

考虑可再生能源配额分配的电力零售市场设计

崔东君^{1,2},和敬涵²,程晓春¹,程宏¹,王宇¹,李冬梅¹

(1. 首都电力交易中心有限公司,北京 100031;2. 北京交通大学,北京 100093)

摘要:随着中国电力市场化快速推进,不同用电需求的电力用户入市交易,参与市场化交易的电力用户数量剧增。根据国家发改委可再生能源配额制文件要求,各类市场主体应承担可再生能源消纳任务。在这种发展趋势下,研究如何让售电公司在批发市场中发挥对价格波动的平抑作用,在零售市场中发挥电价调节供需关系的作用,用以解决清洁能源消纳问题,是建设多元性、开放性、竞争性的零售市场的关键要素。在了解国内外零售市场建设情况下,针对零售市场中出现的现货与中长期衔接时偏差电量承担问题,以及固定零售套餐、固定加权直接交易价格限制售电公司与零售用户自主选择的问题,提出了建立新型零售市场的设计方案。为电力零售市场中市场主体设计或选择符合自身需求的电力零售套餐提供借鉴。

关键词:电力市场;电力交易;可再生能源;配额制;零售市场

中图分类号:F426 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0070-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210115

Design of Electricity Retail Market Considering Quota Allocation of Renewable Energy

Cui Dongjun^{1,2}, He Jinghan², Cheng Xiaochun¹, Cheng Hong¹, Wang Yu¹, Li Dongmei¹

(1. Capital Power Exchange Center Co., Ltd., Beijing 100031, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100093, China)

Abstract: With the rapid development of electricity market in China, the number of power users participating in the power exchange market has increased dramatically, and power users with different power consumption characteristics and energy demand enter the market for transaction. According to the requirements of the renewable energy quota document written by the National Development and Reform Commission of China, all kinds of market entities should undertake the task of renewable energy consumption. In this background, the research of power retailer to stabilize the price fluctuation in the wholesale market and regulate the relationship between supply and demand by electricity price became very important, which is the key factor to build a diversified, open and competitive retail market. Firstly, the construction of retail market at home and abroad is introduced. Then, under the situation of electricity market reform in China, it is necessary to design a power exchange mechanism that can meet the requirements of clean energy quota for each market participants, and to formulate a new retail market mechanism that reflecting the synergy between the wholesale and retail markets. The proposed new mechanism can provide a reference for the construction of power market and fulfilling the responsibility of clean energy consumption.

Key words: electricity market; power trading; renewable energy; quota; retail market

0 引言

2015年3月颁布的中发[2015]9号文件,正式拉开了新一轮电力体制改革的帷幕。2019年国家

基金项目:国网北京市电力公司资助项目(“三型两网”模式扩大可再生能源消纳机制研究)

发改委发布《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》,明确各类市场主体对可再生能源的消纳责任。如何在市场化交易的机制下完成可再生能源消纳目标是当前市场机制设计需要着重考虑的问题。各省市也在经历五年电力体制改革之后,先后印发相关政策文件,将售电公司与零售用户组成的零售市场视为今后电力市场建设和配额制实施

的重要场景之一^[1-4]。可见售电公司在零售市场中平抑各类交易价格的波动,激励零售用户消纳清洁能源的作用将直接影响可再生能源消纳任务的完成情况。英国、澳大利亚和新加坡等一些国家零售市场建设起步较早,并且各有特色,对中国零售市场建设很有借鉴意义^[5]。伴随各省现货交易实施细则出台,形成中长期交易与现货交易共存,常规能源与清洁能源共同参与交易的局面,使交易品种呈现交叉性、多元化特征,这给电力零售市场的机制建设带来新的挑战。

下面首先介绍国外零售市场建设情况以及山西、山东、云南等省零售市场的建设动态。其次,结合电力市场顶层设计思路,考虑可再生能源配额消纳任务的实际形势,分析现行零售市场运行过程中零售套餐僵化、未考虑配额在零售市场分配的问题,研究建立一种灵活高效的零售市场交易机制。最后,在新型交易机制下,介绍了利用 Hamilton 函数计算配额指标和零售价格耦合的零售套餐设计方法。使用该方法可根据零售用户对可再生能源配额占比和零售价格不同需求设计零售套餐,充分激发零售市场活力。

1 国内外发展现状

英国、美国、澳大利亚等国都已建立了电力零售市场。总结欧美各国的零售市场机制设置,其资金流与电力流的流向是统一的,即谁付钱谁购得电能,谁收钱谁提供电能^[6-7]。以同属亚洲的新加坡电力零售市场为例,与中国类似,根据用户年用电量,新加坡的电力用户被分为拥有自选电力供应资格的用户和不拥有自选电力供应资格的用户。前者可以通过定制价格配套向电力零售商购电,或者选择通过新能源服务有限公司(传统供电公司)间接向电力批发市场购电,或者直接在电力批发市场购电,或者与后者一样,继续以管制定价向新能源服务有限公司购电;而后者只能以管制定价向新能源服务有限公司购电^[8]。如图1所示。

与中国电力市场顶层设计不同的是新加坡电力零售市场的电费收取方式。新加坡市场机制设计为根据电力用户选择不同,用户付费方式也不同:用户如果选择从零售商处购电,将供电费、服务费、输配电费以及代收税金一并支付给零售商,再由电力零

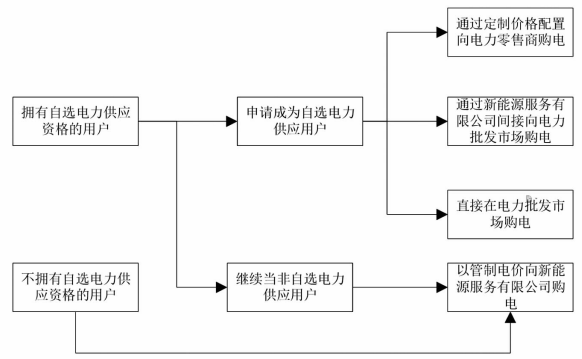


图1 新加坡电力用户选择

售商代理其与市场服务商结算;用户如果选择从市场服务商处购电,则可以将上述费用一并支付给市场服务商,由其代理完成各项费用的结算。而对于电力零售商来讲,向电力用户收取全部费用时,部分费用是代理市场服务商收取,存在一定的欠费风险,因此,电力零售市场交易规则就规定零售商须向市场服务商缴纳支付保证金,以规避市场服务商可能受到客户带来的欠款风险。

中国电力市场化建设与国外不同之处在于是以电网公司作为电费收取的中间节点。零售用户向电网公司支付电费,电网公司向售电公司支付服务费,电网公司向发电企业支付发电费用。

中国各省均考虑到有售电公司参与交易的零售市场建设,但各省对售电公司的放开程度不同。大部分省已准许售电公司参与市场化交易,初步建立了以售电公司代理零售用户购电为主,以虚拟电厂、储能商等聚合体在个别省试点开展的零售市场。随着国家发改委可再生能源配额制文件的印发,各类市场主体如何在市场中完成配额消纳任务,成为中国零售市场建设的新特点。2020年,山西、山东、云南省在准许售电公司入市,形成由售电公司、零售用户组成的零售市场的基础上,再印发相关文件规范电力零售市场建设。其中山东改变了原有售电公司与零售用户协商零售价格、服务费的方式,变为零售用户与售电公司协商选定零售套餐,缩短了结算周期,规范了零售市场行为。山西支持售电公司开发第三方零售交易平台与交易中心平台数据对接,售电公司通过自有平台管理其代理的零售用户,拓宽了售电公司对零售用户的管理范畴。云南由省级交易中心统一建立了零售交易平台,支持多代理关系管理、多种收益分配模式选择等功能。冀北率先开展虚拟电厂机制研究,通过聚合发、储、用电等各

类市场主体实现削峰填谷,减少发电机组频繁启停,提高各市场主体的经济效益。随着各项改革文件出台,部分零售市场已不能适应新的指导文件要求,发展适应国家顶层设计的零售市场是亟待解决的问题。

2 新型电力零售交易机制设计

从上述国内外的电力零售市场建设情况看,零售用户的多样化需求,是引导电力零售市场竞争性发展的主要原因。另外,可再生能源配额制指标将刺激零售用户选择具有价格和配额指标优势的售电公司,也是影响售电公司以至整个零售市场的关键因素^[9]。随着中国电力市场建设日趋成熟,将形成现货市场和中长期市场协同发展,可再生能源与常规能源共同竞争的格局^[10-11]。为适应改革进程,需解决的问题有:优化工作流程,提高各相关单位效率;电费结算周期不同步,影响短周期交易开展;零售套餐较单一,不利于激发市场活力。为解决以上问题,设计了一套适应中国电力市场顶层设计的电力市场零售交易机制,改变现有批发侧、零售侧的交易机制,为建立灵活高效的零售市场提供机制保证。

2.1 批发侧交易机制设计

未建立市场化时,电网企业承担输、配、售业务,各项业务之间的衔接属于电网公司内部工作。市场化改革后,内部工作流程需拆分给不同的市场主体,在工作机制设计上需要有所改变。

为适应市场化改革,批发侧交易机制设计需解决以下两个问题:

1) 电网企业结算问题。

考虑到中国电力市场在建设初期阶段,市场化前由电网公司负责输、配、售环节建设和运营,计量表计产权属于电网公司,并且已经建立了自动化的计量表计自动抄录的系统,若直接照搬国外由零售商收缴电费的电力市场建设模式,将造成大量重复投资,不适用于中国国情和现实条件。因此,交易机制设计为:由独立的电力交易机构负责市场化交易结算,并向发电企业、批发用户、零售用户、售电公司、电网公司等各类市场主体出具结算单,作为市场化电量、电费结算的依据。现阶段暂由电网公司负责各市场主体的费用流转,即:电网公司根据交易机构出具的结算单向批发用户、零售用户、非市场化用

户抄表收费,向售电公司、发电企业支付电费。电网公司在执行电费收缴时可能遇到欠费情况,对于批发、零售用户的电费催缴由电网公司负责,用户欠费风险也由电网公司承担;售电公司服务费由电网公司支付,但出现由于售电公司原因造成服务费为负的情况时,由电网公司代收该部分费用,若售电公司无法支付费用,则依据交易合同约定由金融机构调用售电公司履约保函;发电企业费用由电网公司支付,如果发电企业未能履约,则由发电企业支付合约和对应运时段的差价,若发电企业无法支付该部分费用,则依据交易合同约定由金融机构调用发电企业履约保函。电费收缴关系如图 2 所示。

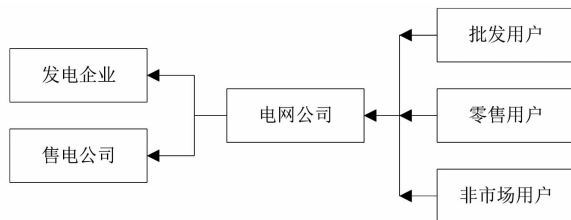


图 2 电费收缴关系

2) 电量偏差考核问题。

目前市场化交易产生的偏差电量采用偏差考核或滚动调整的方式,即在发电侧产生偏差后,偏差电量滚动至次月补齐;用电侧产生偏差后,用户需对偏差电量进行免考核说明,若无免考核说明则在次月缴纳考核费用,与次月电费一并缴纳。为缩短结算清算周期,新交易机制设计为:发、用电侧电量偏差在现货市场中予以平衡,由于电量偏差产生的中长期合约与现货价格的差值由产生偏差的一方承担。此种方式缩短了结算周期,偏差电量在当次结算周期即可结清,根据现货价格结算费用也体现了市场化交易的公平性。

2.2 零售侧交易机制设计

售电公司与发电企业达成购电协议后,需再将电能转卖给其代理的零售用户。目前中国大部分省采用的是固定的零售套餐模式,即规定几款固定条款的零售套餐,由售电公司与零售用户协商选择其中一个套餐。此种方式虽然能够规范零售市场的交易行为,但由于固定的套餐并不能涵盖所有零售用户需求,也限制了售电公司在零售市场的自主权,并且在批发侧使用直接交易的加权价传导至零售侧,限制了售电公司对其代理的零售用户价格自主的作用,具有较大的局限性。尤其是在可再生能源配额

制实施后,部分零售用户既不想直接参与市场化交易,避免现货价格波动对本企业购电成本的影响,又想提高清洁能源消纳比重;售电公司也会比较参与清洁能源交易与直接购买绿色电力证书之间的付出成本。因此,需要打破现有固定零售套餐模式,设计出由售电公司根据零售市场需求,自主设计零售套餐的零售市场。

零售侧交易机制设计需解决的问题如下:

1) 零售套餐僵化问题

新型零售侧交易机制下,交易中心不再设置固定的零售套餐,改由售电公司与其代理的零售用户协商确定零售电量、电价、可再生能源配额比例,自由制定零售套餐。考虑某时段,某区域有多个售电公司参与电力零售市场竞价交易,用 $N = \{1, 2, i, \dots, n\}$ 表示售电公司的集合, $M = \{1, 2, j, \dots, m\}$ 表示同一售电公司下代理的零售用户集合。交易中心按各零售用户的实际用电量及签订的零售合同进行 $N \times M$ 次运算,虽然结算计算量增加,但也增大了售电公司管理其代理的零售用户的灵活性。

2) 使用固定的加权价格结算问题

改变用户与多家发电企业达成交易时,采用批发侧取加权价作为零售侧的基准电价的形式,将批发侧电价与零售侧电价解耦,售电公司与发电企业的批发电价不影响售电公司与零售用户间的零售侧电价。

图3是售电公司的购售电交易框架。在零售市场竞争价交易中,售电公司 $i (i \in N)$ 通过降低批发市场报价 P_i ,同时合理配置其在零售市场的报价 L_{ij} 来追求自身利润最大化。售电公司 i 的竞价交易电量 X_i 与其代理的零售用户需求 and 市场价格趋势有关,所有售电公司的零售电量均购于电力批发市场,而批发市场价格 P_i 随供求关系的变化而变化。

根据现行的输配电价形式,售电公司在批发市场购电量可表示为

$$X_i = W + \sum X_{ij} \quad (1)$$

式中: W 为网损; X_{ij} 为代理的零售用户需求电量。

电价关系可表示为

$$L_{ij} = P_{ij} + P_s + P_z + P_f \quad (2)$$

式中, P_{ij} 、 P_s 、 P_z 、 P_f 分别为批发电价、输配电价(含网损)、政府基金及附加、售电公司收益。

售电公司设置用户侧的落地价作为零售套餐价格供零售用户选择,此方法使得批发价格和零售价

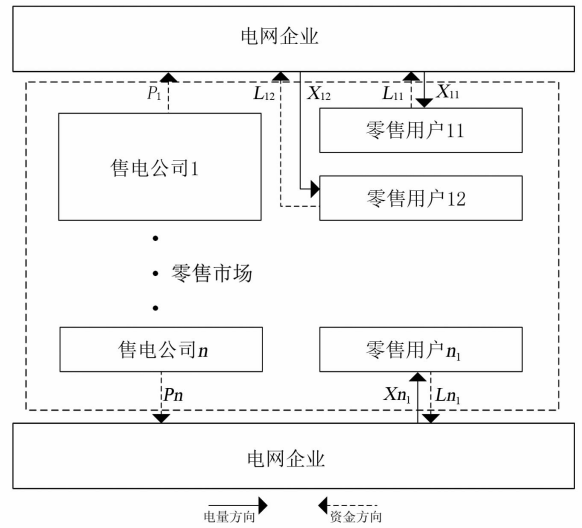


图3 零售市场能量资金关系

格脱钩^[12-14]。售电公司可任意设置用户落地价格套餐供零售用户选择。同时,售电公司可根据用户对可再生能源的需求程度,有针对性地设置可再生能源配额套餐供用户选择。

3 考虑配额与价格的零售套餐设计

售电公司会根据零售用户的需求设计零售套餐,考虑国家发改委印发可再生能源配额制指标,各省参与交易的购电主体均应承担配额任务,而且消纳清洁能源也是企业节能减排的重要指标。因此,零售用户在选择零售套餐时不仅希望价格低,而且希望获得更多的清洁能源配额指标。由于电能的质量是相同的,售电公司间相互竞争只能靠提高配额份额,或降低零售价格^[15-18]。目前可再生能源配额消纳任务是大于可再生能源总量的,所以争取更多的配额意味着提高零售价格。

3.1 建立售电公司利润模型

售电公司在设计零售套餐时需要考虑配额指标和电价两方面因素。考虑有 i 个售电公司在 $t (t \in \{0, \infty\})$ 时刻向入市的零售用户推荐价格为 $L_i(t)$ 、含可再生能源配额为 $q_i(t)$ 的套餐。售电公司的售电成本为 $c_i + \mu q_i(t)$,其中 $c_i (\geq 0)$ 是批发市场购电成本; $\mu q_i(t)$ 为售电公司购买可再生能源的成本, $\mu (\geq 0)$ 为配额成本的线性系数。售电公司还可通过投入资金,提高自身运营管理水平,用 $u_i(t)$ 代表自身改进程度,则售电公司的改进成本 $C_{ui}(t)$ 为

$$C_{ui}(t) = \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \quad (3)$$

设零售用户对售电公司推出的套餐有价格敏感系数 θ 和配额敏感系数 δ , 并且售电公司在零售市场中有初始的市场占有率 y_i , 则在同一市场中竞争的零售用户需求函数 $D_i(t)$ 可表达为线性函数, 即

$$D_i(t) = y_i - \theta(l_i(t) - l_j(t)) + \delta(q_\Delta(t)) \quad (4)$$

式中, 下标 Δ 代表相互比较的变量的差。

当售电公司给出的价格和配额指标都没有差别的时候, 零售用户会选择原本市场占有率就大的售电公司。但通过售电公司间的竞争, 一方面可以提高自身运营水平; 另一方面可以利用占有市场中更多的配额指标来争取更多的零售用户。

售电公司间的竞争是个动态的过程, 可表示为自身挖潜和配额占有的线性函数:

$$q_i(t) = \gamma u_i(t) - \xi q_i(t) \quad (5)$$

式中: γ 为占有市场中配额的系数, $\gamma \geq 0$; ξ 为企业经营效率系数^[21-24], $\xi \geq 0$ 。

售电公司 i 的利润函数可表示为

$$L_i(l_i, u_i, t) = \int_0^\infty e^{-rt} \{ [l_i(t) - c_i - \mu q_i(t)] \cdot [y_i - \theta(l_\Delta(t)) + \delta(q_\Delta(t))] - \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \} dt \quad (6)$$

式中: r 表示折现率; $y \geq 0$ 。由式(6)可以看出, 提高零售套餐的配额会带来更多的零售用户, 但同时配额增加也提高了经营成本。

3.2 利润模型分析

考虑售电公司通过改变自身经营效率和获得更多的配额指标来相互竞争, 可构建考虑约束条件的微分方程:

$$\max_{p_i, u_i} L_i(l_i, u_i) = \int_0^\infty e^{-rt} \{ (l_i - c_i - \mu q_i) [y_i - \theta(l_\Delta) + \delta(q_\Delta)] - \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \} dt \quad (7)$$

s. t.

$$q_i = \gamma u_i - \xi q_i \quad (8)$$

$$q_j = \gamma u_j - \xi q_j \quad (9)$$

$$q_i(0) = Q_{0i} \quad (10)$$

$$q_j(0) = Q_{0j} \quad (11)$$

上述方程中: q_i 为占有的配额指标状态变量; 售电公司自身提升 $u_i \geq 0$ 和零售价格 p_i 为控制变量。式

(8)、式(9)为状态变量, 式(10)、式(11)为初值约束。

构造 Hamilton 函数:

$$H_i(p_i, u_i) = (p_i - c_i - \mu q_i)(l_i - \theta(p_\Delta) + \delta(q_\Delta)) - \frac{\beta}{2} u_i^2 + \lambda_{ii}(\gamma u_i - \xi q_i) + \lambda_{ij}(\gamma u_j - \xi q_j) \quad (12)$$

式中, λ_{ii} 和 λ_{ij} 为最优化问题的协态变量, 其经济学含义为企业从自身改进或对手改进中获得的边际收益。设初始时刻的边际收益 $\lambda_{ii}(0) = \lambda_{0i} > 0$, 计算 Hamilton 函数的最优解, 且最优解满足如下方程:

$$\frac{\delta L_i}{\delta l_i} = \theta l_i + q_i \delta + l_i - \theta(l_i - c_i - \mu q_i) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta u_i} = -u_i \beta_i + \gamma \lambda_{ii} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta \lambda_{ii}} = q_i \quad (15)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta \lambda_{ij}} = q_j \quad (16)$$

其中, 式(13)、式(14)为最优化约束, 式(15)、式(16)为状态约束。

根据上述分析计算, 可令横轴为价格敏感程度 θ , 纵轴为质量敏感程度 δ , 并按配额与价格敏感程度分为配额不敏感、低配额敏感型、中配额敏感型、高配额敏感型 4 个类型, 绘制价格与配额的关系图如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 配额与价格敏感的相差程度是设计零售套餐的关键条件。该条件将坐标图划分为 4 个区域, 各区域中的配额 - 价格关系分别呈现出不同的特点。4 个区域按配额与价格敏感程度分别为: 配额不敏感型、低配额敏感型、中配额敏感型、高配额敏感型。各区域所代表的竞争格局是动态的, 随着市场中配额考核指标以及可再生能源的产能变化而改变, 售电公司设计零售套餐的策略也将随之变化。

售电公司根据零售用户需求, 结合自身盈利模式, 可制定多种零售套餐。结合目前零售用户需求, 可设计如下几类零售套餐^[19-26]:

1) 分时段电价套餐。根据每日不同时段, 售电公司与零售用户协商各时段电价。此类套餐考虑了每日不同时段的电价变化, 时段可由售电公司与零售用户协商定制, 甚至工作日和节假日各时段电价

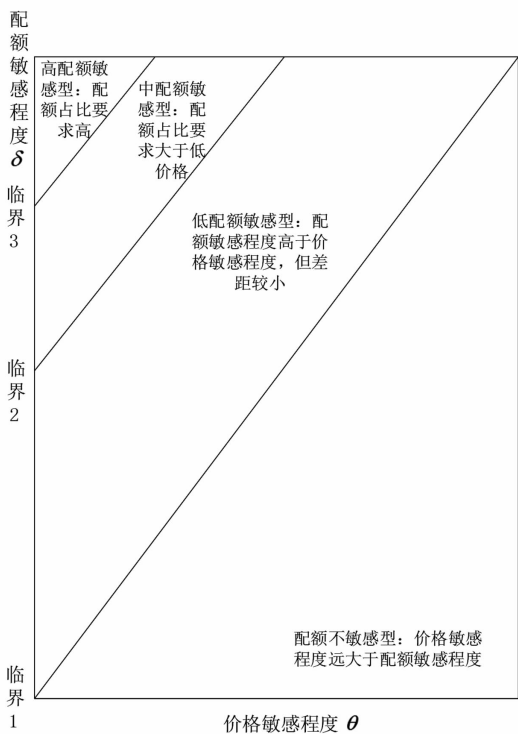


图4 配额-价格分位关系

也可不同,最终达到以价格激励的方式鼓励零售用户削峰填谷。此类也适用于价格敏感型零售用户。

2) 固定单价套餐。合同期内电度电价以及可再生配额百分比固定不变,由售电公司承担价格波动,零售用户只需按用电量支付电费。此类套餐适用于价格敏感性高、中型零售用户。

3) 量价联动套餐。可设置为阶梯递增电价的形式,分档设定不同阶梯的电量值标准和对应的分档电价,每个阶梯设定可再生能源配额比例。此类套餐适用于价格敏感性高、中型零售用户。

4) 固定配额套餐。零售用户要求按固定配额指标结算电费,此类套餐适用于价格敏感性低的零售用户。

以上例举了几类典型的零售套餐,售电公司可根据配额、价格敏感程度以及市场中可再生能源与常规能源价格行情设计出更多类型的套餐满足零售用户需求。

4 结语

随着改革的持续深化和市场的进一步发展,零售市场建设对电力系统和电力市场组织和运行的影响将会增大。在设计零售市场时既要保证市场的有

序和活力,鼓励更多市场主体参与市场,又要引导市场行为符合国家政策导向,支持可再生能源配额高效消纳。

所提出的新型零售市场的设计方案仅在机制设计上进行了阐述,并对配额与价格共同影响零售套餐情况进行了分析。下阶段可借助 Bertrand 模型等经济学方法,建立售电公司参与零售市场竞价交易的博弈均衡模型,可通过模糊聚类等方法发掘不同零售用户的用能需求,为售电公司提供差异化的服务策略,提供理论支持。

参考文献

- [1] 姚星安,曾智健,杨威,等. 广东电力市场结算机制设计与实践[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2):76-85.
- [2] 闵子慧,陈红坤,林洋佳,等. 新电改背景下大用户直购双边博弈模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):77-84.
- [3] 吴敬慧,张杰,潘舒妍,等. 电力现货市场中标准零售套餐设计——基于用户分群的分析[J]. 价格理论与实践,2019,426(12):132-136.
- [4] 赵琛,张少华. 考虑用户切换行为的电力零售市场博弈模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):162-168.
- [5] 肖谦,杨再敏,杨悦勇,等. 国外电力差价合约模式及其启示[J]. 广东电力,2020,33(2):27-34.
- [6] 张小平,李佳宁,付灏. 英国电力零售市场的改革与挑战[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):10-16.
- [7] 陈博. 澳大利亚电力改革对我国电力零售市场的启示[J]. 科技创新与应用,2018(36):15-16.
- [8] 袁黎. 新加坡电力零售市场改革的经验启示[J]. 中国电力企业管理,2017(2):51-53.
- [9] Kamyab F, Amini M, Sheykha S, et al. Demand Response Program in Smart Grid Using Supply Function Bidding Mechanism[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(3):1277-1284.
- [10] 陈皓勇,陈玮,朱刚毅,等. “电力市场设计学”的基本概念及方法论[J]. 电力大数据,2018,21(6):1-8.
- [11] 陈晓林,刘俊勇,宋永华,等. 利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):75-81.
- [12] KEE E D. Vesting Contracts: A Tool for Electricity Market Transition[J]. The Electricity Journal,2001,14(6):11-22.
- [13] Hausman, Hornbyr, Smith A. Bilateral Contracting in Deregulated Electricity Markets[R]. New York: American Public Power Association,2008.

- [14] Chang Y. The New Electricity Market of Singapore: Regulatory Framework, Market Power and Competition[J]. Energy Policy, 2007, 35(1):403-412.
- [15] 李晨,周黎莎,曾鸣. 新能源并网对电力市场影响的系统动力学建模与仿真[J]. 华东电力, 2012(10): 1675-1679.
- [16] 刘敦楠,李瑞庆,陈雪青,等. 电力市场监管指标及市场评价体系[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9):16-21.
- [17] 张晓萱,薛松,杨素,等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9):1-8.
- [18] 罗琴,宋依群. 售电市场环境下的可中断负荷的营销策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17):134-139.
- [19] Zarnikau J W. Demand Participation in the Restructured Electric Reliability Council of Texas Market[J]. Energy, 2010, 35(4):1536-1543.
- [20] Wild P. Determining Commercially Viable Two-way and One-way 'Contract-for-Difference' Strike Prices and Revenue Receipts [J]. Energy Policy, 2017, 110: 191-201.
- [21] 洪江涛,黄沛. 基于微分博弈的供应链质量协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(2):100-107.
- [22] Wang S, Hu Q, Liu W. Price and Quality-based Competition and Channel Structure with Consumer Loyalty[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(2):563-574.
- [23] 李金溪,易余胤. 考虑产品节能激励的双寡头竞争博弈模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6): 1522-1530.
- [24] Pan X, Li S. Dynamic Optimal Control of Process-product Innovation with Learning by Doing[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(1):136-145.
- [25] Lin K Y, Sibdari S Y. Dynamic Price Competition with Discrete Customer Choices [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(3):969-980.
- [26] Martinez-de-Albeniz V, Talluri K. Dynamic Price Competition with Fixed Capacities [J]. Management Science, 2011, 57(6):1078-1093.

作者简介:

崔东君(1984),男,博士研究生,高级工程师,主要从事电力交易组织工作,主要研究方向为电力市场与电力交易;

和敬涵(1964),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统保护与电力市场;

程晓春(1970),男,高级工程师,主要从事电力市场建设、电力交易组织运营等工作;

程宏(1971),男,高级工程师,主要从事电力市场建设等工作;

王宇(1970),男,高级工程师,主要从事电力市场化交易管理等工作;

李冬梅(1966),女,高级工程师,主要从事电力交易组织管理工作。

(收稿日期:2020-07-15)

(上接第4页)

域中,附近100 m内有输电线路杆塔的配电网杆塔,均为较高及以上的风险等级。高土壤电阻率和强地闪密度区域的杆塔,大部分为较高及以上的风险等级。风险评估结果较为合理。

参考文献

- [1] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计10 kV 配电分册[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [2] 赵磊,张建新,夏云忠. 20 kV 架空绝缘电缆防雷措施的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(10):52-55.
- [3] 李琳,齐秀君. 配电线路感应雷过电压计算[J]. 高压技术, 2011, 37(5):1093-1099.
- [4] 边凯,陈维江,李成榕,等. 架空配电线路雷电感过电压计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 191-199.
- [5] H. K. Høidalen. Analytical Formulation of Lightning-induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines

above Lossy Ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1):92-100.

- [6] H. K. Høidalen. Calculation of Lightning-induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects[C]. International Conference on Power System Transient, New Orleans, 2003.

- [7] 雷潇,刘强,刘守豹,等. 土壤电阻率对10 kV 架空线路雷害风险的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(6): 116-119.

- [8] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620—1997[S], 1997.

- [9] 雷区分级标准与雷区分布图绘制规则:Q/GDW 10672—2017[S], 2017.

作者简介:

雷潇(1988),男,博士,高级工程师,从事输配电线路雷电防护技术研究。

(收稿日期:2020-12-15)