



## Transactive Energy: an Effective Mechanism for Balancing Electric Energy System

Hu, Junjie; Wang, Kunyu; Ai, Xin; Han, Xue; Yang, Guangya; Yusheng, Xue

*Published in:*  
Proceedings of the CSEE

*Link to article, DOI:*  
[10.13334/j.0258-8013.pcsee.180537](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180537)

*Publication date:*  
2019

*Document Version*  
Peer reviewed version

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Hu, J., Wang, K., Ai, X., Han, X., Yang, G., & Yusheng, X. (2019). Transactive Energy: an Effective Mechanism for Balancing Electric Energy System. *Proceedings of the CSEE*, 29, 953-965. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180537>

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# 交互能源: 实现电力能源系统平衡的有效机制

胡俊杰<sup>1</sup>, 王坤宇<sup>1</sup>, 艾欣<sup>1</sup>, 韩雪<sup>2</sup>, 杨光亚<sup>3</sup>, 薛禹胜<sup>4</sup>

- (1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;  
2. 国家发改委能源研究所, 北京市 西城区 100038; 3. 丹麦技术大学, 丹麦 哥本哈根 DK2800;  
4. 国网电力科学研究院/南瑞集团公司, 江苏省 南京市 210003)

## Transactive Energy: an Effective Mechanism for **Balancing** Electric Energy System

HU Junjie<sup>1</sup>, WANG Kunyu<sup>1</sup>, AI Xin<sup>1</sup>, HAN Xue<sup>2</sup>, YANG Guangya<sup>3</sup>, XUE Yusheng<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing, 102206, China; 2. Energy Research Institute NDRC, Beijing 100038;  
3. Technical University of Denmark, Copenhagen, DK 2800, Denmark;  
4. State Grid Electric Power Research Institute/NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China)

**ABSTRACT:** Large-scales of distributed energy resources (DERs) including renewable generations such as wind and photovoltaic generation, electric vehicles will bring operational challenges to power system operation. On the transmission system level, the transmission system operator needs new balancing methods and balancing resources. On the distribution system level, the connected DERs may cause grid congestion problems. To accommodate more DERs in the system, especially at local level, the output of DERs should be coordinated to mitigate the problems. The coordination method needs to take the interests of various actors into account, thus, this paper reviews a promising coordination mechanism: transactive energy. In this paper, we will first introduce basic concepts and characteristics of transactive energy. Then, a review of existing research and demonstration projects in this area will be presented. In the end, we will describe the key technologies for transactive energy mechanism.

**KEY WORDS:** transactive energy, transactive energy mechanism, distributed dispatch, electricity market, prosumer, distributed energy resources, energy internet

**摘要:** 风电、光伏等间歇性可再生能源的大规模引入, 以及电动汽车、热泵等新型可控负荷的不断应用, 将给电力系统的安全运行带来很大的挑战。在传输网层面, 系统的功率平衡需要考虑新的调频资源和控制方法, 而在配电网层面, 分布式能源(包括可再生能源和新型负荷)的大量接

入会引起网络的拥塞、电压和其他电能质量问题。为了提高分布式能源的接入比例, 优化分布式能源就地利用率, 保证电网的安全运行, 系统需要控制和协调大规模分布式能源的有功或者无功出力。从控制策略上说, 单纯的以电网安全运行为目标的进行的集中式控制, 因忽视社会整体效益而很难奏效。为此, 本文将介绍一种兼具市场特性和控制功能的机制: 交互能源。首先对交互能源机制的基本概念和特征进行阐述, 其次, 对基于交互能源机制的示范项目及系统应用的发展概况进行总结, 最后, 提出了交互能源机制的若干关键支撑技术。

**关键词:** 交互能源, 交互能源机制, 分布式调度, 电力市场, 产消者, 分布式能源, 能源互联网

## 0 引言

加快推进可再生能源相关技术发展已成为国际社会推动能源转型, 促进减少温室气体排放, 应对全球气候变化的普遍共识和一致行动。而随着可再生能源并网容量的不断提高与传统火电机组在系统容量中占比的不断下降, 可再生能源发电的间歇性与波动性都为电力系统的安全稳定运行带来了巨大的挑战, 亟需探索新的手段来整合并调动各种类型的系统灵活性资源, 从而满足调频、调峰等各类运行需求。与此同时, 随着负荷密度较大地区分布式可再生能源项目以及电动汽车、热泵等新型负荷的大量接入, 区域能源互联网<sup>[1-2]</sup>、售电公司<sup>[3-5]</sup>、虚拟发电厂<sup>[6-8]</sup>等新型电网主体和商业模式的引入, 以及分布式发电市场化交易<sup>[9]</sup>的推进, 集中式大容量的电网调度和电源

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFB0900500); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2018MS012)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0900500); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018MS012).

控制将逐渐向着多级（电压等级、容量等级、可调配资源数量级）的控制模式转变<sup>[10]</sup>，而与之相匹配的电力市场的交易主体形式与交易规模也将发生相应的转变。

分布式可再生能源和新型负荷的接入可能使电力系统尤其配电网面临着以下挑战：

(1) 系统平均净负荷降低，且负荷侧各类新型电源有时向系统反送功率，甚至导致在午间出现逆向电流和末端电压升高的情况<sup>[11]</sup>；

(2) 新型负荷的接入使得负荷整体的波动性与不确定性增强，如电动汽车的无序充电更将使得系统负荷的峰谷差增大<sup>[12]</sup>；

(3) 早期配网规划未考虑到分布式电源以及电动汽车等新型负荷会出现如此迅速的发展，以至于尖峰负荷可能高于传统规划下的配网设备容量，造成系统局部拥塞<sup>[13]</sup>。

配网扩容可以一定程度解决以上这些问题，然而这又将面临着扩建周期长、成本较高及系统闲置率明显提高等问题。因此，本文考虑通过调动局域系统灵活性（Flexibility）的手段，实现更为高效地平抑波动并且带来电网利用率的提高。

从应用层面来看，局域系统灵活性的调用需要更加灵活的运行控制和市场机制作为支撑，其应可实现以下技术特征：1) 可灵活处理不同电压等级、不同容量、不同类型的系统运行问题；2) 可更好地控制不同类型的具有灵活性属性的电源、负荷、储能以及能源互联网中其他能源形式和电力转换的装置；3) 可进行有效的协调控制及市场交易中层间的充分衔接，进而可通过市场手段评估资源灵活性在不同环境和不同时段的价值或效用，实现更高效的资源配置。交互能源（Transactive energy, TE）即是一种具有市场和控制双重特性的机制，相较于集中式控制，其具有分布式控制系统拥有的优点，包括避免大规模的数据通信与繁重的计算需求；而相较于分散式控制，其仍保留市场的协调机制，从而可支撑实现群体性系统层级的运行目标。

本文将首先对交互能源的基本概念及其典型属性与工作原理等进行阐述，在此基础上介绍基于交互能源的示范项目及系统应用的发展概况，最后，对交互能源机制的若干关键支撑技术进行了归纳与提炼。需指出，针对交互能源的研究和

介绍方面，文献[14-15]从促进分布式发电交易的市场角度做了许多工作。而本文将在兼顾交互能源市场化功能的介绍同时，重点阐述其在电力系统调度中的作用。

## 1 基本概念和特征

### 1.1 基本概念

交互能源的概念<sup>1</sup>，目前较为认可的定义来自于GWAC（GridWise Architecture Council）<sup>[16]</sup>，其认为，交互能源是通过融合经济手段和电网控制手段，利用“价值”作为协调手段，以达到系统平衡的一种机制，且在最新的报告中GWAC进一步阐述了该机制的相关属性<sup>[16-20]</sup>。交互能源是一个不断发展和完善的机制，这点从GWAC近十年的报告中也可以看出，其发表的第一个报告中，交互能源机制的英文翻译为Transactive control（TC），但近一两年已慢慢统一为Transactive energy（TE）。本文认为TE和TC统属一个概念。从基本概念可观察到，交互能源机制不是一个新的概念，且已有部分国家或区域电力系统的能源交易与管理初步采用了TE方法，如北欧电力市场<sup>[21]</sup>的日前能源交易。尽管TE的概念并非全新的，但该机制在主动配电网、微网系统、智能建筑或智能家居系统以及大电网内新型调频手段等方面的应用仍然是一个研究热点，因此有必要对该机制进行总结和推广。

### 1.2 典型属性

交互能源机制的典型属性包括以下若干点：

1) 交互能源机制支撑下的系统（简称为交互能源系统）的交易主体（Transacting parties）要明确，电力系统中的交易主体一般包括传输系统操作者、配电系统操作者、售电商、集群管理员等，交易主体的确立方可保证相关的交易行为与附带服务的顺利实现；2) 交易的商品（Transacted commodities）和交易行为（Transaction），在交互能源系统中，交易的商品和交易行为必须被清晰的定义，例如，交易的商品可以是电力能源，亦或是相关的辅助服务、需求侧的灵活性等，而交易行为则要清晰地定义需交换的信息、达成一致

<sup>1</sup> Transactive Energy Definition: A system of economic and control mechanisms that allows the dynamic balance of supply and demand across the entire electrical infrastructure using value as a key operational parameter.

性的机制等；3) 交易主体之间对于信息理解的互操作性 (Interoperability)，亦即对于交易行为中的交互信息，交易主体双方或多方应理解其内容；4) 价格发现机制 (Value discovery mechanism)，交易主体之间对交易的商品价值应达成一致，其可通过价格、满意程度或者其他形式体现，但总体目标是形成一致的价值认知。

### 1.3 工作原理

GWAC 在其报告中仅提供了交互能源机制高层次的工作原则 (High-level principles)，而没有详细的原理或方案。高层次的工作原则包括以下六点：1) TE 系统需通过协调若干自主交易主体所负责的子系统实现运行功能；2) TE 系统在实现分布式能源优化接入时应保证系统的可靠性；3) TE 系统应无差别对待符合条件的参与主体；4) TE 系统中，各交互主体交互接口的信息应是可观测和可审计的；5) TE 系统的设计和运行应具有易扩展性与可适应性，亦即便于大规模分布式能源的随时接入；6) 交互的主体有责任以及能力保证其承诺的交易行为可实现。可以看出，六点工作原理比较抽象，在接下来的内容中，本文将通过一些示例对其进行详细的解释。

### 1.4 典型的实现方式和时间尺度

交互能源机制的应用时间尺度可涵盖从日前计划到实时控制。如前所述，交互能源机制依赖价值（一般通过价格来表现）来实现系统的运行目标。就实现系统能量或功率平衡场景而言，供给侧和需求侧的参与主体均需要根据自身的运行目标和状态制定效益函数或者成本函数，并以信息交互或竞价等方式达到系统的平衡。总结近 10 年的相关文献和示范项目，可得出具体的实现方式主要有两种：1) 单次信息交互方式<sup>[17,22]</sup>，即 TE 系统内交易主体提供其效益或者成本函数，运行约束条件等，随后 TE 系统管理员出清市场，得到对应的价格。该价格也可理解为参与者的控制信号，参与者根据价格以及其效益或成本函数，得到对应的功率；2) 多次信息交互方式<sup>[23-24]</sup>，即通过多次交换功率和价格的方式实现系统平衡，该方式中，TE 系统内参与者不提供具体的成本函数，仅提供功率，随后得到相应的反馈价格，通过多次信息交互，最终实现系统的平衡。目前，在近实时 (near real time，如每 5 分钟或 15 分钟)

能量管理的应用中，多采用单次信息交互方式，而日前计划则多采用多次信息交换方式。

### 1.5 传统电力市场以及调度方式与交互能源机制支撑的运行方式比较

交互能源机制支撑的电力系统参与方一般包括输电系统管理员、配电系统管理员、售电商、集群管理员、发电厂、用电用户与产消者等，而按照交易平台参与主体类型分类，可将其分为平台管理员与系统管理员（如配电系统管理员与输电系统管理员）、传输服务方（如输电网络所有者与配电网络所有者），中间商主体（如售电商、集群管理员）以及产用能主体（如发电厂、一般用电用户与产消者）。其中，由于中间商与产用能主体在参与能源交互过程中的角色皆与广义的“产消者”类似，区别仅在于是用电、发电亦或是双向皆可，因此，下文将以“产消者”指代所有包含发电或用电功能的主体。交互能源系统的交易平台需要为不同类型的参与主体提供功能与服务。

**表 1 传统电力市场与交互能源系统的交互主体比较**

**Tab.1 Comparison between transacting parties under traditional electricity market and transactive energy system**

交易内容	传统电力市场		交互能源系统	
	支出	收取	支出	收取
购电费	购电商	供电商	产消者	产消者
辅助服务费	调度中心	供电商	系统管理员	产消者
交易管理费	各参与主体	电力交易中心	各参与主体向平台管理员支付或无	
调度管理费	各参与主体	调度中心	各参与主体	系统管理员
网络服务费	网络使用方	传输服务方	网络使用方	传输服务方

表 1 针对传统市场机制<sup>[25]</sup>与交互能源机制下电力系统的不同交易内容所对应的交互主体进行了比较。与传统电力市场类似，交互能源机制的本质仍是为保证系统发电与用电之间的平衡。但随着光伏、储能等分布式电源技术的发展与成本的降低，以及电动汽车等新型负荷的接入，传统电力市场中的购电商（大用户、中小用户及其他购电主体）与供电商（发电企业）之间的界限愈加模糊，比如许多装设上述分布式电源或拥有电

动汽车的家庭用户或商业楼宇等产消者同时具备发电与用电双重属性，而且随着时段的不同，其外特性也可在两种表现形式之间反复切换。

从调度角度分析，传统的调度一般采用基于数据采集与监控系统的集中式控制方式，显然，当大量分布式电源接入电网后，传统的调度方式将难以适应，而交互能源机制因其实现方式的分布式控制特点具有较高的应用价值，具体来说，交互能源机制具有三点优势：1) 支持分布式控制，可用于协调大规模分布式能源在配/输电网的接入；2) 分布式控制同时计及了经济因素，可保证参与个体获得较高且公平的经济效益；3) 可使电网公司全权负责电网安全运行，降低电网公司运行难度的同时提高了用户产用能的自主性。

## 2 交互能源机制的发展概况

### 2.1 示范项目介绍

本节将介绍四个基于交互能源机制的示范项目：1) 美国能源部支持的 Olympic Peninsular Project<sup>[26]</sup>；2) GridSMART 项目<sup>[27]</sup>；3) 美国布鲁克林街区的 Transactive Grid 微网项目<sup>[28]</sup>；4) 荷兰的 Powermatching city 虚拟电厂项目<sup>[29-30]</sup>。

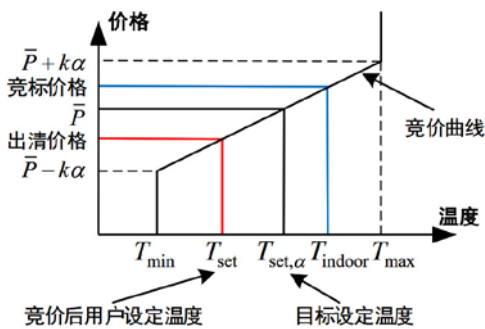


图 1 温控负荷竞价和响应曲线

Fig. 1 HVAC's bidding and responding curve

Olympic 项目<sup>[26]</sup>采用交互能源机制对楼宇暖通空调系统负荷进行控制。大型的楼宇一般会配置暖通空调自动化系统，该系统包括测量装置如温度、气流传感器以及气流调节风阀等。以房间制冷为例，传统的集中或分散式控制模式中用户对房间温度的需求会直接转化功率的重新设定，而在交互能源机制下，对于房间温度的需求将转化为一条竞价曲线，竞价曲线如图 1 所示。

图 1 竞价曲线设定了一个允许的温度范围  $[T_{\min}, T_{\max}]$ 、用户希望的温度设定值为  $T_{\text{set}}$ 、用户

可接受的用电价格为  $[\bar{P} - k\alpha, \bar{P} + k\alpha]$ 、 $\bar{P}$  为价格平均值（可根据历史某时段价格数据得到）。根据该竞价曲线，代表温控负荷的智能体首先根据房间的当前温度  $T_{\text{indoor}}$  和目的设定温度制定报价方案（即竞标价格和功率信息），将该信息提交至交互能源系统管理平台，平台管理者收集所有的报价方案后，给出出清价格并反馈给各智能体，智能体依据系统出清价格最终确定温度设定值为  $T_{\text{set}, \alpha}$ 。示范项目首先将楼宇分为几个不同的控制区域，每个区域有不同的竞价曲线，通过每 5 分钟的市场出清，得到楼宇中每个区域的温度设定值。上述工作皆可通过自动化设备完成。项目在总结时提出，交互能源机制可很好地实现系统设置的控制目标，同时亦可保证楼宇的温度需求，但同时也提到由于缺乏标准的需求侧接口，在实际控制时遇到一些应用或兼容等困难。在配有楼宇自动化系统的智能楼宇中实施该技术所需的额外投资成本很小，但由于目前相当大比例的楼宇都没集成先进的自控系统，因此还需进一步分析实施交互能源机制所需要的总成本。

GridSMART RTP<sub>da</sub> (Real-Time Pricing-Double Auction, 实时电价-双向拍卖) 示范项目<sup>[27]</sup>始于 2011 年 12 月，终于 2013 年秋，其总体思路与 Olympic 项目有一些相似之处，但其主要针对对象为居民用户，通过双向拍卖机制，测试用户对于价格的响应，从而对通过价格手段实现调度目的的可行性进行实验。项目主要研究三部分内容：1) 测试交互能源机制对于系统运行情况的影响；2) 测试交互能源机制对于居民用户用电的影响；3) 分析居民负荷对于价格的敏感度。项目的实验结果表明：1) 若 35% 的居民用户响应实时价格，尖峰负荷可降低约 5%；2) 交互能源机制下用户动态支付电价，较于一般标准的均一价格下，用户的用电量有轻微的增加，但用电成本减少了约 5%；3) 通过进行大量的 5 分钟尺度实验数据分析，可以发现用电价格和用电量之间呈较明显的负线性关系。

Transactive Grid 微网试点项目<sup>[28]</sup>位于纽约布鲁克林区总统街道，街道一边有五户家庭拥有光伏发电，另一边的五户家庭可以购买对面家庭富余的电力。该项目通过区块链技术实现交互能源机制，促进邻近街区的分布式能源的就地消化，



减少能源传输损耗的同时为用户提供了更好的经济效益。此外,区块链技术支持的 TransactiveGrid 项目率先建立了分布式能源的交易体系,几乎无需专门人员参与即可实现交易的记录与管理。区块链技术使得交易网络中的各节点都平等保存一套完整历史数据库的副本,从而保证信息的安全和准确,且随着参与主体的增多,对交易链的攻击成本和信息篡改难度也将随之增加。

Powermatching city 示范项目<sup>[29-30]</sup>位于荷兰的格罗宁根市(Groningen),是欧盟境内第一个有较多用户参与的智能配电网项目。参与用户发电侧配有光伏、微型热电联产系统,负荷侧配有电动汽车、热泵、储能等灵活性资源。该项目采用 TNO 开发的用于支撑交互能源机制的 PowerMatcher 套件,可实现系统内部分布式资源的功率平衡。该项目的交互实现机制与 Olympic 项目类似,项目运行经验证明交互能源机制能够有效地促进分布式能源的接入和利用的灵活性,但同时项目也提出了新型机制电力市场对于用户侧负荷灵活性的充分利用的必要性。为保证该新型市场机制的顺利运行,项目总结出如下需深入探讨的问题:1)用户、能源供应者、电网公司等相关主体之间的利益分享问题;2)集群服务商的存在和作用;3)需求侧资源控制时所需的标准化接口等兼容性问题。

## 2.2 交互能源机制应用综述

除了示范项目之外,近年来还有一些学者针对交互能源机制在以下场景中的应用进行了相关研究:1)电力系统运行控制方案;2)电力系统频率的一次、二次、三次调整;3)配电系统侧网络拥塞控制;4)智能配电网中集群电动汽车的优化管理;5)大规模分布式能源参与日前能源市场的新型方法;6)功率平衡负责者(Balance responsible parties)的功率平衡策略。本节接下来将对上述应用进行详细介绍。

针对新型源荷比例增多给电力系统运行控制带来的挑战,文献[31]指出,交互能源机制可应用在电力系统的多个层级,包括:居民侧低压网络系统;中低压微电网系统;局域网络系统和区域网络系统。在居民侧低压网络系统中,通过交互能源机制,可实现能量之间的交易或者通过需求侧管理等技术实现用电成本的优化;在中低压

微电网系统中,交互能源机制可支撑配电系统管理者(Distribution System Operator, DSO)对工业用户、聚集居民用户或商业用户电力灵活性的调用;在局域或区域网络系统中,交互能源机制可支撑大宗电力能量的交易,并支撑传输系统管理者(Transmission System Operator, TSO)对传统发电厂、储能设施等的功率控制,从而以实现调频调峰等系统运行目标。

针对交互能源机制在系统调频的应用问题,文献[22]提出了基于交互能源机制的电动汽车和电热水器参与系统一次和二次调频的实现方法:代表电动汽车和电热水器的各设备 agent(Device agent)形成表征功率灵活性的效益函数并上传至上一层的聚集 agent(concentrator agent),随后系统上层的代表售电供应商的拍卖 agent(auctioneer agent)根据系统调频备用容量需求与中间代理提交的效益函数给出出清方案并返回至各设备 agent,从而实现各设备 agent 根据实时运行中系统频率的偏差和价格信号参与一次和二次调频。文献[23]针对系统频率的三次调整问题,以实现社会效益最大化为目标,提出了基于多次迭代(即多次信息交换方式)的区域间能源交互方案制定方法。

交互能源机制在配电网拥塞控制中也有较多应用,文献[24]针对配电网中多个电动汽车集群管理员单独优化引发的网络拥塞问题,采用价格手段对各集群管理员的充电方案进行交互引导,实现电动汽车充电成本的优化与电网的安全运行。文献[32]提供了一个具体的阻塞交互调度示例,该示例中,一个电动汽车要求 2 小时内充电 7.8kWh,该用电需求首先提交至电网中心的需求侧管理平台,随后管理平台根据低压网络的变压器和线路容量以及其他有功负荷需求,返回具体的用电指导方案。文献[33-35]基于交互能源机制对网络拥塞约束下集群温控负荷的最优功率控制问题进行了研究。文献[33-34]设计了一种可有效促使各温控负荷智能体合理竞价(包括价格与对应的功率方案)的机制,该机制属于主导型策略形成的均衡,与纳什均衡相比,其无需电网公司和智能体之间进行多次迭代,因而更适用于实时优化。文献[35]的主要贡献则在于建立了详细的温控负荷模型,并提出了交互能源机制下温控负

荷参与系统运行方法。

随着配电系统侧电动汽车渗透率的逐步提高,考虑到电动汽车的出行和归来时间的集中性,若不对电动汽车的充电加以合理引导,则有可能加重电网的峰谷差。为此,文献[36]通过多次的信息(系统的基本功率和充电功率信息)交互引导大规模电动汽车在谷时间段充电,减少峰谷不平衡。在信息的交互过程中,首先电网公司向各电动汽车 agent 广播当前系统的基准功率,接下来各电动汽车 agent 根据该基准功率信息、充电价格信息和自身的充电需求制定充电方案并向电网公司反馈,重复此过程直至所有的电动汽车 agent 不再改变其充电方案,即趋于收敛。文献[37-38]则进一步验证了即使在不实行信息同步交换的基础上,电网公司和电动汽车之间仍可达成功率方案制定的一致。

大规模分布式能源的接入,导致许多新型的电网组织模式的形成,如虚拟发电厂、微电网与集群售电商等,这些新型组织一般具有功率较低、灵活性强等特点,文献[39-40]提出了拥有灵活性资源的新型分布式资源集群组织参与电力日前市场的方法,通过价格与功率信息的多次交互,实现日前市场高比例分布式能源的平衡;文献构建了含电动汽车和热泵的系统算例并进行了仿真分析,验证了交互能源机制支撑下的市场的有效性。

除此之外,交互能源机制亦可应用于大型功率平衡负责者消除功率不平衡的场景。电力市场环境,功率平衡负责者需在日前市场代表若干零售商购买电能用于消除实时阶段实际用电与购买电量的差额。文献[41-42]基于交互能源机制提出了实时功率差额的消除方法,该方法根据日前购买功率及电动汽车灵活性函数,动态制定价格从而引导电动汽车充电行为,最终实现功率平衡负责者的运行期望。

### 3 支撑交互能源机制的关键技术

#### 3.1 交互能源机制运行方式与系统框架

交互能源机制中的大多功能,如交易过程的实施、交易费用的计算、结算的校核以及资金的支付等,皆可通过系统交易平台实现,本文将交易平台的主体称为平台管理员。平台管理员与系统管理员之间存在若干功能上的交叉,如平台上

交易的发布需经过调度系统中的安全校核方可正式确立,否则需重新返回到交易平台上进行交易。交互能源机制根据交易与调度的实现方式可分为弱中心式与去中心式两种运行方式。

#### 3.1.1 分布式调度支持的弱中心式交互能源机制

图2为弱中心化交互能源机制支撑系统示意图。一个交互能源平台作为若干产消者、配电公司以及电力能源市场、辅助能源市场的信息中转站,提供信息传递服务,包括电价信息、计划功率方案等,将几个相关主体以弱中心化的模式联系在一起,使其既相互关联,保证电网经济、安全、稳定的运行,同时各自进行自主决策,从而避免一方或者几方的决策大幅影响全局。

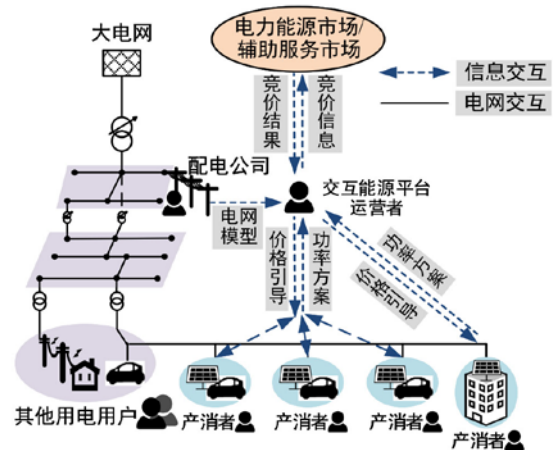


图2 弱中心化交互能源机制支撑系统示意图

Fig. 2 A schematic of transactive energy supported power systems with center-coordinated feature

一个弱中心的交互能源交易平台对应需要包括成员管理、合同管理、交易管理以及结算系统等诸多软件模块,各个子模块对应的服务器、路由器等网络设备,以及各参与主体侧配置的管理系统与运行服务器等。与传统调度类似,弱中心的系统管理员亦需为系统的调度运行支出调度管理系统的日常运行、维护与升级、能量管理系统设备投资与维护以及调度中心建筑物使用成本等费用。为此,系统的各参与主体需向平台管理员与系统管理员支付交易平台与调度系统的投资、维护、升级费用。而且如1.4与1.5小节中所述,交互能源系统可实现自下而上的分布式控制,产消者主体自行决定运行方案,从而弱化了电网公司等传统调度机构的调度功能,并保护了底层用户的用电隐私,使调度机构专责系统安全校核与

EMS 设备维修维护等工作。弱中心的交互能源系统交易及调度管理费的制定方法可参考传统电力市场<sup>[43-45]</sup>。

根据交互能源机制的运行期望,产消者应具有其内部各类单元的所有权与控制权,若采用集中式模型对各主体进行能量管理,考虑集中式平台管理者利己行为的可能性,则难免将对产消者产用电的隐私权以及获利的公平性造成损害。目前已有一些学者针对微网群、主动配电网等形式的多主体系统分布式调度进行研究。文献<sup>[46]</sup>基于一致性算法理论,将主动配电网各自治节点发电增量成本描述为一致性变量,通过改进的一致性算法进行迭代最终实现区域自治最优调度。文献<sup>[47-49]</sup>基于拉格朗日松弛法,利用拉格朗日乘子向量(可解释为影子价格)引导各参与主体进行优化调度决策,通过管理者与各主体之间的迭代,最终实现将传统集中式管理分解为管理者与各产消者可相对独立进行的子问题。以上方法皆可以适用到系统管理员与参与主体之间的分层迭代式协同运行中,此外,为保证交互能源系统能量管理模型求解算法的快速、稳定的求解性能,关于优化调度目标函数的凸化方法与迭代算子的优化选取方法等问题也值得深入研究。

### 3.1.2 区块链技术支持的去中心化交互能源机制

随着区块链技术的兴起,针对其在电力系统应用中的一些探索性研究为交互能源系统的实施提出了一种新的方向<sup>[50-53]</sup>。图 3 为去中心化交互能源机制支撑系统示意图,产消者之间进行自发的能量的交易,区块链技术支撑的交互能源平台仅作为连接各产消者及配电公司的桥梁,从而在弱中心分布式系统基础上对平台的“调度”功能进行了进一步弱化。

基于区块链技术的交互能源机制可使电力系统在维持各功能正常工作的前提下实现去中心化运行,实现分布式多边交易,典型的表现形式为 peer-to-peer (P2P) 交易<sup>[54-56]</sup>。随着分布式可再生能源比例不断提高并得益于分布式能量管理手段与 ICT 等技术的飞速发展,P2P 交易模式因其可以充分体现以用户为中心的特征逐渐受到关注,采用区块链技术支持的去中心化交互能源机制亦可充分支撑 P2P 交易的实现。利用基于各类区块链开发平台所编写的智能合约,可涵盖交易

平台所需的成员、合同、交易以及结算等系统,直接运行于参与主体侧的运行服务器上<sup>[57]</sup>,一方面免去了弱中心式交易平台中心系统的布置,降低了运行成本,一方面提供了更加高效、快速的运行决策手段,同时还可保证交易的安全、透明与公平。与弱中心模式下类似,去中心的交互能源系统调度机构也无需对系统内各产消者主体进行调度,而是专责系统安全校核与能量管理系统设备维修维护等工作。

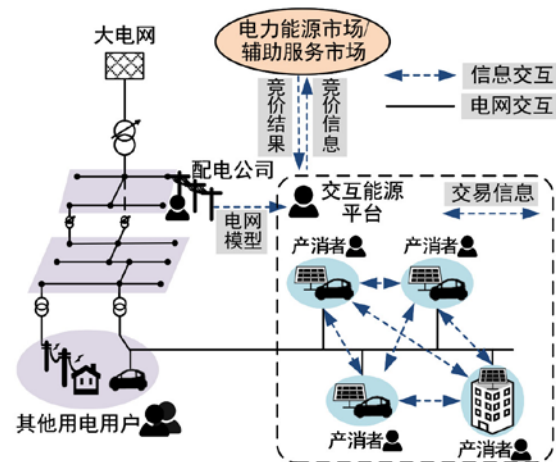


图 3 去中心化交互能源机制支撑系统示意图

### Fig. 3 A schematic of transactive energy supported power systems without center-coordinated feature

### 3.1.3 电改进程中交互能源机制设计与实现方法

考虑到电改进程中各阶段性特征以及交互能源机制应用的可行性,本文认为弱中心式的交互能源机制更为符合当前国内电力体制改革起步阶段的运行环境,并可作为将来去中心化交互能源机制运行的前序过渡阶段。针对弱中心式或去中心化交互能源机制的具体细节设计问题,可参考文献<sup>[58]</sup>提出的经济机制设计理论<sup>[59]</sup>在电力市场竞争机制设计中的应用,根据电力交易机制改革进程中不同阶段的运行特点,基于经济机制设计理论,结合机制评价问题中的资源有效配置、信息有效性和激励相容三个要求,考虑提供产消者获取决策所需信息的能力和精确性及信息获取的成本控制,设计出可满足交易透明、电能共享并保障系统运行效率的交互能源机制。

### 3.2 交互能源机制下产消者通用建模技术



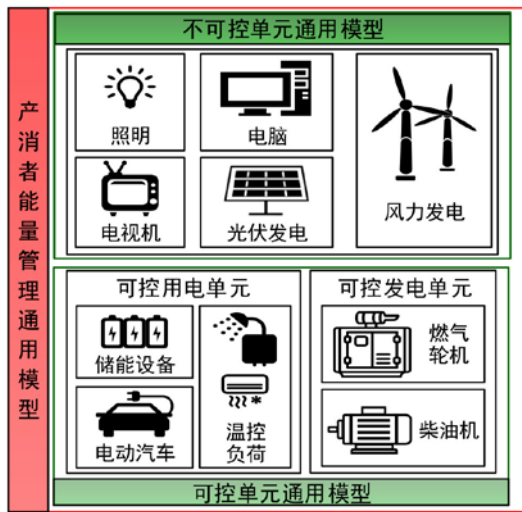


图4 产消者能量管理通用模型

Fig. 4 Generalized energy management model of prosumers

随着系统参与单元规模的逐渐扩大, DSO 或 aggregator 等系统管理员在多主体协调调度方案的决策过程中将可能面临求解的“维数灾”问题。文献[60]指出, 当参与主体规模达到一定程度时, 常规计算性能的设备已无法对典型集中式调度模型进行成功求解。因此, 若可对多个具有相似运行特性的单元, 在抽象出调度建模采用的数学表达形式后, 根据需求进行聚合, 从而形成等价或近似的单个聚合通用模型以表征群体的运行特性, 则可有效地减少决策变量维数。另一方面, 从信息角度而言, 与传统集中式调度过程的全部调度信息(例如, 对于温控负荷或电动汽车负荷而言, 调度信息可能包含个人家庭用能或出行隐私)交互过程相比, 多个参与单元形成“聚合”的通用模型也是对信息进行加工打包的过程, 而且最后可实现: 在调度者了解成员整体产用能灵活性的同时, 单独个体成员的具体隐私信息保持未知状态。因此, 总的来说, 交互能源机制的一个特点即是可通过弱中心或去中心的分布式调度模式实现最小化管理侧的数据采集和通信需求, 而考虑到产消者以个体参与交互的运行模式, 有必要研究产消者能量管理通用模型建立问题, 使参与主体可在对外保持其运行特性的近似等效的同时呈现一种简明直观的外特性。

文献[61-65]采用“虚拟储能”或“通用电池模型”的形式对以空调为代表的温控负荷灵活性

进行聚合, 文献[66]则将聚合范围扩展至冷热电联供楼宇。本文建议将产消者构成单元按照可控性分为不可控单元、可控发电单元和可控用电单元, 如图4所示。需指出, 本文在归类可控/不可控、发电/用电单元时, 采用了普遍的分类方式。然而目前已有相关研究和实践指出, 通过合理的预测和设置, 可对风电与光伏发电进行功率控制, 例如, 风力发电机的出力并非设定为最大值, 而是保留一定的裕度, 此种情境下, 可将其视为具备一定可控性的单元。类似地, 对于照明单元, 亦可通过调压的方式实现对其功率的控制。但相比于燃气轮机、柴油机等典型单元, 上述新型控制方式对应的单元功率可控性还存在一定的差距。结合不同模型的适用范围(拟合精度与求解效率), 本文考虑产消者通用模型可能有如下三种形式:

1) 适用于不可控单元、可控发电单元以及可控用电单元的通用模型。考虑到产消者内各单元运行差异较大, 可能难以建立适用于所有主体的统一模型, 或对产消者内不同单元建立统一模型存在难以克服的技术障碍, 则分别用一套标准参数对各自所包含的单元进行统一量化;

2) 适用于不可控单元以及可控单元的通用模型。考虑到产消者内可控单元与不可控单元的差异性对误差的影响不可忽视, 同时保证产消者模型应用于多节点网络优于1)的求解效率, 因而对其建立两种类型的通用模型分别对其参与调度的能力进行量化;

3) 适用于产消者内所有单元的产消者能量管理通用模型。克服了产消者内所有单元之间的差异性或在忽略精度影响情况下减少变量维数以提高计算效率, 建立用统一的参数形式表达的产消者能量管理通用模型。

目前已有文献主要集中在可控用电单元中的温控负荷方面, 因此有必要针对适用于各类可控或不可控单元构成的产消者能量管理通用模型进行更为深入的研究。

### 3.3 交互能源机制下网络精确建模技术

在系统运行计划制定过程中, 交互能源机制主要体现为交互能源平台运营者和各产消者之间(弱中心式)或产消者与产消者之间(去中心式)通过单次或多次的功率信息和价格信息交换的方

式最终实现系统平衡,而为了保证多主体参与下的系统经济性与公平性,优化调度过程中需综合考虑线路阻塞、电压质量等问题协调各产消者的出力,为此有必要研究综合考虑安全运行约束与精细化潮流约束的交互能源系统潮流模型。

然而,传统的电网交流潮流模型是一个强非凸非线性问题,用于求解的启发式算法和智能算法在全局最优性和求解速度上无法满足交互能源机制的分层迭代与解耦算法的需要,同时非凸模型的形式不符合分布式算法的要求,亦难以保证迭代过程的收敛性,因此有必要将上述潮流模型凸化为一个符合分布式算法要求并有快速有效求解方法的凸模型。

配电网自身有独特的网络特性,如线路电阻/电抗比值较大以及辐射性约束等,难以通过传统或者改进的直流潮流对配电网潮流进行凸化,因此目前对配电网潮流模型凸化的研究主要集中在交流潮流改进方面。现阶段存在多种潮流计算凸化方式,各来自于不同的数学过程(线性化松弛<sup>[67]</sup>,半定松弛<sup>[68-69]</sup>与二阶锥松弛<sup>[70-72]</sup>,基于矩的松弛<sup>[73-74]</sup>),其精确化条件各不相同(是否需满足目标函数的凸凹性、节点电压/注入功率上下限、支路功率流向等),分别适应于不同特点的网络(辐射型网络或含环网等)。因此,有必要综合考虑计算量、问题复杂度以及精确性要求等多方面因素,比较已有各潮流计算模型的优势及限制条件,研究将不同潮流计算模型进行相互融合或者对某种潮流计算模型进行补充改进形成新的潮流计算模型,为适应交互能源机制具体运行特点与运行要求最终提出合适的凸化手段。

### 3.4 交互能源机制下系统传输服务问题

与传统电力市场类似,交互能源机制下系统的产消者主体仍需向输电网络与配电网络所有者等传输服务方通过交易平台支付对应的输变电固定设备的使用费。类似地,接网服务费与实际的交互电能与电量无关,可采用较长计费周期固定收取。系统中分散存在着具有用电与发电特性的产消者主体,且随着系统规模的扩大,网架结构也较难满足辐射网形式。此外,配电网络中,尤其是低压配电网中易出现的三相不平衡特性,使得传统的公共网络服务价格制定方法<sup>[75-76]</sup>愈发难以满足交互能源机制对于网络服务费用公摊的公

平、透明与可行性的要求。为此,有必要继续研究适合于交互能源机制的多边交易与多向潮流特性的潮流追踪与网损分摊技术。

### 3.5 信息通信技术与分布式能源通信控制接口标准化

由于交互能源机制涉及到参与主体之间的信息交互(多次信息交互或者单次信息交互),因而交互能源机制的实现需要信息通信技术支持。通信对于交互能源机制的影响主要体现在两个方面:延时和数据包丢失。相关文献已经指出,延时可能造成系统的不稳定,而数据的丢失可能会影响系统的控制效果<sup>[77]</sup>。除此之外,为了保证发送的信息可以被分布式能源控制系统理解,亦需对分布式能源通信控制接口进行标准化,关于此方面目前已经有若干代表性的工作:1) openADR 协议(开放的需求侧响应协议)<sup>[78]</sup>, openADR 协议致力于需求侧管理的标准化,使得电力公司可以控制多形态需求侧负荷,典型的应用包括向需求侧资源来发送信息或控制信号从而停止其用电行为, openADR 协议由美国劳伦斯伯克利实验室开发,如今由 openADR 联盟负责推广运行;2) USEF (Universal smart energy framework, 智慧能源通用性框架)体系<sup>[79]</sup>, Usef 致力于向灵活性资源提供一体化的市场参与平台,规范灵活性参与市场的竞价方式,制定市场的运行规则和出清方案,该框架较为符合交互能源机制的需求, USEF 目前由 USEF 基金会负责运行,公司位于荷兰;3) EF-PI (能量灵活性平台)软件平台<sup>[80]</sup>, EF-PI 软件平台可使电网公司更容易地连接智能家居等负荷管理平台,而用户也可通过 EF-PI 提供的驱动来实现灵活性资源的方便接入, EF-PI 可运行于小型计算机平台上,如树莓派 (Raspberry Pi)。

### 3.6 信息物理融合的信息安全与实时控制技术

交互能源机制在运行中充分体现了信息和电气等物理层面的融合,因此基于信息物理融合的信息安全与实时控制是实现交互能源机制应用的关键技术之一。信息安全方面的研究主要是解决在高混杂即包含连续与离散两方面、大规模、协同自治的系统环境下信息的安全收集、处理、共享及评估等问题<sup>[81-83]</sup>。而实时控制方面主要集中在松散耦合、开放互联的网络化系统结构下的安全控制等问题<sup>[84]</sup>,如通过容错控制、鲁棒控制等

方式实现。如何将信息物理融合系统的相关理论成果与交互能源机制支撑应用下的系统结合起来,是值得深入研究的关键问题之一。

## 4 结论

本文详细介绍了交互能源机制的基本概念、工作原理、典型属性、实现方式和近十年的相关科研文献以及示范项目,并提出了支撑交互能源机制实现的若干关键技术。可以看到,交互能源机制的成功应用需要新型市场平台和网络信息技术的支撑以及先进的分布式计算、数据技术和优化控制等功能性模块的投入,上述需求可通过能源互联网相关技术实现,交互能源机制亦可作为实现能源互联网的一个良好的机制补充。

通过总结,可以得出交互能源机制具有分布式调度与控制、赋予参与主体经济效益等优点,因而在智能电网领域有非常良好的应用前景,比如目前电改环境下倡导的配售分离运行模式和分布式发电交易市场等场景。此外,交互能源机制在综合能源系统如电、气、交通网络联合优化的管理与运行,配电网区域用户侧综合能源系统的优化并网等问题上也可发挥重要的作用。

## 参考文献

- [1] 严艺芬, 吴文宣, 张逸, 等. 考虑区域能源供应商利益的主动配电网间歇性分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 752-758.  
Yan Yifen, Wu Wenxuan, Zhang Yi, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation in active distribution network considering benefit of regional energy supplier. Power System Technology, 2017, 41(3): 752-758(in Chinese).
- [2] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.  
Xu Xiandong, Jia Hongjie, Jin Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642(in Chinese).
- [3] 任艺, 周明, 李庚银. 考虑用户需求响应的售电公司购售电决策双层模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 30-36.  
Ren Yi, Zhou Ming, Li Gengyin. Bi-level model of electricity procurement and sale strategies for electricity retailers considering users' demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 30-36(in Chinese).
- [4] 顾伟, 任佳依, 高君, 等. 含分布式电源和可调负荷的售电公司优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 37-44.  
Gu Wei, Ren Jiayi, Gao Jun, et al. Optimal dispatching model of electricity retailers considering distributed generator and adjustable load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 37-44(in Chinese).
- [5] 张晨, 韩新阳, 白翠粉, 等. 基于合作博弈的电力市场模式下售电购电策略模型[J]. 中国电力, 2017, 50(6): 177-184.  
Zhang Chen, Han Xinyang, Bai Cuifen, et al. Optimal dispatching model of electricity retailers considering distributed generator and adjustable load[J]. Electric Power, 2017, 50(6): 177-184(in Chinese).
- [6] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.  
Liu Jizhen, Li Mingyang, Fang Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111(in Chinese).
- [7] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 含虚拟发电厂的电力系统优化运行与竞价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6351-6362.  
Ai Xin, Zhou Shupeng, Zhao Yuequn. Research on optimal operation and bidding strategy of power system with virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6351-6362(in Chinese).
- [8] 夏榆杭, 刘俊勇, 冯超, 等. 计及需求响应的虚拟发电厂优化调度模型[J]. 电网技术, 2016, 40(06): 1666-1674.  
Xia Yuhang, Liu Junyong, Feng Chao, et al. Optimal scheduling model of virtual power plant considering demand response[J]. Power System Technology, 2016: 1666-1674(in Chinese).
- [9] 国家能源局, 国家发展改革委. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. [2017-10-31]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm)  
NEA, NDRC. Notice on launching a pilot scheme to trade distributed electric power generation[EB/OL]. [2017-10-31]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm)(in Chinese)
- [10] Han X, Heussen K, Gehrke O, et al. Taxonomy for evaluation of distributed control strategies for distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, PP(99): 1.
- [11] Denholm P, Connell M O, Brinkman G, et al. Overgeneration from solar energy in California: a



- field guide to the duck chart[EB/OL]. [2015-11]. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65023.pdf>.
- [12] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(03): 140-148.  
Ma Lingling, Yang Jun, Fu Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [13] Hu J, You S, Lind M, et al. Coordinated charging of electric vehicles for congestion prevention in the distribution grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 703-711.
- [14] Chen S, Liu C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [15] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统: 体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, (03): 1-7.  
Chen Qixin, Wang Kedao, Chen Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture, mechanism design and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, (03): 1-7(in Chinese).
- [16] The G A C. GridWise transactive energy framework version 1.0[EB/OL]. [2015-1]. [http://www.gridwiseac.org/pdfs/te\\_framework\\_report\\_pnnl-22946.pdf](http://www.gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf).
- [17] Kok J K, Warmer C J, Kamphuis I G. PowerMatcher: multiagent control in the electricity infrastructure[C]. Proceedings of the 4th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. ACM, 2005: 75-82.
- [18] Subbarao K, Fuller J C, Kalsi K, et al. Transactive control and coordination of distributed assets for ancillary services[R]. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (EMSL), 2013.
- [19] Katipamula S, Chassin D P, Hatley D D, et al. Transactive controls: A market-based gridwise controls for building systems PNNL-15921[J]. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 2006.
- [20] Atamturk N, Zafar M. Transactive energy: a surreal vision or a necessary and feasible solution to grid problems[J]. California Public Utilities Commission Policy & Planning Division, 2014.
- [21] Kok K, Widergren S. A society of devices: integrating intelligent distributed resources with transactive energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 34-45.
- [22] Weckx S, D'Hulst R, Driesen J, et al. Primary and secondary frequency support by a multi-agent demand control system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1394-1404.
- [23] Kiani Bejestani 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): 2054-2065.
- [24] Hu J, Yang G, Bindner H W, et al. Application of network-constrained transactive control to electric vehicle charging for secure grid operation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 505-515.
- [25] 张粒子, 郑华, 程瑜. 区域电力市场电价机制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 214-224.  
Zhang Lizi, Zheng Hua, Cheng Yu. Regional electricity market price mechanism[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 214-224(in Chinese).
- [26] Pacific N N L. Pacific Northwest GridWise™ testbed demonstration projects part I - Olympic Peninsula Project [EB/OL]. [2007-09]. [https://www.smartgrid.gov/files/Pacific\\_Northwest\\_GridWise\\_Testbed\\_Demonstration\\_Projects\\_Pa\\_200702.pdf](https://www.smartgrid.gov/files/Pacific_Northwest_GridWise_Testbed_Demonstration_Projects_Pa_200702.pdf).
- [27] Pacific N N L. AEP Ohio gridSMART demonstration project real-time pricing demonstration analysis [EB/OL].[2014-02].[https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-23192.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-23192.pdf).
- [28] EXERGY. Electric power technical whitepaper: building a robust value mechanism to facilitate transactive energy [EB/OL]. [2017-12-14]. <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2017/12/Exergy-Wwhitepaper-v8.pdf>.
- [29] PowerMatching C. Living and doing business in the energy world of tomorrow [EB/OL]. [2015-04]. [http://www.powermatchingcity.nl/data/docs/PowerMatching%20City\\_brochure\\_final\\_UK\\_29-04-2015\\_lowres.pdf](http://www.powermatchingcity.nl/data/docs/PowerMatching%20City_brochure_final_UK_29-04-2015_lowres.pdf).
- [30] Kok K, Roossien B, MacDougall P, et al. Dynamic pricing by scalable energy management systems - field experiences and simulation results using powermatcher [C]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012: 1-8.
- [31] Forfia D, Knight M, Melton R. The view from the top of the mountain: Building a community of practice with the GridWise transactive energy framework[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 25-33.
- [32] Ipakchi A. Demand side and distributed resource



- management - A transactive solution[C]. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2011: 1-8.
- [33] Li S, Zhang W, Lian J, et al. Market-based coordination of thermostatically controlled loads — part I: a mechanism design formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1170-1178.
- [34] Li S, Zhang W, Lian J, et al. Market-based coordination of thermostatically controlled loads—part II: unknown parameters and case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1179-1187.
- [35] Hao H, Corbin C D, Kalsi K, et al. Transactive control of commercial buildings for demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 774-783.
- [36] Ma Z, Callaway D S, Hiskens I A, et al. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 67-78.
- [37] Gan L, Topcu U, Low S H, et al. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 940-951.
- [38] Gatsis N, Giannakis G B. Residential Load Control: Distributed Scheduling and Convergence With Lost AMI Messages[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 770-786.
- [39] Papadaskalopoulos D, Strbac G. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets —part I: market mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3658-3666.
- [40] Papadaskalopoulos D, Strbac G, Mancarella P, et al. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets—part II: application with electric vehicles and heat pump systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3667-3674.
- [41] Vandael S, Claessens B, Hommelberg M, et al. A scalable three-step approach for demand side management of plug-in hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 720-728.
- [42] De Craemer K, Vandael S, Claessens B, et al. An event-driven dual coordination mechanism for demand side management of PHEVs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 751-760.
- [43] PJM. Energy & ancillary services market operations [EB/OL]. [2017-07-03]. <http://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m11.ashx>
- [44] Nord P. Rules and regulations [EB/OL]. [2017-07-03]. <https://www.nordpoolgroup.com/TAS/Rules-and-regulations>
- [45] Energy M C. Market rules[EB/OL]. [2017-10]. <https://www.emcsg.com/marketrules>.
- [46] 蒲天骄, 刘威, 陈乃仕, 等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(06): 1579-1590.  
Pu Tianjiao, Liu Wei, Chen Naishi, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1589(in Chinese).
- [47] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A distributed algorithm for managing residential demand response in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2385-2393.
- [48] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. Optimal residential load management in smart grids: a decentralized framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1836-1845.
- [49] 王程, 刘念. 基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(09): 2675-2681.  
Wang Cheng, Liu Nian. Distributed v[J]. Power System Technology, 2016, 40(09): 2675-2681(in Chinese).
- [50] 平健, 陈思捷, 张宁, 等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.  
Ping Jian, Chen Sijie, Zhang Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690(in Chinese).
- [51] 李彬, 卢超, 曹望璋, 等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3691-3702.  
Li Bin, Lu Chao, Cao Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3691-3702(in Chinese).
- [52] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4023.  
Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023(in Chinese).
- [53] 杨晓东, 张有兵, 卢俊杰, 等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3703-3716.  
Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Lu Junjie, et

- al. Blockchain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716(in Chinese).
- [54] Pierre Pinson, Thomas Baroche, Fabio Moret, 等. 以用户为中心的新兴电力市场模式[J]. 供用电, 2017, 34(12): 27-31.  
Pierre Pinson, Thomas Baroche, Fabio Moret, et al. The emergence of consumer-centric electricity markets [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(12): 27-31(in Chinese).
- [55] Zhang C, Wu J, Long C, et al. Review of existing peer-to-peer energy trading projects[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2563-2568.
- [56] Mengelkamp E, Gärtner J, Rock K, et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 210: 870-880.
- [57] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求, 概念, 方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.  
Zhang Jun, Gao Wenzhong, Zhang Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 43(9): 1544-1554(in Chinese).
- [58] 谢青洋, 应黎明, 祝勇刚. 基于经济机制设计理论的电力市场竞争机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, (10): 1709-1716.  
Xie Qingyang, Ying Liming, Zhu Yonggang. Competitive power market mechanism design based on the designing economic mechanisms theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, (10): 1709-1716(in Chinese).
- [59] 田国强. 经济机制理论: 信息效率与激励机制设计[J]. 经济学: 季刊, 2003, 2(2): 271-308.  
Tian Guoqiang. Economic mechanism theory: informational efficiency and incentive mechanism design[J]. China Economic, 2003, 2(2): 271-308(in Chinese).
- [60] Muller F L, Szabo J, Sundström O, et al. Aggregation and Disaggregation of Energetic Flexibility from Distributed Energy Resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017.
- [61] Hao H, Sanandaji B M, Poolla K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198.
- [62] Hao H, Somani A, Lian J, et al. Generalized aggregation and coordination of residential loads in a smart community[C]. Smart Grid Communications, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 67-72.
- [63] Hughes J T, Dominguez-Garcia A D, Poolla K. Identification of virtual battery models for flexible loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4660-4669.
- [64] Hao H, Wu D, Lian J, et al. Optimal coordination of building loads and energy storage for power grid and end user services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, PP(99): 1.
- [65] 艾欣, 赵阅群, 周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(06): 1596-1603.  
Ai Xin, Zhao Yuequn, Zhou Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(06): 1596-1603.
- [66] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, (02): 581-591.  
Jin Xiaolong, Mu Yunfei, Jia Hongjie. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, (02): 581-591(in Chinese).
- [67] Coffrin C, Van Hentenryck P. A linear-programming approximation of ac power flows[J]. Inform Journal on Computing, 2014, 26(4): 718-734.
- [68] Molzahn D K, Lesieutre B C, Demarco C L. Investigation of non-zero duality gap solutions to a semidefinite relaxation of the optimal power flow problem[C]. System Sciences, 2014 47th Hawaii International Conference on. IEEE, 2014: 2325-2334.
- [69] Lavaei J, Low S H. Zero duality gap in optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 92-107.
- [70] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.  
Liu Yibing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64(in Chinese).
- [71] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行

- [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- Liu Yibing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A Mixed Integer Second-order Cone Programming Based Active and Reactive Power Coordinated Multi-period Optimization for Active Distribution Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583(in Chinese).
- [72] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(06): 1634-1645.
- Gao Hongjun, Liu Junyong, Shen Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1644(in Chinese).
- [73] Molzahn D K, Hiskens I A. Sparsity-exploiting moment-based relaxations of the optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3168-3180.
- [74] Molzahn D K, Hiskens I A. Moment-based relaxation of the optimal power flow problem[C]. Power Systems Computation Conference, 2014. IEEE, 2014: 1-7.
- [75] Savier J S, Das D. Energy loss allocation in radial distribution systems: a comparison of practical algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(1): 260-267.
- [76] Conejo A J, Arroyo J M, Alguacil N, et al. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 571-576.
- [77] 汤奕, 韩啸, 吴英俊, 等. 考虑通信系统影响的电力系统综合脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6066-6074.
- Tang Yi, Han Xiao, Wu Yingjun, et al. Electric Power System Vulnerability Assessment Considering the Influence of Communication System[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6066-6074.
- [78] McParland C. OpenADR open source toolkit: developing open source software for the smart grid[C]. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-7.
- [79] USFE. Usef Energy - universal smart energy framework [EB/OL]. [2017]. <https://www.usef.energy/>.
- [80] PowerMatcherSuite. The energy flexibility platform & interface - the powermatcher suite [EB/OL]. [2017]. <http://flexiblepower.github.io/technology/efpi/>.
- [81] 李田, 苏盛, 杨洪明, 等. 电力信息物理系统的攻击行为与安全防护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22):162-167.
- LI Tian, SU Sheng, YANG Hongming, et al. Attacks and Cyber Security Defense in Cyber-physical Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22):162-167(in Chinese).
- [82] 李存斌, 李小鹏, 田世明, 等. 能源互联网电力信息深度融合风险传递:挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11):17-25.
- LI Cunbin, LI Xiaopeng, TIAN Shiming, et al. Challenges and Prospects of Risk Transmission in Deep Fusion of Electric Power and Information for Energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):17-25(in Chinese).
- [83] 汤奕, 韩啸, 吴英俊, 鞠勇, 周霞, 倪明. 考虑通信系统影响的电力系统综合脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23):6066-6074.
- TANG Yi, HAN Xiao, WU Yingjun, et al. Electric Power System Vulnerability Assessment Considering the Influence of Communication System [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6066-6074(in Chinese).
- [84] 李培恺, 曹勇, 辛焕海, 等. 配电网信息物理系统协同控制架构探讨[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):2-7+15.
- LI Peikai, CAO Yong, XIN Huanhai, et al. Discussion on cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):2-7+15(in Chinese).



收稿日期: 2018-03-22.

作者简介:

胡俊杰(1986), 男, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统及微网, E-mail: junjiehu@ncepu.edu.cn.

王坤宇(1991), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统及微网, Email: wangkuny@ncepu.edu.cn.

艾欣(1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统及微网, E-mail: aixin@ncepu.edu.cn.

韩雪(1988), 女, 博士, 主要研究方向为可再生能源并网、规划和政策, Email: hanx@eri.org.cn.

杨光亚(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为为电力系统建模、运行与控制、可再生能源发电及并网等, E-mail: gyy@elektro.dtu.dk.

薛禹胜(1941), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为电力系统自动化、实验经济学在能源市场中的应用等, E-mail: xueyusheng@sgepri. sgcc.com.cn.

(责任编辑 李小丫)