

韦仲康,朱天博,邢劲,等.区域电力现期混合交易体系及最优交易策略[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4): 55-61. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.008

WEI Z K, ZHU T B, XING J, et al. Optimal Electricity Trading for Mixed Spot and Futures Market in Regional Power Grid[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(4): 55-61. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.008

区域电力现期混合交易体系及最优交易策略

韦仲康^{1*},朱天博¹,邢劲¹,牛家强²,施星宇³,邹苏邴⁴

(1.冀北电力交易中心有限公司,北京 100053;2.四川中电启明星信息技术有限公司,四川 成都 611730;
3.长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114;4.北京理工大学 自动化学院,北京 100081)

摘要:为实现电力市场的多元参与和灵活交易,设计一种新的现期混合电力市场应用于区域电力市场.现期混合电力市场基于智能性、灵活性、开放性和扩展性等原则,支持多家发电公司与电力用户参与市场,它们既可选择现货交易模式,也可选择期货交易模式,且之间存在竞价.为形成有效的电力交易,搭建了一个分层系统架构,在下层,发电公司/电力用户之间相互竞争,确定最优卖电/买电量,最大化个体的效益;上层发电公司整体与电力用户以最优所在群体的利益为目标进行竞价,确定市场现货价格和期货合同价格.在仿真案例中,验证了所提现期混合电力市场与单独的现货市场相比所存在优势,现期混合电力市场能够有效地解决电价过高的问题,并为建设成市场机制定价、期货工具齐全的多层次市场体系提供技术支持.

关键词:电力现货;电力期货;混合电力市场;最优交易;分层机制

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)04-0055-07

Optimal Electricity Trading for Mixed Spot and Futures Market in Regional Power Grid

WEI Zhongkang¹, ZHU Tianbo¹, XING Jin¹, NIU Jiaqiang², SHI Xingyu³, ZOU Suli⁴

(1. North Hebei Power Exchange Center Co., Ltd., Beijing 100053, China;

2. Aostar Information Technologies Co., Ltd., Chengdu 611730, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha Institute of Technology, Changsha 410114, China;

4. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to give full play to the advantages of electricity spot market and future market, a new hybrid electricity market was designed, which was applied to the regional electricity trading. Based on the principles of intelligence, flexibility, openness and scalability, the hybrid electricity market supported multiple power generation companies and power users. They chose either spot trading mode or futures trading mode and bid with each other. Providing the more flexible mechanism for market participants, a hierarchical system structure was built. In the lower layer, the generation companies/power users competed with each other to determine the optimal power sale/purchase aiming at maximizing individual benefits. In the upper layer, the generation companies and power users were regarded as aggregators and compete to determine the market clearing price and contract price to optimize the interests of their groups. In the simulation case, it was verified that the proposed

收稿日期:2021-03-30

基金项目:国网冀北电力有限公司科学技术项目资助(52010119006L)

*通信作者, E-mail:13910997903@139.com

hybrid market had advantages over the single spot market, which effectively solved the problem of high price. This study could provide technique supports for designing a multi-level market featuring market mechanism pricing and complete futures instruments.

Keywords: spot market; futures market; mixed electricity market; optimal trading; hierarchical system

电力工业的市场化改革打破了长期以来电力系统的发、输、配电一体的垄断格局,是电力工业发展的必然趋势^[1].电能交易作为核心问题,其基本点是引入竞争,电能交易促使了以市场价格为竞争基础的结果^[2-3].我国目前电力工业的市场化交易仍处于初期阶段,现有的交易平台无法支持多交易品种、多交易周期和多交易模式的要求,因此,建立满足区域新需求的新型电力交易技术,实现多元参与和灵活交易是重要的研究课题.

电力市场有多种模式,交易的产品涵盖电能、备用/平衡等辅助服务和输电权等电力商品.在电能市场中,交易方式按照交易的时间长短可以划分为实时电力交易、日前电力交易和中长期电力交易,对应电力现货交易和电力期货交易^[4-6].电力现货市场可以实现调度运行和市场交易的有机衔接,在短时间内反映系统的资源稀缺程度与阻塞情况.电力现货市场能够充分反映不同时段、不同节点的边际发电成本和供需情况,有利于引导资源优化、高效配置,并为市场主体投资、开展电力期货交易等提供价格信号,对电力市场的开放、竞争、运行起到支撑作用,减少系统安全风险和交易金融风险^[7-10].电力现货交易模式被国外多个国家采用,如英国 Pool 电力市场^[11]、美国 PJM 区域运行的电力市场^[2]、北欧区域电力市场^[12].

然而,采用现货进行电力交易存在不足,首先就是电价波动大,使得电力市场的参与者面临巨大的价格风险,且由于现货市场的电价是通过市场竞价的方式来确定,价格波动不可避免^[7].例如,用电高峰和用电低谷的电价可能相差几倍,甚至用电低谷时的电价为零或负值,对不同天/月份来说,电价可能相差更大.再者,电力现货市场的实时电价对天气变化、电网事故、新能源发电冲击、用电负荷变化等因素敏感,市场定价困难,而日前市场制定的发电计划又会与实际用电负荷出现较大偏差,导致功率不平衡.进一步,从优化调度的角度看,电力管理部门只能根据变化剧烈的现货价格进行宏观调控,将会形成电力交易振荡,造成资源紧缺-浪费的恶性循环.

电力期货市场是指以特定的价格进行买卖,在将来某一特定时间开始交割并在特定时间段内交割完毕,以电力期货合约的形式进行交易的电力商品^[13-16].电力期货交易属于中长期电力交易,汇集了电力交易各个环节(如发、输、配、用)的交易者对电力市场现状及走向的看法,有利于发现未来一时间段内比较准确、真实的电力价格水平.一般来说,电力期货的成交价格/合约价格是由大量电能交易者公开竞争得到,利用期货交易的套期保值功能可以规避电力现货的价格风险、实现稳定的供求关系.较为有名的电力期货交易所有纽约商品期货交易所(NYMEX)、伦敦国际石油交易所(IPE)、芝加哥期货交易所(CBOT)和澳大利亚证券交易所(ASX).此外,电力期货市场可支持交易双方对生产、消费计划进行一定的调整,以得到更好的适应性.期货市场产生的价格具有真实性、超前性和权威性,政府可以依据其来确定和调整宏观经济政策,引导企业调整生产经营的规模与方向,使其符合国家宏观经济发展的需要.

同样地,采用电力期货进行交易也存在不足.首先,电力期货交易的时间跨度大,难以准确估计相当长时间内的市场环境变化,价格确定后在一段时间内保持不变,无法得到实时最优的交易价格.期货价格的确定需提前考虑各方面的因素,但是影响价格波动的因素很可能在期货平仓前没有被发现,如天气的突变、设备的故障等,因此,期货价格与现货价格的基差可能会很大,应用期货保值的效率会大大降低^[15-16].另外,电力期货合约的交割困难,每一笔交割都将对电力系统的运行状态产生影响,考虑到整个电网的安全性,所有电力期货合约的交割计划必须提交给系统调度者,由调度者根据安全第一的原则统一制定.此外,由于电力交割点较少,通常离大部分电力用户都很远,所以执行电力期货的交割通常还需承担很高的输电费用.

由上所述,在电力的市场化改革中,单一的现货或期货市场均无法保证价格信号不失真,实现资源的

优化配置.只有将电力现货与期货市场相结合,才能发挥两者的优势.基于电力现货与期货结合的前提,提出了一种新的现期混合电力市场架构,发电公司与电力用户可自由选择现货、期货或混合的方式进行电力交易,现货与期货的电价由交易双方进行竞价所得,每个参与交易的个体基于各自的效益最优选择交易量.文章提出电价计算的机制可以获得最优交易策略,并能够有效地解决电价过高的问题.

1 现期混合电力市场架构

给一个区域现期混合电力市场,支持电力现货和电力期货进行交易.假设有 n 个电力用户和 m 个发电公司参与电力市场,其中, $n \in \mathcal{N}, \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}, m \in \mathcal{M}, \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. 对于电力现货来说,电力用户与发电公司以一个统一的市场价格进行买卖,该统一现货价格记为 p_s ,与当前的电力市场参与者和市场参数有关.与此同时,电力用户与发电公司签订电力买卖合同,按照合同价格买卖电力期货,现期混合电力市场架构如图 1 所示.不同用户签订的期货合同不同,期货电价也不相同.考虑到用户端面向发电侧,对发电侧进行聚合,构造发电代理商,与电力用户签订合同,期货价格记为 $p_{c,n}$. 电力现货的价格随着市场参数的变化实时变化,而电力期货的价格在合同期内保持不变.

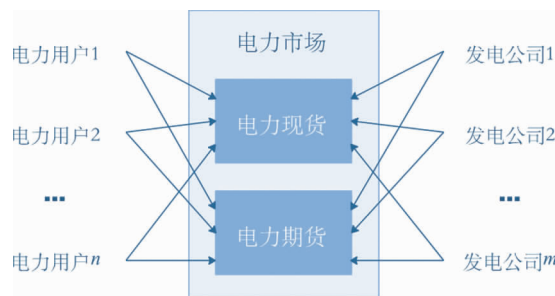


图1 现期混合电力市场架构

假设任一电力用户 n 购买电力现货和电力期货的数量分别为 $d_{s,n}, d_{c,n}$,任一发电公司 m 售卖电力现货和电力期货的数量分别为 $g_{s,m}, g_{c,m}$,则电力市场的功率守恒表示为

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} d_{s,n} = \sum_{m \in \mathcal{M}} g_{s,m} = q_s;$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} d_{c,n} = \sum_{m \in \mathcal{M}} g_{c,m} = q_c.$$

式中: q_s 和 q_c 分别为电力现货和电力期货的总交易量.

1.1 电力用户个体建模

对于任意一个电力用户 n ,从电力市场购买电量满足自身用电,获得一定的满意度或效益.用户的满意度与购买的电量相关,随着所获得电量的增加,满意度增加,但满意度增长的速度减慢,因此,一般设计满意度函数为所获电量的凹函数,这里记 n 的满意度函数为 v_n ,设计为如下形式:

$$v_n(d_{s,n}, d_{c,n}) = \bar{\mu}(d_{s,n} + d_{c,n}) - \mu_n(d_{s,n} + d_{c,n} - d_n)^2. \quad (1)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为电力用户满意度弹性的上界值,为表述简单,所有电力用户满意度弹性一致,可以取各电力用户的最大值; μ_n 为满意度系数,每个电力用户有各自的系数,反映其满意度随用电量变化的不同比率; d_n 为期望的用电需求,当用电量达到 d_n 时,满意度最大.

由式(1)可知:满意度是关于买电量的凹函数,且不同的电力用户有不同的满意度系数,满意度函数 v_n 关于 $d_{s,n}, d_{c,n}$ 不可分.

由此,电力用户 n 的支付函数(净收益)即为它的满意度减去买电成本,表示为

$$\Phi_n(p_s, d_{s,n}, p_{c,n}, d_{c,n}) = v_n(d_{s,n}, d_{c,n}) - p_s d_{s,n} - p_{c,n} d_{c,n}.$$

对电力用户来讲,个体目标即为最大化自身的支付,即净收益.

1.2 发电公司个体建模与发电代理商

对于任意一个发电公司 m ,生产的电能通过电力市场卖出获得收益,电能生产的成本函数为凸函数,且实际中多假设发电机发电成本为二次型,记为 c_m ,形式如下:

$$c_m(g_{s,m}, g_{c,m}) = a_m (g_{s,m} + g_{c,m})^2 + b_m (g_{s,m} + g_{c,m}).$$

式中: a_m 为二次项系数; b_m 为一次项系数.

发电公司 m 的支付函数即为它的卖电收益减去发电成本,表示为

$$\Pi_m(p_s, g_{s,m}, p_c, g_{c,m}) = p_s g_{s,m} + \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{c,n} g_{c,mn} - c_m(g_{s,m}, g_{c,m}).$$

式中: $g_{c,mn}$ 为发电公司 m 卖给电力用户 n 的期货,且 $\sum_{n \in \mathcal{N}} g_{c,mn} = g_{c,m}, p_c = (p_{c,n}, n \in \mathcal{N})$.

对于发电公司群体,发电代理商可建模为所有的发电公司构成的聚合体,则代理商售出的电力现货与期货的数量是所有发电公司的卖电量之和,分别为 q_s 和 q_c . 此外,代理商的支付函数是 q_s 和 q_c 的函数,应反映所有发电公司的支付特征,因此,可以使其等于所有发电公司的支付函数的和,即 $\Pi(p_s, q_s, p_c, q_c) = \sum_{m \in \mathcal{M}} \Pi_m(p_s, g_{s,m}, p_c, g_{c,m})$.

由于 Π_m 含有二次项,代理商的支付函数关于卖电量不可分.为了得到代理商的支付函数表达式,将每个发电公司的支付函数进行泰勒近似并忽略高阶项,得到代理商的近似支付函数如下:

$$\Pi(p_s, q_s, p_c, q_c) = p_s q_s + \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{c,n} d_{c,n} - a(q_s + q_c)^2 - b(q_s + q_c).$$

式中: $a = \frac{\sum_{m \in \mathcal{M}} a_m}{M}; b = \sum_{m \in \mathcal{M}} b_m / M$.

1.3 混合电力市场分层架构

混合电力市场采用分层系统呈现层级结构.从电能交易的参与者即电力用户和发电公司来看,层级结构如下:首先发电公司聚合构成代理商,与电力用户构成混合电力市场的上层,从交易双方的效益出发,确定最优的电能交易价格以及总的买卖电量;下层是一个独立的资源分配子系统,代理商依据群体中的个体支付函数确定每个个体的卖电量,实现资源的最优分配.

从电力交易的方式来看,电力现货市场与电力期货市场相互影响,获得层级结构如下:给定电力期货市场,确定电力现货市场的最优电价和现货买卖数量;然后在所得的电力现货市场下,确定电力期货市场的最优电价与现货交易数量.这是一个迭代的过程,需要不断地更新电力市场的数据,直至达到平衡.接下来,设计分层混合电力市场机制来求解混合电力市场的最优交易策略,即层级市场的均衡点.

2 分层混合电力市场机制设计

本节详细地描述所设计的分层混合电力市场机制,确定混合电力市场的最优电价和交易电量,得到电力交易参与者的最优交易策略.

首先,假设电力期货市场的参数给定,即已知 $p_{c,n}, d_{c,n}, \forall n$, 则 $q_c = \sum_{n \in \mathcal{N}} d_{c,n}$ 已知.电力用户的最优策略是使其个体支付函数 $\Phi_n(p_s, d_{s,n}, p_{c,n}, d_{c,n})$ 最大的策略.基于电力期货市场的参数,通过最大化支付函数可以得到每个电力用户的现货交易量 $d_{s,n}$ 为电力现货价格 p_s 的函数,基于此最优关系,发电代理商则可以确定使其支付函数最大的最优电力现货价格 p_s^* . 具体计算过程如下.

用 $Q_{s,n}$ 表示电力用户 n 在 p_s 下的最优现货交易量,则

$$Q_{s,n}(p_s; p_{c,n}, d_{c,n}) = \operatorname{argmax}_{d_{s,n}} \Phi_n(p_s, d_{s,n}, p_{c,n}, d_{c,n}).$$

这个问题可通过使支付函数 $\Phi_n(p_s, d_{s,n}, p_{c,n}, d_{c,n})$ 对 $d_{s,n}$ 的一阶导为 0 求解,得到 $Q_{s,n}$ 的表达式如式(2)所示.

$$Q_{s,n}(p_s; p_{c,n}, d_{c,n}) = \frac{\mu - p_s}{2\mu_n} + d_n - d_{c,n}. \quad (2)$$

接下来,发电代理商在此关系下最大化自身支付,得到最优电力现货价格 p_s^* :

$$p_s^*(Q_{s,n}; p_c, q_c) = \operatorname{argmax}_{p_s} \Pi(p_s, q_s, p_c, q_c).$$

将 $q_s = \sum_{n \in \mathcal{N}} Q_{s,n}(p_s; p_{c,n}, d_{c,n})$ 代入 $\Pi(p_s, q_s, p_c, q_c)$ 中并对 p_s 求导,使其为 0 可得

$$p_s^* = \frac{(2\mu d + \bar{\mu})(\mu + a) + \mu b}{2\mu + a} - \frac{2\mu^2}{2\mu + a} q_c. \quad (3)$$

$$\text{式中: } \mu = \frac{1}{\sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{\mu_n}}; d = \sum_{n \in \mathcal{N}} d_n.$$

将式(3)代入式(2)中,可得到每个电力用户最优的现货交易量为

$$d_{s,n}^* = Q_{s,n}(p_s^*; p_{c,n}, d_{c,n}) = \frac{\mu \bar{\mu} - 2\mu(\mu + a)d - \mu b}{2\mu_n(2\mu + a)} + \frac{\mu^2}{\mu_n(2\mu + a)} q_c + d_n - d_{c,n}. \quad (4)$$

其次,假设电力现货市场的参数给定,即已知 $p_s, d_{s,n}, \forall n$, 则 $q_s = \sum_{n \in \mathcal{N}} d_{s,n}$ 已知. 用 $q_{c,n}$ 表示电力期货价格 $p_{c,n}$ 下的最优期货交易量, 得到 $q_{c,n}$ 的表达式为

$$Q_{c,n}(p_{c,n}; p_s, d_{s,n}) = \frac{\bar{\mu} - p_{c,n}}{2\mu_n} + d_n - d_{s,n}.$$

由于发电代理商与电力用户单独签订期货合同, 不同用户之间的期货电价不同, 因此, 给定其他用户(除 n 外)的期货交易策略, 发电代理商与电力用户 n 的最优期货电价是使发电代理商支付函数最大的电价

$$p_{c,n}^* = \frac{(2\mu_n d_n + \bar{\mu})(\mu_n + a) + \mu_n b}{2\mu_n + a} - \frac{2\mu_n(\mu_n + a)}{2\mu_n + a} d_{s,n} + \frac{2a\mu_n}{2\mu_n + a} (q_s + \sum_{i \neq n} d_{c,i}). \quad (5)$$

由此, 可得发电代理商与电力用户 n 的最优期货交易量为

$$d_{c,n}^* = Q_{c,n}(p_{c,n}^*; p_s, d_{s,n}) = \frac{\bar{\mu} - b}{2(2\mu_n + a)} + \frac{\mu_n}{2\mu_n + a} (d_n - d_{s,n}) - \frac{a}{2\mu_n + a} (q_s + \sum_{i \neq n} d_{c,i}). \quad (6)$$

基于上述分析, 当一个电力市场(现货或者期货)给定, 就可以得到另一个电力市场的最优交易电价和交易量, 则分层混合电力市场的平衡点应满足: 最优电力期货电价和交易量所基于的电力现货市场参数刚好是基于此最优电力期货市场参数的最优电力现货电价和交易量. 通过以上公式很难直接求出平衡点的解析表达式, 因此, 需要通过一个迭代算法来求出相应的电力现货/期货的电价和交易量. 该算法涉及电力用户和发电公司的聚合体, 发生在分层混合电力市场的上层.

算法流程如下:

步骤 1: 初始化, 设置迭代次数 $k=1$, 初始电力现货市场参数 $p_s^0, q_s^0, p_c^0, q_c^0$; 给定算法结束误差的容忍上限 ε_0 , 一般设为 10^{-3} .

步骤 2: 根据每个电力用户和发电公司的参数得到聚合体参数 $\bar{\mu}, \mu, d, a, b$.

步骤 3: 在每一步 k , 根据式(3)和式(4)计算电力现货市场参数 p_s^{k-1}, q_s^{k-1} 下的最优期货电价和交易量, 并将计算的结果赋给 p_c^k, q_c^k .

步骤 4: 基于 p_c^k, q_c^k 的值, 通过式(5)和式(6)计算得到新的最优电力现货电价和交易量, 赋值给 p_s^k, q_s^k .

步骤 5: 计算与上一步的误差 $\varepsilon = \|p_s^k - p_s^{k-1}\| + \|p_c^k - p_c^{k-1}\| + \|q_s^k - q_s^{k-1}\| + \|q_c^k - q_c^{k-1}\|$, 若 $\varepsilon < \varepsilon_0$, 满足终止条件则结束迭代, 并输出混合电力市场的交易策略, 否则, 令 $k = k + 1$, 并返回步骤 3.

基于上述迭代算法即可得到混合电力市场的平衡策略以及电力现货和电力期货的最优交易策略, 但下一步还应进一步确定发电公司个体的电力现货和期货的交易电量. 这里简单地采取轮盘赌的形式进行电量分配, 即在群体中, 按照自身所占的比例进行分配, 计算公式如下:

$$g_{s,m} = \frac{2a_m + b_m}{M(2a + b)} q_s;$$

$$g_{c,m} = \frac{2a_m + b_m}{M(2a + b)} q_c.$$

3 算例分析

考虑一个混合电力市场,假设有5个电力用户和4个发电公司.电力用户和发电公司的参数如表1所示.值得指出的是,所提的混合电力市场架构及机制适用于任意数量的电力用户和发电公司.

表1 电力用户与发电公司参数

用户或公司数量	电力用户参数		发电公司参数	
	μ_n	d_n	a_m	b_m
1	1.4	5	0.03	0.12
2	1.2	7	0.02	0.19
3	1.3	8	0.05	0.15
4	1.4	6	0.07	0.16
5	1.5	4	/	/

根据表1,可以计算出发电代理商的参数和一些聚合参数如下: $\mu = 0.2129, d = 30, a = 0.0425, b = 0.155$.

令 $\bar{\mu} = 30$,给出混合电力市场的参数初始值为 $p_s^0 = 0.17, d_s^0 = [4\ 3\ 5\ 4.5\ 6], p_c^0 = [0.12\ 0.12\ 0.12\ 0.12\ 0.12], d_c^0 = [2\ 4\ 4\ 3\ 5]$.

采用 MATLAB 实现算法并计算,25步后可以得到分层混合电力市场的平衡点.电力现货电价和不同电力用户签订的期货电价的轨迹图如图2所示.由图2可以看出:电力现货和电力期货的价格在达到平衡点时相等.电力用户的期货交易量和现货交易量的轨迹图分别如图3和图4所示.由图3和图4可以看出:用户的电力现货和期货交易达到平衡,且该交易策略下,成本最低.采用混合电力市场与现货市场交易的交易量和成本的比较如表2.由表2可以看出:混合电力市场的交易量更大,电力现货的价格更低,现货价格更接近于市场边际成本.

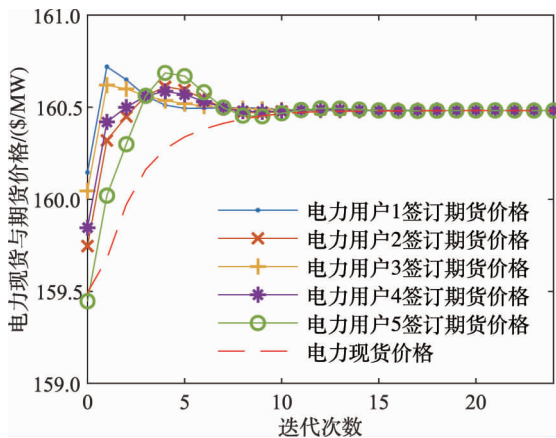


图2 电力现货电价和电力期货电价的轨迹

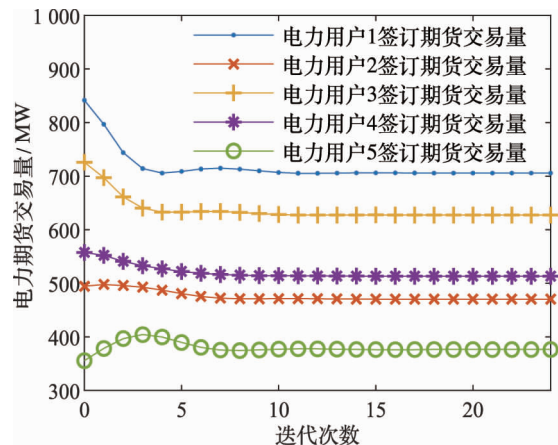


图3 电力期货交易量的轨迹

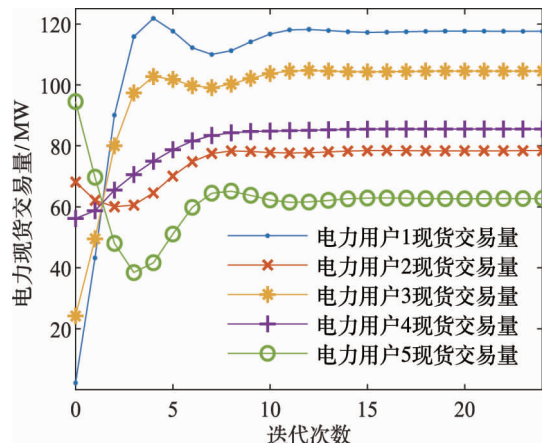


图4 电力现货交易量的轨迹

表2 混合电力市场与现货市场比较

市场类型	现货价格/(\$/MW)	市场交易总量/MW	电力用户效益				
			用户1	用户2	用户3	用户4	用户5
混合电力市场	160.5	3 140	5 420	3 620	4 820	3 940	2 890
现货市场	169.9	2 390	3 140	2 090	2 790	2 290	1 680

4 结论

1)在混合电力市场中,市场参与者可同时采用电力现货和电力期货进行交易,与电力市场单独采用电力现货或期货交易相比,可以应对单一交易模式引发的电价波动剧烈或者无法响应电力系统变化等挑战。

2)混合电力市场可以有效地降低现货的电价,提升市场的交易量,在价格下降的情况下还可增加用户的效益和市场收益。

3)所提的混合电力市场有多家参与者进行竞争,为形成良性的市场交易环境奠定基础,丰富了电力交易的模式,增加了电力市场的灵活性和智能性,为将来电力改革的进一步发展提供了技术支持。

4)作为未来的研究方向,将考虑不同类型的电力用户和发电公司,即支付函数除了各自的满意度或成本系数不同之外,满意度函数和成本函数的形式也可以不同.这种异类的考虑更符合实际电力交易双方多样化的情况.解决异类问题的方向有2个:一是研究新的聚合技术,采用数据拟合的方式学习聚合体的支付函数;二是将电力用户和发电公司个体视为智能体,每个个体以最优化的支付函数为目标直接参与电力交易,这使得电力期货的电价对每个个体均有所不同。

参考文献:

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
- [2] 朱继忠.美国电力市场的发展和实现方法分析[J].南方电网技术,2016,10(5):22-28.
- [3] 史连军,邵平,张显,等.新一代电力市场交易平台架构探讨[J].电力系统自动化,2017,41(24):67-76.
- [4] Reinisch W, Tezuka T. Market power and trading strategies on the electricity market: a market design view [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):1180-1190.
- [5] 宋燕敏.适应分层分区电力市场发展的新电力交易市场研究[D].南京:东南大学,2006.
- [6] 沈瑜,夏清,康重庆.中国电力市场模式的探讨[J].电力系统自动化,2000,24(4):6-9.
- [7] 孙蕾.电力现货市场建设模式策略研究[J].中国国际财经(中英文),2017(22):283.
- [8] 韦丁.区域电力现货市场建设模式及路径探讨[J].低碳世界,2018(12):277-278.
- [9] 梁志飞,陈玮,张志翔,等.南方区域电力现货市场建设模式及路径探讨[J].电力系统自动化,2017,41(24):16-21.
- [10] 尚金成,张兆峰,韩刚.区域共同电力市场交易机理与交易模型的研究[J].电力系统自动化,2005,29(4):6-13.
- [11] 李帆,朱敏.英国的电力市场及输电系统简介[J].电力系统自动化,1999,23(2):23-40.
- [12] Kristiansen T. Pricing of monthly forward contracts in the Nord Pool market[J]. Energy Policy, 2007, 35(1):307-316.
- [13] Mount T. Market power and price volatility in restructured markets for electricity[J]. Decision Support Systems, 2001, 30(3):311-325.
- [14] 江健健,夏清,祁达才,等.基于期货的新型电力交易模式[J].中国电机工程学报,2003,23(4):31-37.
- [15] 廉小虎.电力市场期货交易中的模式、电价及风险研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [16] 李晓龙.基于市场微观结构理论的我国电力期货市场构建研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.