \forall i \in \Omega \quad (8)$$

式中, $P_{b,t}^{\text{D}}$ 为时段 t 节点 b 的负荷; $\lambda_{b,t}$ 为该约束下的影子价格, 作为节点 b 的电价; $P_{\text{sub},t}$ 为从批发市场中购得的功率。

2) 向 DG 机组及批发市场购电的能量成本 F_2 。

$$F_2 = \sum_t \sum_i C_{DG,t}(P_{DG,t}) + \sum_t C_{\text{sub},t}(P_{\text{sub},t}) \quad (9)$$

$$C_{DG,t}(P_{DG,t}) = \sum_k \lambda_{DG,k,t}^{\text{offer}} P_{DG,k,t}, \forall k \in K \quad (10)$$

$$C_{\text{sub},t}(P_{\text{sub},t}) = \lambda_{b,t} P_{\text{sub},t} \quad (11)$$

式(9)~(11)中, $C_{DG,t}(P_{DG,t})$ 为 t 时段第 i 个 DG 机组的运行成本; $\lambda_{DG,k,t}^{\text{offer}}$ 、 $P_{DG,k,t}$ 分别为时段 t 第 k 段第 i 个 DG 机组的申报价格、功率; $C_{\text{sub},t}(P_{\text{sub},t})$ 为 DSO 向批发市场购电的成本; $P_{\text{sub},t}$ 为 t 时段批发市场中购得功率。

DG 机组的中标出力约束、中标总功率、爬坡约束、最短开/停机时间约束分别为

$$P_{DG,k,t} \leq P_{DG,k,t}^{\text{offer}} - P_{DG,k,t}^{\text{Capoffer}} \quad (12)$$

$$P_{DG,t} = \sum_k P_{DG,k,t} \quad (13)$$

$$P_{DG,t} - P_{DG,t-1} = P_i^{\text{RP}} \quad (14)$$

$$T_{DG,t}^{\text{U}} - (u_{DG,t-1} - u_{DG,t}) T_{DG,t}^{\text{U}} \geq 0 \quad (15)$$

$$T_{DG,t}^{\text{D}} - (u_{DG,t} - u_{DG,t-1}) T_{DG,t}^{\text{D}} \geq 0 \quad (16)$$

$$T_{DG,t}^{\text{U}} = \sum_{\tau=t-T_{DG,t}^{\text{U}}+1}^{t-1} u_{DG,\tau} \quad (17)$$

$$T_{DG,t}^{\text{D}} = \sum_{\tau=t-T_{DG,t}^{\text{D}}+1}^{t-1} (1 - u_{DG,\tau}) \quad (18)$$

式(12)~(18)中, $P_{DG,t}$ 为 t 时段第 i 个 DG 机组中标功率; $P_{DG,k,t}^{\text{offer}}$ 为 t 时段第 i 个 DG 机组第 k 段下的申报出力; P_i^{RP} 为第 i 个 DG 机组相邻时段爬坡能力; $T_{DG,t}^{\text{U}}$ 、 $T_{DG,t}^{\text{D}}$ 分别为 t 时段第 i 个 DG 机组的启动、停止时长; $T_{DG,t}^{\text{U}}$ 、 $T_{DG,t}^{\text{D}}$ 分别为第 i 个 DG 机组的最小开、

停机时间; $u_{DG,t}$ 为 1, 表示第 i 个 DG 机组的启动, 为 0 则相反。

3) 向储能单元购电的调频服务总成本 F_3 。

当全网的调频市场出清电价一致时, 优质调频资源无法获得额外的价值补偿。为使优质的调频资源受到市场激励, 本文的研究环境参考了 PJM 市场机制。市场运营机构会依据其调频效果, 按照调频性能指标 f_{ES} 及历史调频时段的里程与容量的比例 S_{ES}^{mc} 对调频参与者的报价进行调整^[19]。

$$F_3 = \sum_t \sum_i (\lambda_{ES,t}^{\text{a, cap}} + \lambda_{ES,t}^{\text{a, mil}}) P_{ES,t}^{\text{cap}} \quad (19)$$

$$\lambda_{ES,t}^{\text{a, cap}} = \lambda_{ES,t}^{\text{cap}} / f_{ES} \quad (20)$$

$$\lambda_{ES,t}^{\text{a, mil}} = \lambda_{ES,t}^{\text{mil}} S_{ES}^{\text{mc}} / f_{ES} \quad (21)$$

式(19)~(21)中, $\lambda_{ES,t}^{\text{a, cap}}$ 、 $\lambda_{ES,t}^{\text{a, mil}}$ 分别为第 i 个 ES 机组调整后的容量、里程报价; $P_{ES,t}^{\text{cap}}$ 为 t 时段第 i 个 ES 机组中标调频容量; $\lambda_{ES,t}^{\text{cap}}$ 、 $\lambda_{ES,t}^{\text{mil}}$ 分别为调频市场参与方需申报的容量、里程报价; f_{ES} 为参与调频的 ES 机组对自动发电控制信号跟踪的紧密程度。

参与调频市场时需满足的约束如下:

$$0 \leq P_{ES,t}^{\text{cap}} \leq P_{ES,t}^{\text{cap, max}} \quad (22)$$

$$\sum_t P_{ES,t}^{\text{cap}} \geq P_{ES}^{\text{Regcap}} \quad (22)$$

$$\sum_t P_{ES,t}^{\text{cap}} S_{ES}^{\text{mc}} \geq P_{ES}^{\text{Regmil}}$$

式中, $P_{ES,t}^{\text{cap}}$ 为 t 时段第 i 个 ES 机组中标调频容量; P_{ES}^{Regcap} 、 P_{ES}^{Regmil} 分别为 t 时段系统调频市场的容量、里程功率需求。

4) 向 DG 机组及批发市场购电的调频总成本 F_4 。

$$F_4 = \sum_t \sum_i (\lambda_{DG,t}^{\text{a, cap}} + \lambda_{DG,t}^{\text{a, mil}}) P_{DG,t}^{\text{cap}} + \sum_t \lambda_t^{\text{Regagg}} P_{\text{sub},t}^{\text{cap}} \quad (23)$$

式中, $\lambda_{DG,t}^{\text{a, cap}}$ 、 $\lambda_{DG,t}^{\text{a, mil}}$ 分别为第 i 个 DG 机组调整后的容量、里程报价, 求解方法与式(20)、(21) $\lambda_{ES,t}^{\text{a, cap}}$ 、 $\lambda_{ES,t}^{\text{a, mil}}$ 的求解方法类似, 不再赘述。

在调频市场中经报价排序后, 市场综合出清价 $\lambda_t^{\text{Regagg}}$ 采用边际调频机组的调频综合报价, 其中, $\lambda_t^{\text{Regagg}}$ 由里程出清价 $\lambda_t^{\text{Regmil}}$ 和容量出清价 $\lambda_t^{\text{Regcap}}$ 两部分构成。 $P_{\text{sub},t}^{\text{cap}}$ 表示 t 时段批发市场中购得调频容量。 DG 机组及批发市场在调频市场中标的功率需满足约束:

$$0 \leq P_{DG,t}^{\text{cap}} \leq P_{DG,t}^{\text{Capoffer}} \quad (24)$$

$$P_{\text{sub},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{sub},t} + P_{\text{sub},t}^{\text{cap}} \leq P_{\text{sub},t}^{\text{max}} \quad (24)$$

DSO以系统的总购电成本最小化为原则,即

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (25)$$

2.3 含储联盟体

日前电能交易市场以1h为最小的电能调度时间间隔^[20],含储联盟体以为自身收益最大化为原则,其收益包含现货市场下的收益以及调频市场下的收益。其中现货市场下的收益包含分布式发电机组现货收益及储能单元现货收益;调频市场下的收益包含分布式机组调频收益及储能单元调频收益。

1) DG机组电能量收益 I_1 。由DG机组能量市场的售电收益减去发电成本构成,第 i 个DG机组的发电成本采用二次函数表示,即

$$I_1 = \sum_t \sum_i [P_{DG,t} \lambda_{b,t} - (\alpha_i P_{DG,t}^2 + \beta_i P_{DG,t} + \gamma_i)] \quad (26)$$

式中, α_i, β_i 和 γ_i 为发电成本系数。

2) 储能单元电能量收益 I_2 。由储能单元现货电力市场的售电收益扣除储能充、放电成本而构成:

$$I_2 = \sum_t \sum_i [(P_{ES,t}^{\text{Dis}} - P_{ES,t}^{\text{Cha}}) \lambda_{b,t} - K_{ES} P_{ES,t}^{\text{Dis}} - K_{ES} P_{ES,t}^{\text{Cha}}] \quad (27)$$

式中, K_{ES} 为储能的度电成本。

3) DG机组调频收益 I_3 。由DG机组调频市场售电的容量及里程收益减去发电成本而构成:

$$I_3 = \sum_t \sum_i [\lambda_t^{\text{Regmil}} P_{DG,t}^{\text{cap}} S_{ES}^{\text{mc}} f_{ES} + \lambda_t^{\text{Regcap}} \cdot P_{DG,t}^{\text{cap}} f_{ES} - (\alpha_i P_{DG,t}^2 + \beta_i P_{DG,t} + \gamma_i)] \quad (28)$$

取中标机组里程报价的最大值为里程电价 $\lambda_t^{\text{Regmil}}$,容量电价 $\lambda_t^{\text{Regcap}}$ 由综合出清电价 $\lambda_t^{\text{Regagg}}$ 减去里程电价得到。

$$\lambda_t^{\text{Regmil}} = \max_i u_{i,t} \lambda_{i,t}^{\text{mil}} \quad (29)$$

$$\lambda_t^{\text{Regcap}} = \lambda_t^{\text{Regagg}} - \lambda_t^{\text{Regmil}} \quad (30)$$

4) 储能调频收益 I_4 。由ES机组在调频市场中的容量及里程收益扣除其发电成本而构成:

$$I_4 = \sum_t \sum_i [\lambda_t^{\text{Regmil}} P_{ES,t}^{\text{cap}} S_{ES}^{\text{mc}} f_{ES} + \lambda_t^{\text{Regcap}} P_{ES,t}^{\text{cap}} f_{ES} - K_{ES} P_{ES,t}^{\text{cap}}] \quad (31)$$

对于含储联盟体来说,其目标函数可表达为最大化上述收益之和:

$$\max \eta = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (32)$$

3 完全信息博弈下的双层优化方法

针对能量及调频市场下的市场交易框架(图1),市场参与者之间竞价竞争其中标量,报价不当的一方将降低自身收益值;同时,在综合各项约束的情况下,DSO对各个含储联盟体的报价进行综合考虑,最终得出最小化经济成本的市场出清结果。上述内容可简化为一个双层优化模型:DSO实现经济成本最小为底层目标,该目标是带约束的非线性规划问题;上层模型是为了最大化含储联盟体利益,实质上是博弈问题,当存在多个博弈主体且其报价策略不发生改变,市场达到纳什均衡。

3.1 底层出清优化机制

底层的市场出清模型为凸优化问题,底层模型优化的实质在于分配能量及调频市场下各含储联盟体不同机组的中标功率,在满足多种约束的同时,达到最低的系统经济成本。

使用内点法对底层出清问题进行求解,内点法的紧凑形式为

$$\begin{cases} \min f(x) - \mu \sum_{k=1}^r \ln l_k - \mu \sum_{k=1}^r \ln u_k \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h(x) + u = \bar{h} \\ h(x) - l = \bar{h} \\ \mu, u, l > 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中, $f(x)$ 为式(25)中的目标函数; μ 为障碍函数的扰动因子; r 为不等式约束的数量; u, l 为不等式约束对应的松弛变量向量; $g(x), h(x)$ 分别为等式、不等式约束向量。

本文通过引入障碍函数来保证最优解可以满足不等式约束,同时引入拉格朗日乘子向量 y, z, w ,求得原问题的拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L = & f(x) - y^T g(x) - z^T [h(x) - l - \bar{h}] - \\ & \mu \sum_{k=1}^r \ln l_k - w^T [h(x) + u - \bar{h}] - \\ & \mu \sum_{k=1}^r \ln u_k, \mu, u, l, z > 0, \\ & w < 0, y \neq 0 \end{aligned} \quad (34)$$

基于对应的 KKT 及拉格朗日函数极小值存在条件^[21],得出底层优化的非线性方程组,采用牛顿拉夫逊法求解非线性方程组,由此得到 DSO 的最优调度结果。在完成底层市场出清模型的求解后,DSO 告知含储联盟体出清结果,含储联盟体依据出清结果更新报价策略,直到市场收敛至纳什均衡点。

3.2 上层含储联盟体间博弈策略

上层含储联盟体间博弈问题的优化值是含储联盟体的上报电价及各市场的申报功率,实质是得到使含储联盟体的利润最高的报价策略。这里假设市场参与者可以通过之前的成交数据获取竞争对手的报价范围。含储联盟体的竞价行为将使自身的中标功率及出清价格受到影响,进而也会影响自身收益。

含储联盟体的策略空间由 DG 机组申报电价 $\lambda_{DG,k,t}^{offer}$, ES 机组申报的充/放电电价 $\lambda_{ES,k,t}^{Chaoffer}/\lambda_{ES,k,t}^{Disoffer}$, DG 机组最大发电申报量 $P_{DG,k,t}^{offer}$, ES 机组最大充/放电功率 $P_{ES,k,t}^{Chamax}/P_{ES,k,t}^{Dismax}$, DG、ES 机组的容量和里程申报电价 $\lambda_{DG,t}^{cap}, \lambda_{DG,t}^{mil}$ 和 $\lambda_{ES,t}^{cap}, \lambda_{ES,t}^{mil}$, 批发市场购电范围 $P_{sub,t}^{max}, P_{sub,t}^{min}$ 及调频参与度 $D_{r,t}$ 构成;其中,使用遗传算法求解策略空间并自动更新模型。这里种群中个体表示的物理意义为含储联盟体的竞价行为,自然选择后可得出市场参与者的最优报价策略。

3.3 模型求解过程

对于含储联盟体,首先随机得到 n 种报价策略, $S_m = \{\pi_{m1}(t), \pi_{m2}(t), \dots, \pi_{mn}(t)\}$ 表示 t 时刻含储联盟体的策略集合。然后不改变其余博弈参与者的竞价策略,使底层模型获得该策略下含储联盟体 m 在现货及调频市场中的中标功率及市场出清价格,据此得出其收益 η , 确定个体适应度。最后对报价策略的种群进行选择、交叉及变异操作,获得含储联盟体的最优报价策略。

双层优化模型的求解流程如图 2 所示。对于本文所提的含储联盟体参与下的双层优化模型流程求解步骤如下:

- 1) 初始化数据,包括读取含储联盟体和电网线路数据,读取日前市场的电量总供需数据;
- 2) 构建所有含储联盟体的策略空间;
- 3) 假定其余参与者的策略固定,依据最优报价求解过程(如图 3 所示)得到含储联盟体 m 的最优

策略;

4) 判断是否所有参与者得到最优策略,得到则进行步骤 5),反之,重复步骤 3);

5) 判断含储联盟体连续 2 次的策略是否相同,相同则求解结束,反之,重复步骤 3)。

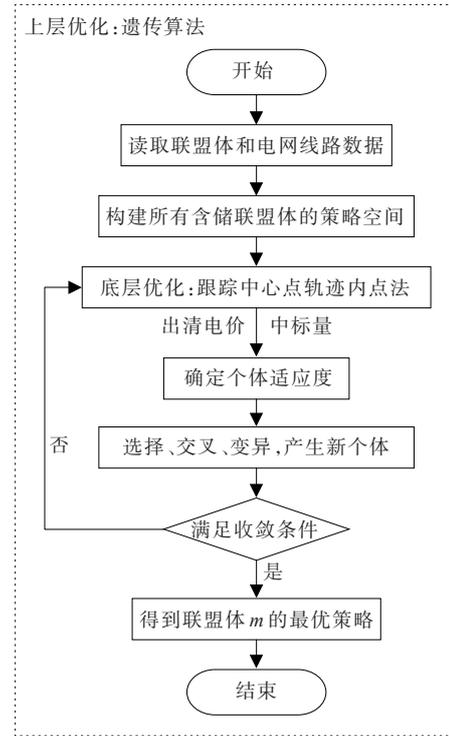


图 2 双层优化模型流程

Figure 2 Bi-level optimization structure diagram

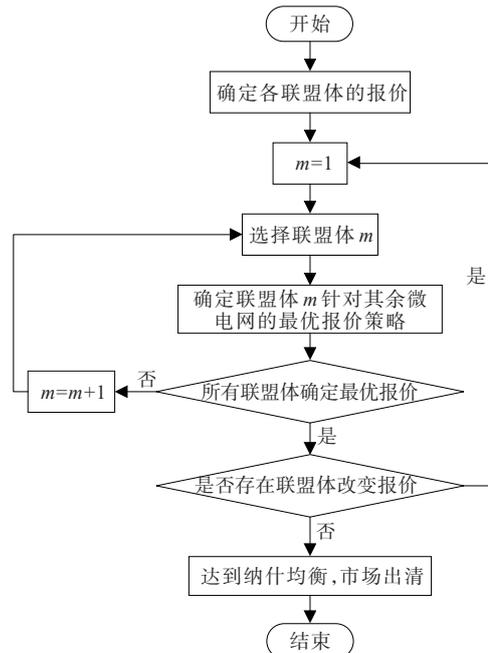


图 3 最优报价求解过程

Figure 3 Optimized quotation solution process

4 算例分析

为了验证本文基于调频参与度的含储联盟体双层竞价优化模型的有效性,以IEEE 33节点为例,在不考虑输电故障的前提下,计算联盟体分别位于12、24和30节点的电能交易,IEEE 33节点系统具体参数参见文献[22]。

联盟体储能容量设置为0.3 MW/0.6 MW·h,最高、最低、始、末时刻的SOC分别为储能容量的90%、10%、10%、10%,充/放电效率取92%。这里假设储能最终的充、放电结果与出清结果一致。机组提供调频服务的性能参数如表1所示。调频容量需求为总负荷的1%,里程需求为容量需求乘以系统历史调频里程—容量比(取10)得到,储能的度电成本为0.96元/(kW·h)。DG机组参数如表2所示;本文以美国西部某地区的负荷需求为例,如图4所示。

表1 调频性能参数

Table 1 Parameters of units

| 机组类型 | 里程—容量比例 | 调频性能指标 |
|------|---------|--------|
| DG | 7.0 | 0.5 |
| ES | 20.0 | 1.0 |

表2 DG机组参数

Table 2 Regulation declaration parameters

| 机组 | $a/$ (10^{-6} \$/kW ²) | $\beta/$ (10^{-3} \$/kW) | $\gamma/$ (10^{-3} \$) | 最大出 力/MW |
|----|--|--------------------------------|------------------------------|-------------|
| 1 | 1 124.1 | 287.30 | 4 073.62 | 0.9 |
| 2 | 130.7 | 232.22 | 16 007.26 | 1.0 |
| 3 | 16.9 | 276.02 | 11 461.96 | 1.0 |

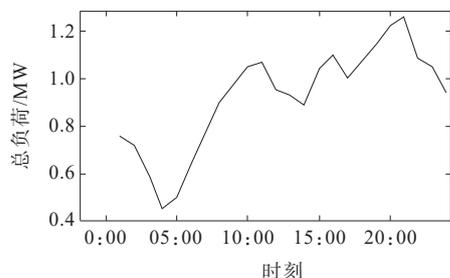


图4 系统整体的负荷需求

Figure 4 Overall load requirements of the system

4.1 关于调频参与度的影响

考虑到系统在调频市场的容量需求小于能量市场下的容量需求及调频市场中中标容量约束的限制,基于市场出清及含储联盟体博弈模型,对所

有市场主体的调频参与度进行统一设置,分别取调频参与度 D 为0.1、0.2、0.3,将其作为调频参与度低、中、高的情况来挖掘市场规律,并且依次对含储联盟体出清电价、中标功率及市场参与者的利润的影响进行研究分析。

4.1.1 对出清电价的影响

随着调频参与度 D 的变化,能量市场和调频市场下的出清电价的变化趋势如图5所示。在调频市场中,随着调频参与度 D 的增加,调频综合价格先降低后升高,而电能量价格不断升高。其原因在于,当调频参与度 D 增加时,储能单元由于其调频综合报价较低,可使其中标量有较大增加。同时由于调频参与度的增加,系统调频性能改善,容量成本下降,进而使调频的综合出清价格下降。但当调频参与度 D 增加过多时,储能单元的过度参与又会增加系统的调频里程成本,从而抬升系统调频综合出清价格。

在储能“削峰填谷”的作用下,能量市场中的购电成本被有效降低,但当调频参与度 D 增加时,储能单元在能量市场中的中标功率为此减少,电能量出清价格随之升高。

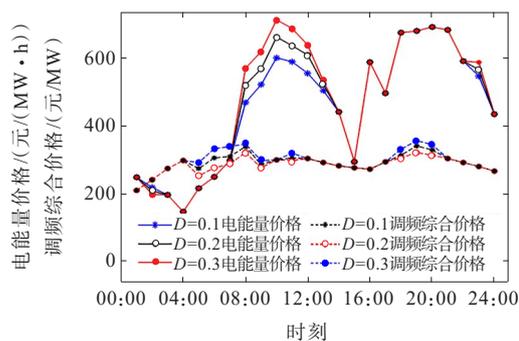


图5 不同的调频参与度下市场的出清电价

Figure 5 Clearing price of different degree of participation

4.1.2 对中标功率的影响

随着调频参与度的升高,DSO向各个含储联盟体和批发市场购买的功率也发生变化,如图6所示。在调频市场中,随着调频参与度升高,DSO向批发市场购买的功率逐渐减少。当 D 由0.1增加到0.2时,向批发市场购电的功率减少0.1015 MW;当 D 由0.2增加到0.3时,批发市场购电的功率减少0.0592 MW。这是由于联盟体的调频参与度增大,使其在调频市场中的最大中标容量约束增大,可提供调频辅助服务的容量增多,在调频市场中中标的可能性变大,从而减少了向批发市场购电的购电需求。

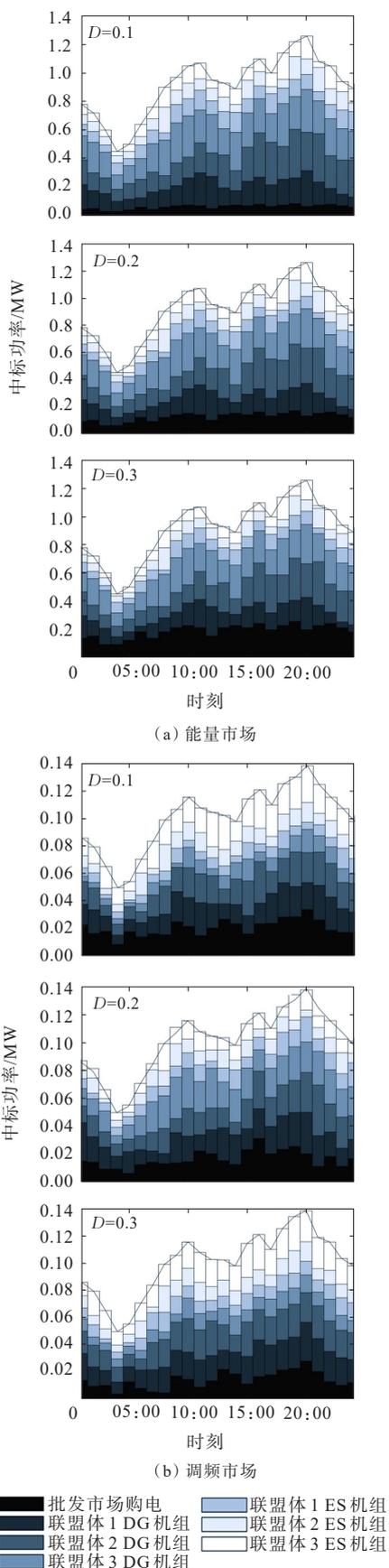


图 6 不同调频参与度下功率的中标情况
 Figure 6 The successful bid power of different degree of participation

与此同时,各个联盟体增加的中标也主要集中在联盟体的储能单元上,以 D 由 0.2 增加到 0.3 为例,储能单元总体增加的功率占联盟体总增加功率的 43%。考虑到储能单元容量设置较分布式发电单元小数倍,储能单元增加的中标功率与 DG 机组相比已较为显著,其原因在于储能调频综合报价较低,有效降低了系统调频的容量成本,因而与 DG 机组相比更容易在调频市场中中标。

在能量市场中,随着调频参与度 D 的增加,DSO 向批发市场购电的功率逐渐增多,各个联盟体在该市场下中标的功率也逐渐减少,原因在于联盟体为实现自身利益最大化更倾向于在调频市场中获利。

4.1.3 对联盟体利润及 DSO 成本的影响

在调频参与度 D 的变化下,各个联盟体的利润及 DSO 的购电成本情况如表 3 所示,可以看出,同一调频参与度 D 下联盟体 3 的净利润总和最高,联盟体 1 的净利润总和最低。联盟体的收益受其接入位置的影响,接入位置的不同使机组对系统潮流优化的程度不等,因而导致其中标功率不同;其次,由于联盟体 3 的成本最低,使其报价相对较低,在联盟体之间的竞价过程中更具优势,收益也相对较高。

表 3 各联盟体的利润及 DSO 的成本
 Table 3 Microgrid profits and DSO cost \$

| D | 各联盟体的净利润 | | | DSO |
|-----|----------|---------|---------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 购电成本 |
| 0.0 | 196.726 | 225.923 | 247.297 | 5 538.185 |
| 0.1 | 224.456 | 256.672 | 271.376 | 5 289.432 |
| 0.2 | 230.552 | 260.824 | 287.280 | 5 213.520 |
| 0.3 | 219.568 | 244.728 | 265.232 | 5 295.048 |

当调频参与度 D 为 0 时,各个联盟体的净收益总和达到最小,同时 DSO 的购电成本也最高,说明联盟体在调频市场中的收益高于在能量市场中的收益,同时参与能量与调频市场时获得的收益高于只参与能量市场时获得的收益。

当调频参与度 D 增加时,联盟体的净利润总和先增大后减小,DSO 的购电成本先减小后增大。因此,需合理选择联盟体竞价策略中的调频参与度 D ,才可达到系统购电成本最小化及联盟体收益最大化的目标。

4.2 联盟体收益分析

对各联盟体的竞价策略中是否含有调频参与度的收益情况进行对比,如图 7 所示,图中表现了各

联盟体的收益稳定在纳什均衡点的过程。当市场参与者采用含有调频参与度的竞价策略时,其收益在迭代63次后达到稳定,在63次之前含储联盟体以随机策略进行博弈;当采用不含调频参与度的竞价策略时,其收益在迭代57次后达到稳定。前、后两者迭代次数相差不大,其原因在于决定迭代次数的关键因素在于求解算法的选取。

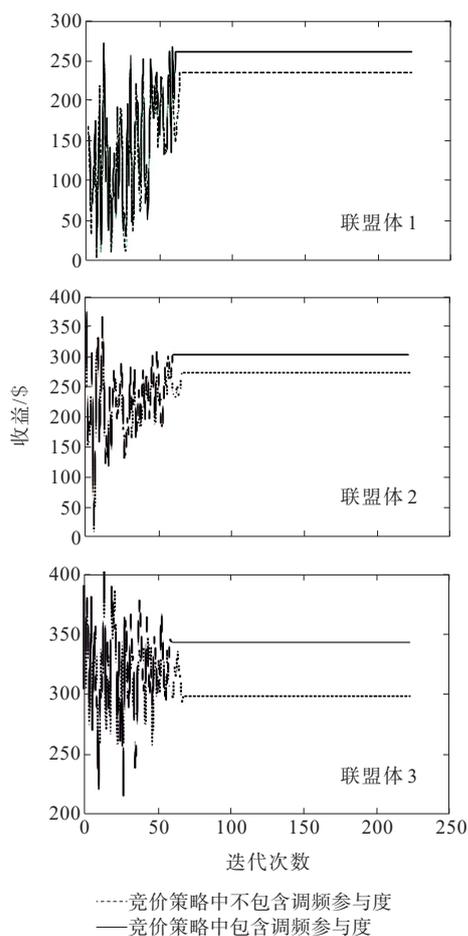


图7 各联盟体的收益

Figure 7 Profits of microgrids

由图7可以看出,市场参与者在采用含调频参与度的竞价策略后,其收益普遍得到提升。原因在于储能因其自身良好的调频特性能够优先在调频市场中中标,相较于不参与调频市场,更容易赢取可观的利润。将竞价策略包含调频参与度后的收益增长情况进行比较,可以发现联盟体1、2的收益分别增加了25.78、24.00 \$,联盟体3收益却增加了38.85 \$,这与储能电站的安装点位置及发电成本有关。因此在配电网规划中,对储能电站进行合理安装布局以鼓励其获取调频市场的收益,这可作为日后的研究方向。

对于将调频参与度包含在决策变量中的竞价策略,从图7中可以看出,联盟体3收益最高,稳定在293.13 \$;联盟体1收益最低,稳定在235.72 \$。这也反映出成本最低的联盟体,可具有相对较低的报价,在联盟体之间的竞价过程中可获得较高收益。

5 结语

本文通过引入调频参与度,建立了基于含储联盟体的双层市场竞价优化模型。以市场出清和经济调度为底层优化目标;以联盟体利益为上层优化目标,进行最优的竞价策略计算。仿真结果表明:储能参与调频市场可使综合报价降低,从而降低系统调频综合出清价格,但储能的过度参与又会相应增加系统里程成本。因此,应对联盟体竞价策略中的调频参与度做出合理选择。

本文对报价方式的研究为日前市场交易的报价策略提供了一定的参考,但由于日前电力市场的交易情况十分复杂,本文对电力市场的交易处理是简单化的,在处理电力市场交易时,忽略了网损对市场盈余的影响以及阻塞机制造成的市场盈余等,还存在许多改进完善的空间。

参考文献:

- [1] 李军徽,侯涛,穆钢,等.基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(19):63-72.
LI Junhui,HOU Tao,MU Gang,et al.Energy storage system based on weighting factor and SOC recovery participates in primary frequency modulation strategy[J].Automation of Electric Power Systems,2020,44(19):63-72.
- [2] 黄宗龙,江修波,刘丽军.低碳化背景下配电网“源—储—荷”多目标优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):36-45.
HUANG Zonglong,JIANG Xiubo,LIU Lijun.Multi-objective optimal allocation of "generation-storage-load" under the low-carbon background[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):36-45.
- [3] 谈金晶,李扬.多能源协同的交易模式研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6483-6497.
TAN Jinjing,LI Yang.Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6483-6497.

- [4] YANG S B, TAN Z F, GOU S Y, et al. Optimization model of WPO-PVO-ESO cooperative participation in day-ahead electricity market transactions considering uncertainty and CVaR theory[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106718.
- [5] IMANE K, ZENG K, GILLES F, et al. Technical and economic assessment of thermal energy storage in concentrated solar power plants within a spot electricity market[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110583.
- [6] AVRI E, ITAY F. The social dimension of renewable energy storage in electricity markets[J]. *The role of partnerships, Energy Research & Social Science*, 2021, 76: 102072.
- [7] SRUJANA G N, ERIC H, BRIAN S, et al. How does new energy storage affect the operation and revenue of existing generation[J]. *Applied Energy*, 2021, 285: 116383.
- [8] AGOSTINI C A, ARMIJO F A, CARLOS S, et al. The role of frequency regulation remuneration schemes in an energy matrix with high penetration of renewable energy[J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 1097-1114.
- [9] XIE Y Y, GUO W Q, WU Q W, et al. Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, 124: 106361.
- [10] LU Z L, WANG J X, YONG W Z, et al. Coordinated P2P electricity trading model with aggregated alliance and reserve purchasing for hedging the risk of deviation penalty[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 426-435.
- [11] YANG S B, TAN Z F, GOU S Y, et al. Optimization model of WPO-PVO-ESO cooperative participation in day-ahead electricity market transactions considering uncertainty and CVaR theory[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106718.
- [12] İBRAHİM S, ALPER C, AYŞE K E, et al. User-comfort oriented optimal bidding strategy of an electric vehicle aggregator in day-ahead and reserve markets[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 122: 106194.
- [13] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 3-15.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Construction progress and key problems of electric power spot market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 3-15.
- [14] 姜欣, 刘萌, 王天梁, 等. 电网侧储能电站参与现货联合市场的竞价策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3398-3408.
JIANG Xin, LIU Meng, WANG Tianliang, et al. Bidding strategy for grid-side energy storage power stations to participate in the spot joint market[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3398-3408.
- [15] PETTER J, MARTIN V, CALI N. Integrating distributed energy resources in electricity distribution systems: an explorative study of challenges facing DSOs in Sweden[J]. *Utilities Policy*, 2020, 67: 101117.
- [16] 王良缘, 江岳文, 王杰. 考虑参与多市场交易的电网侧储能优化配置[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(11): 30-38.
WANG Liangyuan, JIANG Yuewen, WANG Jie, et al. Optimization of grid-side energy storage considering multi-market transaction[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(11): 30-38.
- [17] 王霞, 应黎明, 卢少平. 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2858-2867.
WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2858-2867.
- [18] 段秦刚, 陈永椿, 王一, 等. 电力现货市场下激励型需求响应交易机制及出清模型[J]. *电力建设*, 2021, 42(6): 145-156.
DUAN Qingang, CHEN Yongchun, WANG Yi, et al. Trading mechanism and clearing model of incentive demand response in electricity spot market[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(6): 145-156.
- [19] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(S1): 167-180.
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(S1): 167-180.
- [20] 贾德香, 柳占杰, 高骞, 等. 计及碳-电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 89-97.
JIA Dexiang, LIU Zhanjie, GAO Qian, et al. Bidding strategy of the virtual power plant based on consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 89-97.
- [21] CHENG D Z, XU T T, HE F H, et al. On dynamics and nash equilibriums of networked games[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2014, 1(1): 10-18.
- [22] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(1): 725-734.