

基于交易控制的空调系统电力需求响应策略进展及建议

熊成燕^{1,2}, 孟庆龙¹, 奚 源¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 2. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500)

Development and suggestions of electricity demand response strategies for air-conditioning systems based on transactive control

XIONG Chengyan^{1,2}, MENG Qinglong¹, XI Yuan¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Faculty of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

摘要:电力需求响应是解决电网供需不平衡的重要途径。交易控制是一种电力需求响应控制方式,能有效实现调峰及负荷转移,提高电力系统用能灵活性。目前国内缺少对交易控制的研究,为促进交易控制在我国空调需求响应中的应用和发展,充分调研了国外相关研究内容,重点分析交易控制原理、结构和优势、投标和清算策略以及室内温度设定点的计算方法,归纳和总结了若干启示与建议,探讨了我国应用交易控制策略的侧重点和难点。

关键词:需求响应;空调负荷;交易控制;市场机制;投标与清算策略

Abstract: Demand response is an important way to solve the imbalance of power supply and demand. Transactive control is a new demand response control method, which can effectively achieve peak shaving, load shifting and improve power system flexibility. At present, there is a lack of research on transactive control in China. To promote the application and development of transactive control in China's demand response of air-conditioning, the relevant foreign research content is investigated deeply, and the transactive control principle, structure and advantages, bidding and clearing strategies, calculation methods for indoor temperature set points are analyzed. Several enlightenments and suggestions are summarized, and the emphases and difficulties of applying transactive control strategies are discussed.

Key words: demand response; air-conditioning load; transactive control; market mechanism; bidding and clearing strategies

0 引言

不断增长的空调用电需求以及夏季高温天气出现的空调用电高峰已成为导致电力负荷侧峰谷差值变化和峰值需求的主要原因,也是影响电网稳定运行、威胁电网安全性的重要因素。如一贯依靠增加装机容量来满足短暂的空调尖峰用电,不仅需要付出巨额的投资,还会浪费社会资源。合理调控空调负荷,可以在尽量不影响用户舒适度的前提下降低峰值负荷、缓解电力供需矛盾。

电力需求响应(demand response, DR)能有效解决电网供需不平衡问题。我国在20世纪90年代就引入了DR的概念,但直到近几年我国电力供应不平衡问题越来越严峻,DR才开始得到极大重视^[1]。总体来看,我国在需求侧响应方面处于初步发展阶段,市场化程度低,用户参与度不高,多趋向于行政手段。而交易控制(transactive control, TC)作为一种

新的空调DR方法,能有效解决传统DR方法无法规避的一些问题,例如保护终端用户隐私、尊重用户偏好和在实施DR的同时保证用户舒适度。国外学者已对TC策略展开诸多研究,并已将此策略应用至示范项目中。尽管国外DR发展现状与我国目前实际情况存在较大差异,但将TC策略应用到空调负荷控制中,基于市场交易机制、利用价格手段将底端的柔性负荷末端需求与顶端电网电价联系起来的运作经验值得我国借鉴。

本文首先介绍了TC原理、结构以及优势;其次介绍了TC过程;最后在此基础上,结合中国DR的发展现状,对TC策略在我国空调DR中的应用进行初步探讨并给出若干建议。

1 交易控制策略

1.1 交易控制研究现状

DR被定义为当电力批发市场价格升高或者系统可靠性受到威胁时,电力用户根据价格信号或激励措施响应电网,暂时改变其固有的习惯用电模

式,从而减少或推迟某时段的用电负荷而保障电网系统的可靠性和稳定性,并抑制电价上升的短期行为。传统的DR策略被分为两大类:电价型和激励型,而国外学者提出了一种基于TC的DR策略。TC是一种基于市场交易的分布式控制方法,因此有时也称基于市场的控制(market-based control, MBC)策略。

国外学者已开展了诸多有关TC应用到空调DR中的研究。文献[2]详细阐述了一种关于供热通风与空气调节(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)系统DR的TC策略,设计了交易市场模型(交易市场结构、投标和清算策略)和HVAC组件模型,最后通过仿真和物理实验证实了TC在商用建筑HVAC系统中的应用效果和前景。文献[3]设计了商业建筑HVAC系统的TC模型,模拟结果显示采用TC策略每年可节省约3 952 kWh电量,此外还观察到若平均冷负荷降低,则建筑物的总能耗也显著降低。

最著名的试点项目是2006—2007年美国西北太平洋国家实验室(Pacific northwest national lab, PNNL)设计的Olympic Peninsula GridWise试点示范项目^[4],该项目的TC对象包括家用温控器、家用热水器、家用干衣机、商用HVAC系统等;PNNL又在2011—2013年主导完成了AEP Ohio gridSMART示范项目,HVAC系统由智能软件管理并参与以5 min为价格波动周期的实时电力市场中,以此来调整居民家庭用电^[5]。另外,由美国能源部2009—2015年联合资助的Pacific Northwest Smart Grid项目^[6]也是世界上最早实施TC的试点项目之一。在欧洲,Powermatching City项目^[7]先后于2009年和2011年开启第1阶段和第2阶段试点项目。与国外相比,我国对基于市场交易机制的DR鲜有研究,文献[8]将TC策略用于控制微电网的分布式能源,文献[9]—文献[10]提出基于市场机制的DR是我国发掘需求侧资源的未来发展方向。

目前对TC的研究方法主要以仿真模拟为主,有少部分的物理实验研究,主要集中在TC方案的结构设计和分析。TC方案中终端用户的详细控制方法需进一步研究,尤其需要重点研究交易市场结构、投标和清算策略。在未来的研究中,利用TC将所有能源网络整合在一起构建能源互联网,以应对可再生能源日益普及所带来的间歇性问题。

1.2 交易控制原理

TC借鉴了微观经济学的原理,利用市场交易机制,以经济激励信号作为通信基础实施DR,实现整个电力系统供需动态平衡,同时降低建筑物的用电量和用电高峰。TC方法不是直接的命令控制,而是

基于价值进行决策,这种决策类似于经济交易。TC的核心思想是结合市场和控制两种机制,将区域内较高级别的动态市场交易和较低级别的控制结合起来^[11]。此种策略通过电网和终端用户双向通信交换电价和用电量,所以需要健全的通信设施来传递信息。

如图1所示,基于TC的空调DR利用市场机制、价格手段,将底端的空调末端需求与顶端电网电价联系起来;利用需求投标和市场清算,实现供需动态平衡。在传统的空调系统控制中,室内温度和室内温度设定值是控制房间制热和制冷所需的唯一信息。在TC系统中,温控器使用市场信息(包括投标和清算价格)^[12]做出控制决策,因此空调负荷将随着电价的变化而变化。在TC环境下,空调用户作为电力消费者将参与到电力市场竞价中,根据用户行为偏好进行投标,依据实时电价的波动趋势决定空调用电量,让空调用电量符合市场规律。

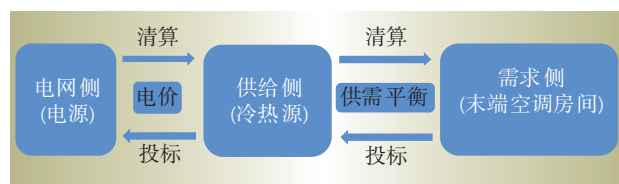


图1 基于交易控制的空调负荷需求响应

Fig. 1 Response demand for air-conditioning load based on transactive control

TC根据社会福利(social welfare, SW)最大化的原则对空调系统进行控制。总用电收益与总用电成本之差构成SW。SW最大化问题可转化为各用电用户追求自身利益最大,同时各发电商发电成本最小的问题。利用市场机制对空调系统DR进行协调控制的实质是在供需平衡的前提下实现能源资源的最优配置和SW的最大化。

1.3 交易市场结构

空调系统TC市场基于微观经济学理论,通过适当的市场规则构建。这个市场既可以是真实存在的,也可以是虚拟设计的。若是真实存在的市场则清算价格即为能源成交价格;相反,虚拟设计的市场不代表真正的金融交易能源市场,此时清算价格仅作为一种控制信号,并不具有实际货币意义。不同的空调系统项目根据其特性设计的市场结构应有所差异,灵活的TC市场既是TC策略的优势,又是TC策略的重点和难点。

TC策略控制空调负荷,既允许以负荷集成商的形式,又允许以单一主体的形式直接参与电力市场交易。单户居民的空调负荷和耗电量均较小,空调负荷集成商(代理商)应用TC策略集成分散而数目

庞大的居民空调负荷参与电力市场交易。相反,中央空调系统一般应用在建筑体量庞大、空调负荷较大的商业建筑或办公建筑。因此商业建筑或办公建筑的中央空调系统作为单一主体通过在TC控制器中编程TC策略算法参与市场竞价。文献[13]设计了空调负荷代理商参与TC的市场结构,文献[14]提出了HVAC系统参与TC的市场结构。

1.4 交易控制优势

TC应用到空调DR中有以下优势:基于TC的DR可预测性和可靠性很强;TC的信息交换十分简单,仅需在电力负荷和用电用户之间交换电价和所需耗电量,因此可以保护用户的隐私、尊重个人偏好^[15];在DR时段,TC策略能有效调控空调系统的负荷,同时对建筑物的舒适性影响很小^[16];TC采用的市场概念(例如,商品和价格)是大多数人熟悉的,因此容易被用户和运营商所接受;基于市场的控制是分布式和可扩展的,适合于大规模应用;TC可以在现有的建筑自动化系统或智能电能表和能源管理控制系统(energy management control system, EMCS)中实施,因此仅需较少的额外费用支出就可实现TC策略;TC可以减少空调系统的用电量;另外TC通过与电力市场直接交易使用户获得低廉的电能,最终降低用户的空调运行成本。综上所述,基于TC的DR具有其独特的优势。

2 交易控制过程

基于TC的空调DR策略的实施过程是在每个市场清算周期内进行如图2所示的投标、清算、调整过程(以夏季制冷为例)。

- ① 投标:空调的温控器获取当前空调用户的信息(T_{cur} 、 T_{des}),然后将其转化为投标电价 P_{bid} 或需求曲线(如图2(a))。
- ② 清算:TC控制器或代理商汇总所有用户的 P_{bid} 或汇总所有需求曲线构建总需求曲线(如图2(b))并提交给电力市场,同时电网提交供给曲线给电力市场(如图2

(c))。然后,电力市场依据SW最大化的原则进行市场清算并得到 P_{clear} 和清算电量 q_{clear} (如图2(d))。

- ③ 调整室内温度设定点:TC控制器由 P_{clear} 计算得 T_{set} (如图2(e)),随之通过温控器调整 T_{set} 。每个市场清算周期内重复一次以上的3个步骤,直至空调运行结束。市场清算周期可为5 min或15 min。

2.1 投标策略

对于空调系统,一般将投标电价 P_{bid} 设为电价、温度值以及用户设定参数的函数,如式(1)所示

$$P_{bid} = P_{mean} + \sigma \times f(T_{cur}, T_{des}, T_{max}, T_{min}, \kappa) \quad (1)$$

式中: P_{mean} 、 σ 分别为平均电价和电价的标准差; T_{cur} 为当前的室内温度; T_{des} 为所需的室内温度; T_{min} 、 T_{max} 分别为室内最小和最大温度设定点; κ 为用户设定的舒适系数。

制冷工况下,文献[17]—文献[19]中设计的 P_{bid} 表达式如式(2)所示

$$P_{bid} = P_{mean} + (T_{cur} - T_{des}) \frac{\kappa \cdot \sigma}{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

空调用户依据式(2)计算 P_{bid} 后,TC控制器汇总所有用户的 P_{bid} 构建总需求曲线。除了计算投标价格 P_{bid} ,TC策略也允许空调用户自己制定如图2(e)所示的投标曲线来确定 P_{bid} ,该曲线从功能上将空调运行成本与舒适度联系起来。文献[4]中 P_{bid} 是根据投标曲线斜率以及 T_{cur} 与 T_{set} 之差确定的。

通过TC策略,空调用户可以依据自己的偏好进行舒适性设置,包括设置 T_{des} 、可接受的室内温度范围 $[T_{min}, T_{max}]$ 和 κ ,而这些设置最终都反映在市场投标价格 P_{bid} 的计算中。文献[20]通过设计空调系统智能温控器接口来实现舒适性设置。另外, T_{min} 和 T_{max} 可避免室内温度偏离舒适范围,最大限度地减少对舒适性的影响。 κ 作为用户指定的权衡参数,可平衡能源效率和舒适度^[21]。

2.2 市场清算

在交易系统中,市场清算以买卖双方的投标报价为基础,是一个典型的双边投标市场。当需求量

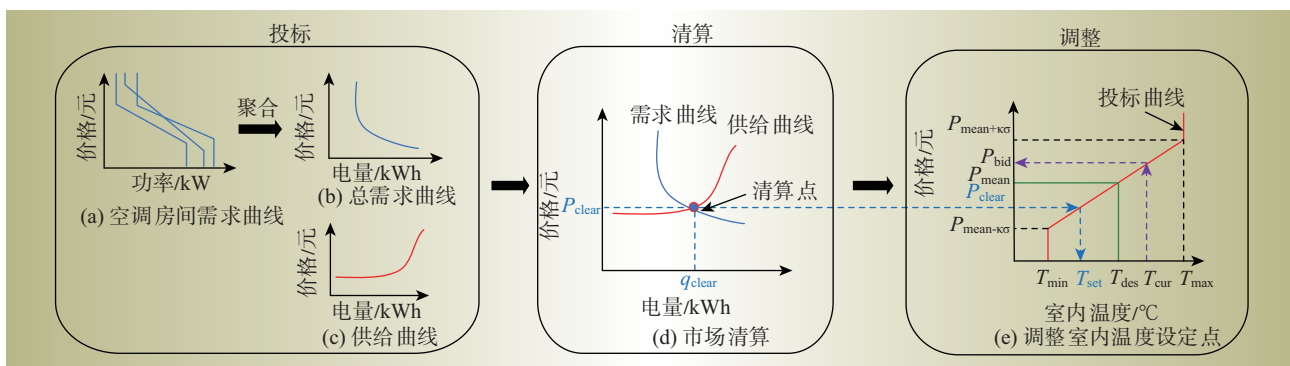


图2 基于交易控制的空调负荷需求响应过程

Fig. 2 Response demand process of air-conditioning load based on transactive control

等于供给量时的电价被称为市场清算价格 P_{clear} ^[16]。市场在需求曲线与供应曲线的交点处清算,交点决定了电力市场的 P_{clear} 和 q_{clear} ,交点处供需处于平衡状态,同时SW最大化。市场清算一般由独立系统操作员或其他独立的模块来完成,例如电力交易管理中心和调度系统。

2.3 计算室内温度设定点

市场清算结束后,空调系统将依据 P_{clear} 计算室内温度设定点 T_{set} ,且将当前温度设定值重置为调整后的设定值。实际上,TC中房间温度设定点的概念与传统控制有所区别,因为在TC中温控器的制热或制冷设定点会受到市场价格信号以及用户设定的舒适度影响,所以该设定点不是一个定值,而是在 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ 范围内不断变化。在制冷模式下,控制器将随着市场价格的上涨选择较高的制冷温度设定点。

制冷工况下,文献[4]、文献[17]和文献[18]中 T_{set} 表达式如式(3)所示

$$T_{\text{set}} = T_{\text{des}} + (P_{\text{clear}} - P_{\text{mean}}) \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{\kappa \cdot \sigma} \quad (3)$$

传统的空调系统使用 T_{cur} 和 T_{des} 来控制房间制热和制冷, T_{set} 表达式验证了在TC中温控器使用市场信息来做出控制决策。其中, T_{set} 可以高于或低于 T_{des} ,这取决于 P_{bid} 和 P_{clear} 的大小。在制冷模式下,将 T_{set} 降低到 T_{des} 以下相当于进行预冷。

综上,空调系统TC过程是TC控制器和空调系统基于 T_{cur} 将用户的制热或制冷需求 T_{des} 和对舒适或节约运行成本的偏好设置转换成为愿意出价购买下一个电力市场时间周期内的电价 P_{bid} ,一旦电力市场清算,清算的价格信号 P_{clear} 将转换为 T_{set} 的变化。

3 我国实施交易控制策略的建议

(1) TC符合DR的发展趋势,且应用潜力较大。随着“互联网+”智慧能源战略实施、电力体制改革以及智慧城市建设工作的不断推进,我国的DR呈现参与主体多元化、运行机制市场化、系统决策智能化和执行方式自动化趋势,基于TC的DR策略符合这些新的发展趋势。另外,TC技术不局限于空调系统,也可将其应用到其他家用电器,如热水器、洗衣机和电动汽车等。

(2) 研究TC技术要抓住侧重点,同时加强标准化体系建设。在TC技术中,投标和清算策略以及设计一个保证效率、透明度和竞争力的交易市场至关重要,是TC技术的研究重点。基于TC的DR需要标

准化TC控制器接口和通信协议,标准体系将有助于加速推广TC技术。

(3) TC的应用需要解决一些技术上的难题和研究上的不足。TC技术要求实时通信,但就目前通信和控制方面的技术水平而言,实现实时通信仍存在挑战。国外已开发了实时定价程序供以价格作为控制信号的基于TC的DR使用,而我国缺少这方面的研究。另外,市场价格低时导致需求反弹等一些研究上的不足亟待解决。

(4) 推广TC技术需要多方共同努力,可先开展试点项目。实现TC在我国DR中的推广应用,不仅需要科研人员对TC策略进一步深入研究,更需要政府提供支持、同时还需要技术供应商、监管机构和企业之间加强合作,大力宣传DR,强化企业和用户的节能意识以及用户侧资源的理念,引导用户积极主动地参与DR。可以考虑选择某些典型的商业建筑和居民小区开展TC试点项目。

(5) 在我国应用TC技术需要因地制宜。虽然国外学者已经为我国探索TC策略提供了可参考的理论和实验研究,但是我国空调DR发展现状与国外存在差别,因此需要结合我国实际的国情对TC技术进行创新性的研究和推广。

4 结束语

TC策略借鉴微观经济学思想,融合了经济效益和设备控制,以价格为协调手段,利用自下而上的用户投标报价和自上而下的市场清算机制,实现保证舒适度前提下的基于TC的空调DR。

本文系统性地介绍了TC在国外空调系统DR中的应用,重点阐述了TC的原理、结构和优势以及包括投标、清算和调整3个步骤的TC过程。对比我国开展空调系统DR的现状,参照国外基于TC的空调DR的成功实施经验总结了5条相关建议,可为我国开展空调系统DR提供新的思路和理论基础。

参考文献:

- [1] 燕智超,姚一鸣,谢开贵,等. 面向配电网可靠性的微电网最优需求响应策略[J]. 供用电, 2021, 38(7): 40-44.
YAN Zhichao, YAO Yiming, XIE Kaigui, et al. Optimal demand response strategy of microgrid for distribution network reliability [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(7): 40-44.
- [2] CORBIN C D, MAKHMALBAF A, HUANG S, et al.

- Transactive control of commercial building HVAC systems[R]. Richland WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2016.
- [3] RAMDASPALLI S, PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, et al. Transactive control for efficient operation of commercial buildings[C]//PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 9–12, 2016, Ljubljana, Slovenia: 1–5.
- [4] HAMMERSTROM D J, AMBROSIO R, CARLON T A, et al. Pacific northwest GridWise testbed demonstration projects; part I. Olympic Peninsula project [R]. Richland WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2008.
- [5] WIDERGREN S E, SUBBARAO K, FULLER J C, et al. AEP Ohio gridSMART demonstration project real-time pricing demonstration analysis [R]. Richland WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2014.
- [6] HAMMERSTRON D, JOHNSON D, KIKEBY C, et al. Pacific northwest smart grid demonstration project technology performance report volume 1: technology performance [R]. Richland WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2015.
- [7] WIJBENGA J P, MACDOUGALL P, KAMPHUIS R, et al. Multi-goal optimization in PowerMatching city: a smart living lab [C]//Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 12–15, 2014, Istanbul, Turkey: 1–5.
- [8] 季珉杰, 张沛超, 姚垚, 等. 采用基于市场控制的微网分布式能量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 34–41.
- JI Minjie, ZHANG Peichao, YAO Yao, et al. Distributed energy optimization method for microgrid using market-based control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 34–41.
- [9] 丁一, 胡怡霜, 崔文琪. 国外电力需求响应实践及启示[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(2): 1–4.
- DING Yi, HU Yishuang, CUI Wenqi, et al. Practices and enlightenment of foreign power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(2): 1–4.
- [10] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2–9, 189.
- DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2–9, 189.
- [11] KIANIBEJESTANI A, ANNASWAMY A, SAMAD T. A hierarchical transactive control architecture for renewables integration in smart grids: analytical modeling and stability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2 054–2 065.
- [12] MOHAMMAD N, RAHMAN A. Transactive control of industrial heating-ventilation-air-conditioning units in cold-storage warehouses for demand response [J]. Sustainable Energy Grids & Networks, 2019(18): 1–7.
- [13] 章三华, 胡业. 考虑用电行为偏好的空调负荷代理商市场报价策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(5): 16–19, 24.
- ZHANG Sanhua, HU ye. Bidding strategy for air-conditioning load aggregator considering consumers' behaviour preference [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5): 16–19, 24.
- [14] VIDYAMANI T, SWAMP K S. Analysis of active and transactive demand response strategies for smart residential buildings [C]//National Power Systems Conference, December 14, 2018, Tiruchirappalli, India: 1–5.
- [15] LIU Z X, WU Q W, MA K, et al. Two-sage optimal scheduling of electric vehicle charging based on transactive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2 948–2 958.
- [16] HAO H, CORBIN C D, KALSI K, et al. Transactive control of commercial buildings for demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 774–783.
- [17] FERNANDEZ E, JAMBORSALAMATI P, HOSSAIN M J, et al. A communication-enhanced price-based control scheme for HVAC systems [C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies Asia, December 4–7, 2017, Auckland, New Zealand: 1–6.
- [18] LIU Z, WU Q, HUANG S, et al. Transactive energy: a review of state of the art and implementation [C]//IEEE Manchester Powertech, June 18, 2017, Manchester, UK: 1–7.
- [19] CHASSIN D P, STOUSTRUP J, AGATHOKLIS P, et al. A new thermostat for real-time price demand response: cost, comfort and energy impacts of discrete-time control without deadband [J]. Applied Energy, 2015, 155(1): 816–825.
- [20] HUANG P, KALAGNANAM J R, NATARAJAN R, et al. Analytics and transactive control design for the Pacific northwest smart grid demonstration project [C]//International Conference on Smart Grid Communications, October 4–6, 2010, Gaithersburg MD, USA: 449–454.
- [21] MUKHERJEE M, MARINOVICI L, HARDY T, et al. Framework for large-scale implementation of wholesale-retail transactive control mechanism [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019(115): 1–12.

作者简介:

孟庆龙(1979),男,通信作者,河北邢台人,博士,副教授,研究方向为HVAC智能化和优化控制。

(责任编辑 殷荣吟 史倩芸)