

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181151

能源互联网接入设备关键技术探讨

谈竹奎¹, 程乐峰², 史守圆², 王文睿², 徐伟枫², 华锦修², 蓝超凡², 余涛²

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 作为能源系统与信息系统信息-物理深度融合的庞大网络, 能源互联网“开放共享”的特征对用户侧能源的接入、控制和传输提出了挑战。针对能源互联网背景下用户侧综合能源管理问题, 首先提出了能源互联网接入设备的概念, 指明了其区别于能源路由器的特征, 并从规划调度、运行管理和能源服务3个维度详细介绍了能源互联网接入设备的应用领域。然后, 重点介绍了设备特征识别、需求响应、区块链、大数据、综合能源管理和电力市场等6项关键技术, 并深入阐述了能源互联网接入设备与这些关键技术的紧密联系。最后, 简要介绍了能源互联网接入设备的实施方案和未来挑战, 以期为未来能源互联网下用户设备高效便捷接入网提供一些借鉴和参考。

关键词: 能源互联网; 能源互联网接入设备; 信息-物理融合系统; 综合能源管理; 用户侧; 需求响应

Discussion on key technologies of energy internet access equipment

TAN Zhukui¹, CHENG Lefeng², SHI Shouyuan², WANG Wenrui², XU Weifeng², HUA Jinxiu², LAN Chaofan², YU Tao²

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: As a huge network involving deep cyber-physical integration of energy systems and information systems, energy internet possesses features of open and sharing, which brings challenge to the access, control and transmission of energy on user side. Aiming at the issues of integrated energy management on user side in the context of energy internet, the concept of energy internet access equipment is proposed as well as its features that obviously differ from energy router. Then, from the perspectives of planning and dispatching, operation management, and energy service, the application fields of energy internet access equipment are thoroughly introduced. Next, six key technologies included in energy internet access equipment are described, including equipment feature recognition, demand response, blockchain, big data, integrated energy management and electricity market, from which the relationship between energy internet access equipment and these key technologies is elaborated. Lastly, the engineering implementation and future challenge of energy internet access equipment are briefly introduced, hoping to provide some reference and guidance for effective and convenient access of user-side equipment to energy internet in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477055 and No. 51777078) and Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. GZKJQQ00000419).

Key words: energy internet; energy internet access equipment; cyber-physical systems; integrated energy management; user side; demand response

0 引言

电能已经广泛应用于我们日常生活和生产的各个环节。随着经济和社会的快速发展, 越来越多的

国家开始关注需求响应(Demand Response, DR)和综合能源管理(Integrated Energy Management, IEM)问题。为此, 美国和一些欧洲国家1970年便提出了“家庭能量管理系统(HEMS)”的概念^[1], 可有效提升用电效率, 并实现节能减排的目的。自此, 能量管理系统(EMS)的研究受到越来越多关注, 相关成果也日益丰富^[2-5]。目前, 综合能源管理可在一定程度上解决配网供电、用户电力消费和新能源利用等

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477055, 51777078); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目资助(GZKJQQ00000419)

问题。然而,对于运用在其中的实际 IEM 系统而言,仍存在诸多不足,尤其是传统的依靠不可再生能源的发展模式越来越难以持续时,高效率、安全可靠和可持续发展的能源使用模式将是人类社会所面临的能源利用这一重大难题的解决之道。

在上述背景下,美国著名经济学家 Rifkin 在 2011 年首次提出了“能源互联网”的概念,并对其做了具象化定义^[6]:能源互联网由若干能源局域网互联构成,而能源局域网则由能量路由器、发电/储能设备、交直流负载等组成,既可并网工作,也可脱网独立运行。Rifkin 提出了可分散、自由生产可再生能源并共享的能源互联网发展的美好愿景^[7],现有电网将变成一个能源对等的共享网络。能源互联网研究方面:美国 NSF 资助的 FREEDM 研究中心首先提出了发展能源互联网的设想,并开发了部分原型系统;2012 年欧盟则明确提出了第三次工业革命的核心就是能源互联网,其中德国率先提出了“E-Energy”计划,以力图打造新型的能源网络^[8]。国内方面,中国电科院 2010 年就对电网未来形态进行了研究,并提出了“灵活配电系统”的理念^[9];2013 年,中国电科院等提交了“能源互联网初步调研报告”^[10];2014 年国网公司首次提出了“全球能源互联网”的理念^[11];2015 年,国务院政府工作报告中首次提到了“制定‘互联网+’行动计划”;2016 年,国家发改委等公布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》^[12],则明确了我国能源互联网的发展计划和目标,力争在 2025 年前初步建成能源互联网的产业体系,构建比较完善的技术体系和标准,逐步推进成果的国际化。

由此可见,能源互联网正成为当下众多学者研究和关注的重点,并对其概念有着不同理解。其中,文献[13]指出能源互联网应具有如下涵义:横向多种能源互补、纵向源网荷储协调、能源信息两流同步、数据管理处处实现、人机对话事事智能、终端电能不断扩大、再生替代普遍适用和能源生态生生不息。文献[14]则更简洁地阐述为:能源互联网就是深度融合能源系统和互联网的新一代能源系统。

在能源互联网背景下,能源可以通过 peer-to-peer 的形式进行自由对等的交易,新的能量信息流动形式对用户侧能源设备的接入方式提出了挑战。能源互联网要为各类繁多的分布式能源设备和负荷设备提供统一的接入接口装置^[15],这个装置既要帮助目标设备完成能量、信息联网,又在去中心化能源市场中为目标设备承担计量、交易和结算任务,

同时也要具备针对各种类型设备的“即插即用”能力^[16],以简化用户接入和配置过程。

因此,能源系统的参与者将越发多元化,具有独立响应能力的主体数量也显著增加,使得电网侧和用户侧的信息交互越发重要和频繁。而随着接入电网的分布式新能源发电设备的数量越来越多,对这些分布式设备的管理显得尤为重要,这使得电力需求侧响应(DR)有了更高要求,其内涵也有了全新的拓展。能源互联网下的 DR 应具有更高的监控技术和节能效益,可支持各类分布式设备的接入,使用户可进行实时的主动式响应。这其中信息-物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)^[17]是一种集成了 3C (computation, communication, control)技术,将计算、通信和控制深度融合的多维复杂系统,可将信息世界(cyber space)和物理世界(physical space)进行紧密地、有机地结合,其通过传感器和嵌入式微处理器对物理过程进行测量和控制,同时物理过程反作用于计算过程^[18]。

目前国内外针对能源互联网接口装置已有一些研究成果。文献[19]介绍了美国 FREEDM 研究中心构建的能源互联网原型系统中的接口装置,其以能源路由器作为能源互联网的基本单元,固态变压器(SST)作为主电路,由 SST 扩展出不同的能源接口以接入分布式能源设备和负荷设备,文中提出了“即插即用(plug-and-play)”的概念,但其实现依赖于标准通信接口,不能通过负荷特征对设备的类型进行识别,限制了不具备标准通信接口的负荷的即插即用能力。文献[20]进一步明确了“固态变压器—能源路由器—能源开关”的能源互联网层级设备系统,并对能源开关的运行模式进行了研究;文献[21]则基于“统一”的概念设计了能源路由器能量信息一体化接口,采用 IEC61850 作为通信协议,但同样存在对负荷装置的识别依赖负荷本身通信能力的问题。上述文献提出的能源互联网接口装置主要侧重于分布式能源设备的接入与控制,没有详细研究其装置如何支持能源互联网下分布式能源交易的问题。文献[22]提出了分布式新能源接入能源互联网的信息物理广域关联接口的概念,并对其市场级应用进行了仿真,但文中提出的广域关联接口面向的对象只是分布式新能源设备,在市场交易中也并没有考虑去中心化模式下的共识和结算问题。

基于上述 CPS 的概念和特性,本文综合近几年能源互联网的发展趋势与新兴技术,为实现各种分布式能源设备的统一能源信息入网与交易,首次提

出了能源互联网接入设备的概念。在结合能源互联网特点与接入需求的基础上, 针对能源互联网接入设备的概念定义、主要特征和应用领域做了详细阐述, 并对能源互联网接入设备及其管理控制实现中的关键技术进行了介绍。最后对其工程实施方案进行了简要描述, 以期为未来能源互联网接入设备的开发和用户高效便捷接入提供一些思考。

1 能源互联网接入设备的概念

1.1 能源互联网的特点与接入需求分析

从已有的研究成果可以看出^[6-7,13-14], 能源互联网与其他形式的电力系统(如智能电网)相比, 具有以下 4 个关键技术特征: 1) 可再生能源高渗透率: 能源互联网中将接入大量各类分布式可再生能源发电系统。2) 非线性随机特性: 能源互联网将呈现复杂的随机特性, 其控制、优化、调度、运行和管理将面临更大挑战。3) 多源大数据特性: 能源互联网工作在高度信息化的环境中, 具有量测功能的智能终端的数量将会大大增加, 所产生的数据量也将急剧增大。4) 多尺度动态特性: 能源互联网具有更广阔的开放性和更大的系统复杂性, 呈现出复杂的、不同尺度的动态特性。

与传统电网集中式能量分配与调度中能量只能从电网到用户单向流动的运行模式不同, 在能源互联网中, 各类分布的能源能够以 peer-to-peer 的形式在市场上自由对等地交易和兑换, 用户既是能源消费者又是能源的供应者。这种开放式的能源交互, 对能源互联网能源设备的接入、控制和能量流的传输提出了挑战。首先, 能源互联网作为一个能源网络, 需要为各类型的终端能源设备提供可靠的物理接口, 实现各终端能源设备与主网的能源双向流动以及终端设备的运行状态监测和控制; 其次, 能源互联网作为一个信息网络, 需要为各类型的终端能源设备提供统一的通信接口, 实现各类型终端能源设备以及上级管理系统之间的信息互联; 另外, 能源互联网作为一个开放的能源市场, 需要为各类型能源终端提供统一的计量和交易手段, 实现终端用能对市场活动的平等参与。为此, 本文提出能源互联网接入设备的概念。

1.2 能源互联网接入设备的概念与特征

根据 1.1 节对能源互联网的特点与接入需求的分析, 提出如下三个问题: 如何连接能源互联网用户? 如何了解能源互联网用户? 如何为能源互联网用户提供服务? 针对这些问题, 本文对提出的能源互联网接入设备概念定义如下: 它是一种面向终端用户的、可为各类分布式能源设备提供能源互联网

统一身份识别接口并使其可观、可测、可控的物理信息终端媒介设备。同时, 它还是家庭微网的控制器、用户参与电力市场的本地决策系统以及分布式电源和分布式储能在电力市场中的能流控制器。

能源互联网接入设备既包括硬件系统, 也涵盖软件系统, 如图 1 所示。

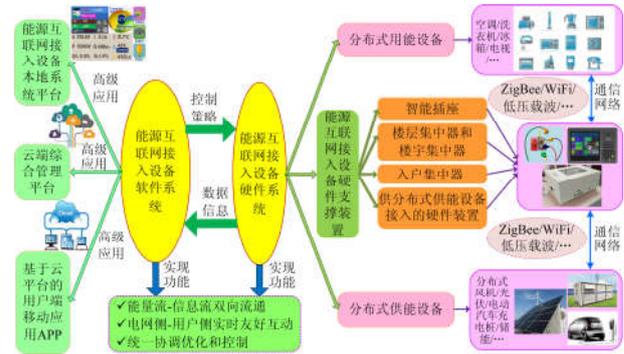


图 1 能源互联网接入设备的软硬件系统架构构想

Fig. 1 Conceived integrated hardware system and software system framework for the energy internet equipment

如图 1 所示, 其中: 硬件系统为可接入能源互联网的成套核心装置, 如智能插座、进行能量管理和协调控制的入户/楼层/楼宇集中器、为风机/光伏/EV 充电桩/储能等各类分布式设备接入的硬件接口装置等, 可实现实时监测、数据采集、协调优化、实时控制、用户友好互动和多协议通信等功能; 软件系统平台则基于硬件系统而开发, 包括内嵌的设备本地能量管理系统、云端基于 Web 的管理系统和基于云平台的用户移动终端应用 APP 等, 可基于各类智能算法实现一些高级应用, 包括本地综合能量管理、含分布式电源接入的负荷预测、电能质量优化与能效分析、分布式接入设备协调控制、用电行为分析、历史数据及时查询等。

因此, 能源互联网接入设备也是体现能源互联网的用户端特征、实现能源互联网供能和用能有关的各类服务的终端执行设备。这些服务包括节能服务(如能源审计和能效分析)、调频服务、功率平衡服务、新能源接入服务、需求侧响应服务, 甚至包括其他增值服务(如差异化计费、用户设备维护、能源供应服务、电力云平台服务、能源金融服务等)。此外, 能源互联网接入设备具体接入方式则包括: 单设备接入、多设备集群接入、多用户集合接入、多楼宇多企业集合接入等。

为了实现能源互联网的需求, 基于上述能源互联网接入设备概念及图 1 构想的能源互联网接入设备软硬件系统架构, 本文认为未来应用的能源互联网

网接入设备将具备如下区别于能源路由器的特征: 可感知性(可观性)、可控性、实时性、互联性、智能性、即插即用特性、多方交互性、信息物理融合性、多能互补性等。此外, 能源互联网接入设备还应具有一定的分布式能源兼容特性, 可将各类海量接入的分布式发电和储能装置等设备联合起来, 以构成能源互联网的基本节点。

2 应用领域

能源互联网接入设备的应用领域十分广泛。凡是能源互联网给终端用户带来的各种应用、便利和服务, 都是能源互联网接入设备应具有的功能。其应用领域将包括:

1) 用能信息采集领域。要使能源互联网掌握用能设备的状态信息, 实现整个系统的可观, 必须能够实现所有信息的采集, 以替代现有的信息采集终端, 包括表计。

2) 负荷控制领域。能源互联网接入设备本身具有可控性, 能够根据预定的策略对负荷进行协调控制。该策略可以是供电企业预置的, 包括低压减载、低周减载、费用控制和精准负荷控制, 也可以是用户根据电价、经济性等条件预置的策略。

3) 家庭能量管理领域。能源互联网接入设备本身具有一定的计算能力, 因此可以作为家庭智慧能量管理的主机。它一方面根据用能设备的相关特征识别其能源管理的特性(即指纹识别), 实现家庭能量数据的采集与处理, 进而实现家庭能量自动管理。

4) 节能服务领域。能源互联网的接入设备能够利用大数据等技术感知用户的用电行为特征, 为用户推荐节能方案并执行。这对于配电台区的节能升级改造、搭建基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统^[23]也具有重要意义。

5) 售电终端。售电公司通过能源互联网接入设备全面分析了解用户的用能和供能设备、分布式电源发电能力和发电负荷预测、用户用电习惯等, 并为经营决策和电价制定等提供数据支持。

6) 能源交易终端。能源互联网接入设备可成为电力市场主体进行报价、合约传送、合约执行跟踪等媒介。未来小型用户甚至家庭用户参与电力市场时, 能源互联网接入设备作为能源交易终端就显得尤为必要。

7) 需求侧响应领域。能源互联网接入设备是最佳的需求侧响应终端设备。首先, 能源互联网接入设备能够自动并且精准识别参与响应的负荷容量; 其次, 能源互联网接入设备的可控性使得其参与需求侧响应的速度非常快; 再次, 能源互联网接入设

备的计算能力使得需求侧响应可以由设备自动完成, 无须人员干预; 最后, 能源互联网接入设备由于其需求侧响应的自动性和快速性, 将大大影响到需求侧响应的理论, 为自动需求响应奠定基础。

8) 微网控制器领域。在未来家庭微网成为能源互联网的一个个细胞时, 能源互联网接入设备成为家庭微网的控制器, 实现家庭的功率平衡控制等微网控制。

9) 综合能源服务与相关的增值服务。通过能源互联网接入设备识别接入的用电设备相关信息和用户的用电行为特征, 为用户提供综合能源解决方案, 并更精准地为用户提供增值服务, 比如能源金融服务、用户设备维护服务、能源供应服务等。

(10) 金融以及其他领域。能源互联网接入设备能够实现客户画像和客户信用评级, 实现客户设备运维服务、综合能源服务的众包模式等。

例如用电设备的身份识别及差异化计费^[15-16]: 当 EV 的充电头插入充电桩等能源互联网接入设备时, 系统可自动识别 EV 的编号, 汽车型号、电池等重要信息, 并实现自动扣费等功能。此外, 对于分布式电源与储能等可能向系统倒送能源的设备, 能源互联网接入设备也可以在识别出设备身份的基础上, 自动完成计费。图 2 为能源互联网接入设备的一种典型应用场景示意图。



图 2 能源互联网接入设备典型应用场景示意图

Fig. 2 Typical application scenario for energy internet access equipment

在图 2 所示的应用场景下, 能源互联网接入设备的最终目标是形成一个支持分布式设备的识别、通信与控制的标准, 如图 3 所示。因此, 能源互联网接入设备的最终目的在于提供各类分布式设备接入能源互联网的同一身份识别和即插即用接口, 称之为能源“通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)”系统, 即能源 USB 统一处理器, 如图 2 所示。

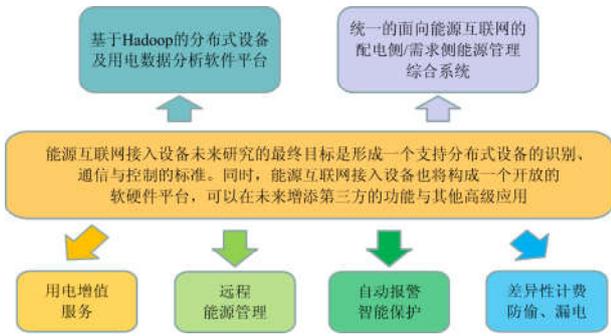


图3 能源互联网接入设备的最终目标

Fig. 3 Final goal of energy internet access equipment

3 关键技术

能源互联网接入设备与其控制管理的实现依赖于一些关键技术，其中有些技术是能源互联网接入设备自身必须具备的核心技术，比如设备特征识别技术，这是实现各类分布式设备统一接入能源互联网实现即插即用与监测管理的关键之处；有些技术则是能源互联网、智慧能源、智能电网等涉及的一些关键技术，包括自动实时的需求侧响应技术、去中心化的区块链技术、大数据技术、综合能源管理技术和电力市场与交易技术等，这些技术是实现前两章关于能源互联网接入设备概念、特征和场景应用的支撑技术，亦可称为能源互联网接入设备的关键技术。比如，能源互联网接入设备融合大数据分析技术实现用户用电行为习惯的挖掘，融合区块链技术实现丰富的分布式交易模式，融合自动实时的需求响应技术实现用户与能源供应商的互利共赢。因此，本章所讨论的关键技术是能源互联网接入设备实现终端用户与能源互联网友好交互、将各类设备统一接入能源互联网、使能源互联网各种主要特征在用户侧得到充分体现所必备的核心支撑技术，现分别简要介绍如下。

3.1 设备特征识别技术

能源互联网接入设备要支持多种类型设备的即插即用，以免去接入设备的手动配置过程。然而现阶段种类繁多的分布式能源和负荷装置并没有统一的通信协议接口，无法通过问询的方式了解其身份信息，所以能源互联网接入设备必须具备设备特征识别技术以实现上述功能。目前负荷识别技术已经由简单的人工规则设定发展到两类主要方法，一种是最小化特征差异的数学优化方法，另一种是基于神经网络、决策树、支持向量机和深度学习等机器学习算法的智能化模式识别方法^[24]。但从实施手段上仍可分为侵入式和非侵入式负荷监测识别两种主要方案^[25]。以决策树算法为例，决策树要做的就

是用合适的方法将数据集划分开来，划分数据集的最大原则就是：将无序的数据变得更加有序，把类似的数据归为一类。组织杂乱无章数据最常用的是使用信息论度量信息^[26]，在划分数据之前和之后信息发生的变化称为信息增益，计算每个特征值划分数据集获得信息增益，其中获得增益最高的特征就是最好选择。

对于侵入式检测而言，侵入式方法需要为所有负荷加装单独的测量装置，导致其成本较高难以推广，但得益于对目标设备用电数据直接准确的测量，侵入式识别方式可以实现非常好的负荷辨识准确率。非侵入方式只需要在多个用电负荷的电气汇聚总线上安装测量装置，结合负荷分解技术和预知的各类负荷特征对负荷进行识别分类，因而可仅通过一个能源互联网接入设备便可达到将一个用户单位内所有设备接入系统的效果，其成本较侵入式方案大幅减少，且安装简便，应用前景十分广阔。

无论对于侵入式还是非侵入式负荷识别方法，了解各类电器的电气特征是关键，称为负荷“指纹识别”。由于种类、功能、结构和生产工艺的不同，每个用电器之间都存在或大或小的用电特征差异，就像人的指纹一样千差万别，故将这些电气特征称为负荷的“电力指纹”。电力指纹包含负荷起停、待机以及各种工作模式下的暂稳态特征，其中一些常用的电气指纹特征电气量如图4所示。

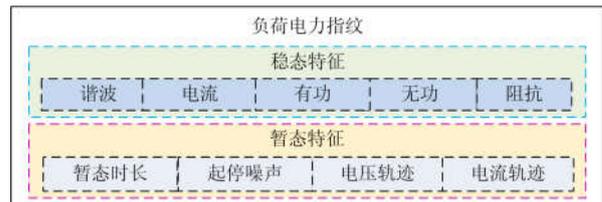


图4 常见的电力指纹特征量

Fig. 4 General characteristics of power fingerprint

侵入式监测装置由于直接对单个用电器进行准确的测量，不受其他电器的干扰，可以简单有效地提取出一类电器的电力指纹特征。本文设想了一种如图5所示的电力指纹系统架构，该系统将侵入式与非侵入式检测装置结合起来，充分利用侵入式对单个用电器的准确测量以及与用户的交互信息生成设备的电力指纹并加入指纹库，为非侵入式装置提供基础实施条件。同时侵入式装置也应用指纹库的信息为负荷的即插即用提供基础，非侵入式识别也可通过人工智能方法发现新的指纹特征添加到指纹库。系统构建初期的主要任务是采用一定量的侵入式装置构建电力指纹库，逐步丰富指纹库，使非

侵入式装置的检测效果越来越好, 易于推广, 并促使基于负荷识别技术的监测系统得到广泛应用。

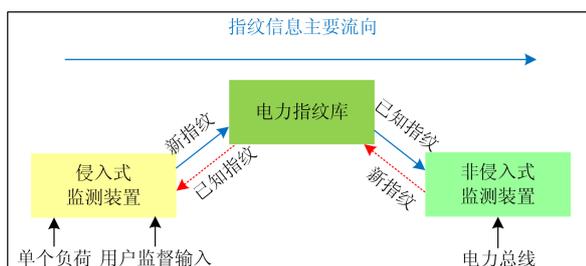


图5 本文设想的一种电力指纹系统框架

Fig. 5 Conceived framework of power fingerprint system

3.2 自动实时的需求侧响应技术

在能源互联网的背景下, 各能源系统将接纳多元的参与者, 响应主体数量也因此随之增加, 尤其是人与社会因素的加入, 能源互联网将演变为一个极为复杂的信息-物理-社会融合系统(Cyber-Physical-Social Systems, CPSS)^[27]。为了更高效、更广泛、更准确地提高不同类型响应主体^[28]的参与度(如参与电价与电量交易), 急需在能源互联网中引入自动需求响应(Automated Demand Response, ADR)技术, 以代替传统的电力 DR 技术。与传统 DR 相比, 高度融合了自动化技术、通信技术与智能量测技术的 ADR 系统脱离了对政府发布通知或其他主体的人工辅助的依赖, 可通过自动接收云端(如前文提到的基于 Web 的云端综合能量管理系统)响应信号实现负荷的实时动态调整, 即 ADR 在通信和控制自动化的实现框架下能对数秒级或数分钟级的信号做出合理的响应, 进而提高 DR 实施的实时性和灵活性。

ADR 系统连接了用户侧的能源互联网接入设备(如智能插座、智能入户集中器、供分布式设备接入的能源互联网装置等智能终端)和电网侧的 ADR 云平台, 其实施过程涉及了多个响应主体, 包括装有能源互联网接入设备的工商业用户、居民用户、负荷集成商和电网公司等^[15]。简而言之, 能源互联网接入设备在 ADR 的实施过程中负责用户侧数据的采集与上传, 并接收与执行来自电网侧 ADR 云平台的指令。文献[29]提出了一种如图 6 所示的 ADR 功能架构, 其主要由 ADR 潜力评估、ADR 实施、ADR 效果评估 3 个部分组成。

为进一步阐明 ADR 系统与能源互联网接入设备的关系, 此功能框架包括:

1) ADR 潜力评估: 用户侧的能源互联网接入设备收集并上传各类可控负荷不同时间尺度的用电数

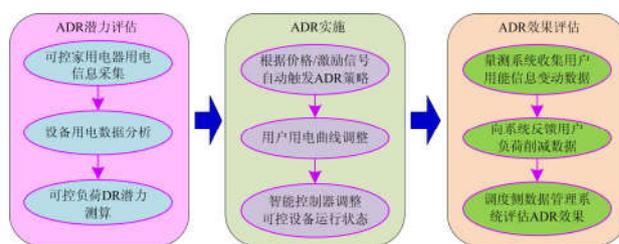


图6 ADR系统的总体功能架构

Fig. 6 Overall functional framework of ADR system

据, 进而通过 ADR 云平台搭载的大数据分析模块, 解析出用户生产/生活负荷特性等指标, 并测算不同 ADR 信号用户可调整用电量, 评估用户 ADR 潜力。

2) ADR 实施: 用户侧的能源互联网接入设备(如智能入户集中器)接收到来自电网侧的激励信号后, 自发启动嵌入能源互联网接入设备的本地 ADR 系统的优化模块, 并得出本地 ADR 优化策略, 向用户展示响应策略后, 随即执行本地 ADR 优化策略所需调整的用电行为, 通过能源互联网接入设备(如智能插座)实时调整相应家用电器的运行状态, 如调节热水器(水温)和空调(室温)等可控负荷的温度, 以提高用户的舒适度和用电满意度。

3) ADR 效果评估: 在 ADR 实施结束后, 由嵌入能源互联网接入设备的本地 ADR 系统(即前文提到的设备本地化能量管理系统, 主要嵌入到智能入户集中器中)自动汇总 ADR 实施前后的用户用电数据变化情况, 向用户展示参与 ADR 实施过程前后所产生的综合效益。同时, 通过双向通信系统将本地的 ADR 响应情况反馈给电网侧, 电网公司采用基线负荷等方法测算评估用户节能效果并给予适当激励, 从而提升用户侧能效水平。

3.3 去中心化的区块链技术

能源互联网接入设备不仅为终端能源设备提供接入服务, 同时承担着能源计量、交易、结算的能源市场任务。未来能源互联网中的市场主体和交易类型都将变得非常丰富, 为满足众多的分布式用户的海量用能需求, 去中心化的交易模式是必然选择。然而随着权威中心的消失, 各交易主体之间也面临着信任缺失的问题。能源互联网接入设备通过引入区块链技术为分布式交易提供保障^[30]。

区块链技术是一种由一系列按时间顺序排列的数据区块前后相连的链式数据存储方式, 通过密码学技术实现一个安全可信的分布式账本^[31]。它最大的特点是在各节点无需相互信任的条件下, 通过分布式共识机制实现可信的点对点交易。可有效解决依靠权威中心或可信第三方的交易方式带来的成

本、效率以及安全隐私等问题。因此，区块链可以作为能源互联网这个“能源资产市场”下交易模型的支撑性技术。区块链技术的整体架构如图 7 所示，由数据层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层组成^[32]。



图 7 区块链关键组成技术

Fig. 7 Key component technologies of blockchain

3.4 大数据技术

从能源生产配送消费的过程看，能源互联网中的数据源覆盖能源生产、能源传输、能源交易、能源消费各个环节^[33]，而数据的产生依赖于这些环节中的能源互联网接入设备。在能源互联网的实现条件下，数以亿计的能源互联网接入设备采集、转发和上传的海量数据需要通过云存储技术进行有效的存储和管理，并最终将数据搭载在大数据平台上进行数据挖掘和分析。因此，大数据技术依赖于底层千千万万的能源互联网接入设备所采集的海量数据，是组成整个能源互联网的技术基石。在应用层级，大数据技术将覆盖能源互联网的规划运行、交易和管理各个方面，对能源互联系统的规划调度、运行管理和能源服务起到辅助决策的作用。本文仅对大数据技术在能源服务与交易环节中电力用户用电行为分析研究的应用进行详细介绍。

在能源互联网中引入大数据技术(如多源数据融合方法、数据科学方法)，从单一维度转向多维度统筹融合，从更深刻的视角、以更高的时效发掘多源异构数据，从而发现新知识和新规律，将显著提高海量数据分析处理能力，给居民用电数据的价值挖掘带来了巨大的空间。通过接入智能设备采集海量的用电数据，基于大数据挖掘技术，对电力用户的用电数据进行分析。其中，数据挖掘要做的工作主要是居民用电消费分析和用电负荷预测。具体而言，包括研究用电量与气温和负荷之间的关系、城镇与乡村用电比较分析、不同季节的气温敏感值(气温变化 1℃，引起居民用电负荷的变化量)分析等。通过对电网数据中隐含的信息进一步挖掘，发现有用的信息并加以利用，进而指导电力企业做出更合理的决策。

居民用电行为(习惯)大数据分析的应用架构如图 8 所示，其具体流程可以表述如下。

① 数据集成和处理：通过能源互联网接入设备进行数据采集，同时利用数据清洗、存储和处理技术，聚合用电信息采集数据、客户服务数据、地理信息数据、人口和气象数据，达到海量、多源、异构数据的聚集、管理与融通，形成融合贯通的用户侧大数据资源。

② 居民用电消费分析：在现实中针对不同的应用场景和分析目标，通过不同的数据挖掘分析方法(如：聚类分析、回归分析和关联分析等方法)对用户的用电行为进行分析，提取数据特征并对特征进行精细化描述，为上层的应用提供分析基础。

③ 应用层级：居民用电消费分析的结果可进一步应用在负荷与环境因素的关联分析、负荷的预测分析等方面。

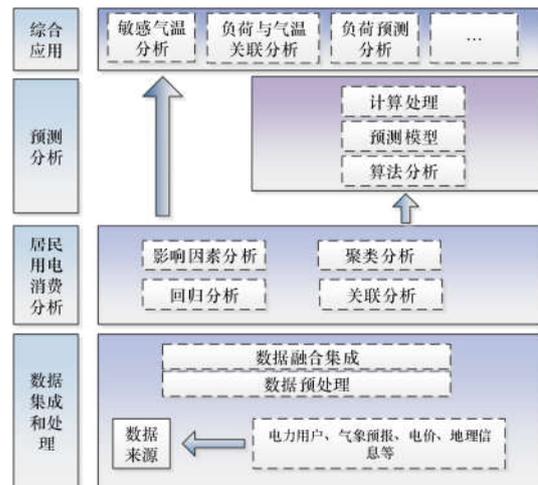


图 8 基于大数据处理的电力用户用电行为分析

Fig. 8 Electricity use behavior analysis for power users based on big data processing

3.5 综合能源管理技术

以多能互补、能量梯级利用为特点的综合能源系统或多能耦合系统是能源互联网的重要组成部分。与传统电力系统相比，综合能源系统体现出了一些不同的特点，首先电、气、热、冷等网络都有各自的建模分析方法，多个能源网络耦合之后需要新的分析方法；其次由于各能源介质的物理特性不同，各系统的动态过程有快有慢，综合能源网络的分析涉及多个时间尺度；更重要的是，综合能源网络中涉及多个市场主体，系统管理优化中会受到信息不全、控制权限的约束，导致传统的集中式控制方式不再适用^[34]。能源互联网接入设备提供多种能源网络终端设备的接入和管理，必须对综合能源系

统的特点有所了解, 并融合分布式综合能源管理技术发挥能源互联网“分散自治、多能协调”方面的优势。

对于综合能源系统的建模, 传统电、气、热(冷)等能源网络领域已提出了许多经典方法。其中, 电力系统领域主要以基于电路理论的潮流模型为代表; 天然气能源网络领域中的系统建模应用最多的是基于 Weymouth 方程的天然气管网流量模型^[35]; 供热供冷能源网络领域关注对象则为水压、温度和流量等^[36]。在综合能源系统的多能流耦合问题中, 能源枢纽(Energy Hub, EH)是一个重要概念。能源枢纽模型如图 9 所示, 它描述了一个支持多类能源输入、转化和输出的综合能源区域中枢, 可以根据需要对各类能源进行转换。例如, 通过电转气技术(P2G)将电能转换为天然气, 通过冷热电联产技术用天然气提供电能和供冷供热, 以达到多能互补、优化传输方式的目的。能源枢纽模型一般用公式 $L=CP$ 表示, 其中, L 为输出能源列向量, P 为输入能源列向量, C 是 EH 中最为重要的能量转换矩阵, 它的每一行代表该 EH 输出一种能源需要消耗各类输入能源的量^[37]。



图 9 能源枢纽模型

Fig. 9 Energy hub model

由于综合能源网络主体类型和数量众多, 分散式管理模式相对传统集中控制方式更加合适, 其中分散对等的 Web-of-Cell (WoC) 技术(由 ELECTRA 提出)和具有一定层次结构的多代理系统(MAS)是具有代表性的两种模式。

WoC 技术是将一个大的网络按照一定的拓扑或地区边界划分为许多个功能完整、地位平等的小单元并称之为一个 Cell。每个 Cell 都有一个处于核心地位的操作员, 称为 CO(cell operator), 可以实现对自己内部能源网络的监测与控制, 但并不是孤立存在的, 它会与相邻 Cell 之间存在以市场规则为基础的能量和信息交换, 最终所有的小单元互联在一起形成 Web-of-Cell 分布式决策体系。WoC 最大的特点是每个 Cell 的自治性和 Cell 之间的对等性^[38]。

多代理系统是一种具有集中-分散特点的分布式决策架构, 由多个具有简单结构和功能的 Agent

组成, 其中每个 Agent 只能控制部分资源和部分信息, 整体要完成的任务对其是透明的。各个 Agent 一方面要根据自己的信息做出决策, 另一方面要接收上级 Agent 下发的指令, 整个系统通过层次化的多个代理完成优化决策和控制任务^[39]。

另外, 综合需求侧响应技术(Integrated Demand Response, IDR)^[40]也是综合能源系统管理中的重要手段。通过 IDR, 可以将传统需求响应由电力系统引入综合能源系统, 通过多能互补技术引导用户优化用能结构, 提高能源枢纽运行效率和社会综合能源利用效率, 加强新能源消纳能力, 建立更加绿色环保的能源利用模式^[41]。

3.6 电力市场与交易技术

在能源互联网的实现条件下, 传统的电力市场交易模式和定价方式都将发生转变^[42-43]。对于用户本身而言, 不仅可以继续从各类竞争供电方购买电能, 还可以通过能源互联网接入设备实现发电设备、储能装置和可控负荷的即插即用, 进而转变为个体电力供应商将富余电力售卖给电网或其他居民用户。而对于供电公司, 则可以通过能源互联网接入设备采集反馈的海量用户用电数据进行数据挖掘, 进而将数据分析得出的决策指令通过 ADR 实现广域的非中断性负荷控制和调度处理, 同时在电力数据分析的基础上, 供电公司除了传统的电力交易外, 还可以为用户提供避峰错峰、优惠电价、电压控制等辅助性业务来获取更多利润。

从以上描述可知, 随着能源互联网的建立, 影响电力市场的因素^[43]不仅包括电网运营方、发电侧的直销、新兴的售电服务方, 还将包括分布式电源、分布式储能以及用户。因此, 在电力市场新形势下, 可以将能源互联网接入设备的功能做以下定义: ① 能源互联网接入设备是用户参与电力市场的本地决策系统; ② 能源互联网接入设备是分布式电源和分布式储能在电力市场中的能流控制器。而电力市场中的价格和激励信号则是能源互联网接入设备做出控制决策的必要依据。

文献[44]给出了一种能源互联网下电力市场的结构模式, 如图 10 所示。其中, 能源互联网背景下的电力市场引入了大量分布式电能供应方、小规模售电公司和新型产销集体等新增供电实体参与市场竞争, 其资源的分配、管理方式将由传统的集中式整体平衡向分布式、分散化局部微平衡发展。文献[44]中构建了以电网公司、新增供电实体和用户为博弈参与方的三方博弈模型, 该模型可描述为: 电网公司作为博弈的主导方, 负责制定各个时间段的

实施电价;新增供电实体依据电网公司发布的电价,结合市场需求及自身条件,发布自己的电价;用户则根据各供电方发布的电价和自身的用电需求选择各个时段内的用电方案。三方博弈的焦点在于最大化自身利益,并将最大化利益作为博弈策略的目标,其中电网公司和新增供电实体博弈的策略为各个时段的电价,而用户博弈的策略则为供电方案的选择和各个时段的用电量。最后,在博弈三方得到最优博弈策略时,即可认为达到非合作博弈的均衡点。

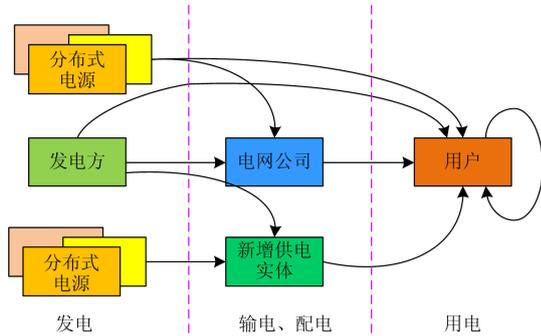


图 10 能源互联网下的电力市场结构模式

Fig. 10 Structure model of power market under energy internet

4 实施方案

4.1 总体实施方案

能源互联网接入设备可看作是一种搭载有“电力指纹”识别技术的通用电气接口,是一套多层分级的、实现能量流和信息流互联的智能系统,如图 11 所示。其中:统一硬件接口具有电气连通、通断控制、数据采集和本地初步识别等功能;其集群控制器则具有电气连通、协调管理、数据中继和本地精确识别功能;其云服务器具有大规模存储、集中优化、电力指纹库动态更新等特点。

4.2 硬件接口实施方案

图 11 中的统一硬件接口为分布式可控资源统一硬件接口,其实施方案如图 12 所示。其中:中央处理单元以 DSP 芯片为核心,其主频高、处理速度快、内部资源丰富、外部接口多^[45];信号采集与测量单元包括电阻分压的采样电路、放大电路和高精度片外 ADC 转换电路;负荷控制单元的中央处理单元发出信号驱动继电器开断电路;通信单元通过 WIFI 上传数据信息,接收控制指令;供电单元从市电取电,为其他单元提供 5 V 和 3.3 V 电压。

图 12 中的分布式可控资源统一硬件接口的本地电力指纹初步识别功能主要通过 DSP 芯片内部加载的本地智能识别算法库来实现,包括如下 4 个步骤:

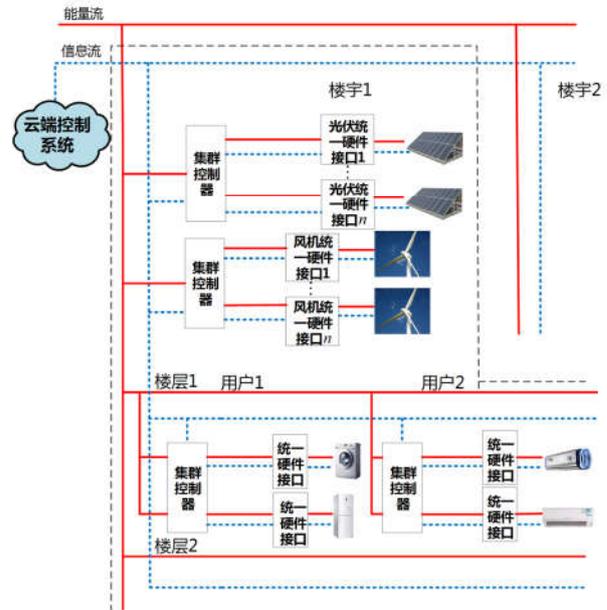


图 11 多层分级的、实现能量流和信息流互联的智能系统
Fig. 11 Multi-layer hierarchical smart system for interconnection of energy flow and information flow

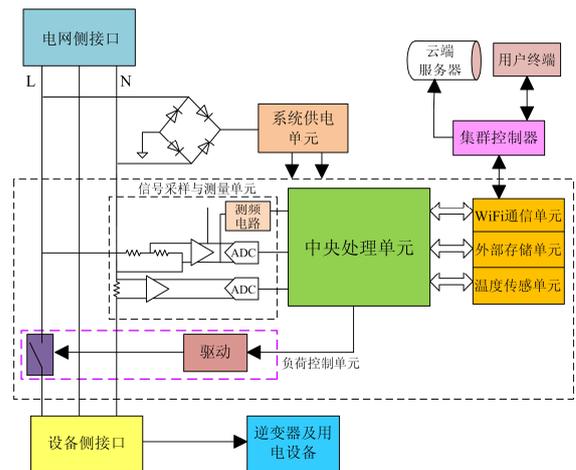


图 12 分布式可控资源统一硬件接口实施方案

Fig. 12 Implementation scheme of unified hardware interface

1) 高速采集:利用分布式可控资源统一硬件接口对不同电器稳态和暂态的用电数据进行高速采集,通过采集大量数据精准地还原出不同电器的用电曲线。

2) 特征学习:将采集到的数据输入到基于机器学习的特征数据模型中进行学习和分析,解析出在时间和功率尺度上能够识别电器类型的用电特征。

3) 加载识别算法库:根据有效的用电特征形成识别算法库,将识别算法库嵌入到 DSP 芯片内部,

从而本地实现初步的识别功能。

4) 更新识别算法库: 通过 WIFI 通信接收来自云端和集群控制器的信息更新识别数据库。

4.3 软件系统实施方案

基于上述硬件系统接口方案, 软件系统的实施架构如图 13 所示。其中, 系统架构的主要功能是实现数据采集处理以及功能模块的调用。数据处理包括对用户信息、用电设备数据的采集、存储; 功能模块主要是对用电数据的请求响应、用电行为的分析、分布式用电设备的控制和负荷识别与管理。

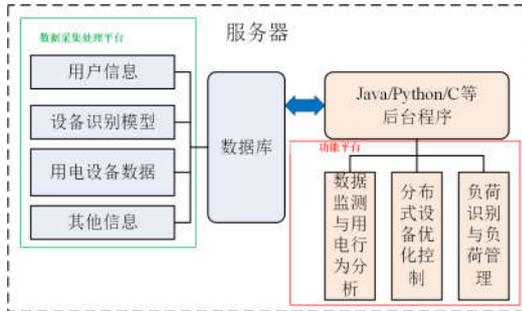


图 13 软件系统架构实施方案

Fig. 13 Implementation scheme for software system framework

图 13 中, 数据采集处理平台主要是管理各种不同类型和功能的接口, 并监控这些接口的运行状态, 对接口进行启停管理和测点配置管理。其中, 接口运行方式为控制台模式、Windows 服务模式; 接口故障管理包括自动重连、重启监视、故障日志; 接口数据缓存为故障中断缓存, 无时间和容量限制, FIFO 方式和混合方式支持; 实时数据接口则支持 API、SDK、ODBC、Web Service 等类型接口。软件系统接口平台功能组成如图 14 所示。

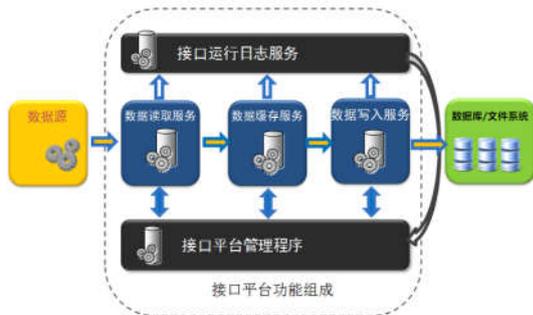


图 14 软件系统接口平台的功能组成

Fig. 14 Functional components of the software system interface platform

对于软件系统架构中的数据监测月用电行为分析模块, 可在结合高频度采集的用户用电数据的基础上, 用于后台对数据进行存储和处理, 分别于配

电侧交互界面生成实时数据监测图线以及于用户侧应用程序中生成简单的个人用电数据统计图表。分布式设备优化控制模块则主要包括对分布式设备的优化控制、对用电设备的智能用电优化控制。其中, 智能用电优化控制部分需要配合电力市场机制推动, 在分时电价乃至实时电价的基础上, 由用户自主选定用电模式, 包括节省电费模式、节省电量模式等; 发电优化控制部分也由各用户先依据自身情况选定分布式电源及储能设备采取的发电储能模式: 自发自用、余电上网, 或是自发自用、优先储能, 或是全额上网、按需购电或更多其他的模式。

此外, 在负荷识别与负荷管理模块中, 通过电力指纹对设备进行在线识别、精准判断, 可以实现用户用电优化控制的全自动化。通过电力指纹, 用户只需要选择自己所需要的用电模式, 并设置好条件, 即可自动控制用电设备的运行。同时, 电网公司也可以在获得用户许可、保证用户需求的情况下, 实现对用户用电设备的控制, 改变设备的运行状态, 以提高电网公司的效益。通过电力指纹实现用电设备数据的精准分类。通过对某一类用电设备进行能耗分析, 给出用户提升能效水平的具体建议, 并对用户详细的用电数据进行深入挖掘, 实现对用户的负荷预测。

5 未来挑战

能源互联网接入设备作为一套分布式能源和设备统一接入的多层、分级的系统平台, 可实现电网侧与用户侧能量流与信息流的互联互通, 对于工业/商业/居民用户分布式设备的统一协调控制、家庭/建筑/商业楼宇的综合能量管理、自动需求响应、能源电力市场交易等具有重要意义。能源互联网接入设备的研发涉及到前文阐述的多项关键技术, 这给未来最终实现能源互联网接入设备带来了巨大的挑战。其中, 最核心的挑战是如何基于能源互联网接入设备和能源互联网关键技术实现各种分布式设备即插即用的统一接口和在此基础上的用户需求侧实时响应优化, 后者涉及到需求响应建模的研究(如需求响应机理分析、需求侧资源建模、基于多目标优化协调的最优需求响应策略等)、海量分布式设备的实时响应快速优化研究、基于需求侧响应的工商业/家庭能量管理研究等, 可为面向能源互联网的配网侧-需求侧综合能源管理与示范工程建设提供坚实的理论支撑和优化工具支持。

因此, 未来开展能源互联网接入设备研究的挑战将是多方面的, 可先从以下几个方面着手研究:

一是基于人工智能的电力指纹负荷设备识别关键技术研究, 未来需要基于负荷识别技术搭建完整的电力指纹库。

二是研发搭载电力指纹识别技术的能源互联网接入设备软硬件系统, 其中软件系统包括设备本地化能量管理系统、基于 Web 的云端综合能源管理软件系统、基于 Android/苹果操作系统的用户移动端应用软件 APP 等, 硬件系统则包括智能插座、智能入户/楼层/楼宇集中器、供风机/光伏/EV 充电桩/储能等各类分布式设备接入的通用硬件接口装置等。

三是电力现货市场环境下基于需求响应机制的零售市场管理模式研究。

四是能源互联网接入设备的应用推广与综合能源管理示范应用研究。

6 结论

人类对能源与环保的需求正不断提升, 能源互联网的建设势在必行, 为解决众多终端供能和用能设备的接入与测控问题, 本文提出了能源互联网接入设备的概念, 并讨论了其技术特征、应用领域、关键技术、实施方案和未来挑战。能源互联网接入设备作为分布式能源和设备的统一身份识别和即插即用接口, 具有实时性、可控性、分布式能源接入能力、互联性、智能性、即插即用特性、可感知性(可观性)、多能互补性、多方交互性、信息物理融合性等特征, 可实现光伏、风机、EV 充电桩、储能等用户分布式设备的协调控制和优化利用, 支持各种设备与电网进行能量流-信息流的双向流通。

能源互联网接入设备为未来能源互联网下用户设备的即插即用提供了技术方案, 也为市场环境下的综合能源管理与多种交易模式提出了新的见解。未来发展能源互联网接入设备将面临诸多挑战, 其概念和技术特征也需进一步完善和丰富, 对于关键技术的攻克将为能源互联网接入设备的实现奠定坚实的基础。期待本文抛砖引玉, 引起业内相关专家学者兴趣, 共同为未来广泛能源互联网下终端用户各类设备的高效便捷入网做出更加深入的研究。

参考文献

[1] 王守相, 孙智卿, 刘喆. 面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 108-113. WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, LIU Zhe. Co-scheduling strategy of home energy for smart power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 108-113.

[2] 程乐峰, 周彬, 余涛. 一种节电潜力在线自动检测和快速能源审计智能系统的设计与实现[J]. 电力系统保

护与控制, 2014, 42(14): 105-111.

CHENG Lefeng, ZHOU Bin, YU Tao. Design and implementation of energy-saving potential automatically detecting online and rapid energy audit intelligent system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 105-111.

[3] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.

[4] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[5] 马宇辉, 刘念. 用户侧微电网的能量管理方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 158-168. MA Yuhui, LIU Nian. Survey on energy management method of community micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 158-168.

[6] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011.

[7] 吴安平. 第三次工业革命背景下对智能电网的再认识[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 38-41. WU Anping. The concept of smart grid in background of the third industrial revolution[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 38-41.

[8] 国家能源局. 德国依托 E-Energy 技术创新促进计划建造智能能源网络[EB/OL]. [2012-02-14]. http://www.nea.gov.cn/2012-02/14/c_131409715.htm. National Energy Administration. Germany builds smart energy network based on E-Energy technology innovation promotion program[EB/OL]. [2012-02-14]. http://www.nea.gov.cn/2012-02/14/c_131409715.htm.

[9] 中国电力科学研究院. 第三代配电系统形态研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院配电所, 2011. China Electric Power Research Institute. Morphological research report for the third-generation distribution system[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute Power Distribution Office, 2011.

[10] 北京市科委, 中国科学院, 中国电力科学研究院, 清华大学. 能源互联网初步调研报告[R]. 北京: 北京市科委, 2013. Beijing Municipal Science & Technology Commission, Chinese Academy of Sciences, China Electric Power Research Institute, and Tsinghua University. A preliminary research report on energy internet[R]. Beijing: Beijing Municipal Science & Technology Commission, 2013.

[11] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[12] 国务院新闻办公室网站. 关于推进“互联网+”智慧能

- 源发展的指导意见-发改能源[2016] 392号[EB/OL]. [2016-02-24]. http://www.scio.gov.cn/32344/32345/33969/34729/x_gzc34735/Document/1481607/1481607.htm
- The State Council Information Office of the People's Republic of China. Guidance on promoting the development of "Internet +" smart energy—National Development and Reform Commission No. 392 in 2016[EB/OL]. [2016-02-24]. http://www.scio.gov.cn/32344/32345/33969/34729/x_gzc34735/Document/1481607/1481607.htm.
- [13] 徐锭明. 能源互联网将塑造能源之未来[J]. 中国信息界, 2015(5): 12-15.
XU Dingming. Energy internet will shape the future of energy[J]. Information China, 2015(5): 12-15.
- [14] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [15] CHENG Lefeng, ZHANG Zhiyi, WANG Wenrui, et al. Local energy management and optimization: a novel energy universal service bus system based on energy internet technologies[J]. Energies, 2018, 11(5): 1160.
- [16] 郑宇, 程乐峰, 孟科, 等. 一种基于能源互联网的能源USB系统方案设计[J]. 新型工业化, 2016, 6(10): 38-51.
ZHENG Yu, CHENG Lefeng, MENG Ke, et al. Schematic design of a kind of energy USB system based on energy interconnection[J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(10): 38-51.
- [17] 李霞, 李勇, 曹一家, 等. 基于信息物理系统融合的广域互联电网阻尼控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 35-42.
LI Xia, LI Yong, CAO Yijia, et al. Wide-area damping control strategy of interconnected power grid based on cyber physical system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 35-42.
- [18] 孙欣尧. 信息物理能源系统需求侧协作测量与能效优化方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
SUN Xinyao. Research on demand side collaborative measurement and energy efficient optimization method in cyber-physical energy systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [19] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [20] HU Ruonan, WANG Wei, MA Wei, et al. Application of power electronic technology to energy Internet[C] // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), June 18-20, 2017, Siem Reap, Cambodia: 1343-1347.
- [21] 石亚锋. 能源路由器能量信息一体化接口设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
SHI Yafeng. Design and implementation of energy-information integration interface of energy routers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [22] 彭思成, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 分布式新能源接入能源互联网的信息物理广域关联接口[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2131-2141.
PENG Sicheng, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Wide-area cyber-physical associated interface device for energy internet-connected distributed new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2131-2141.
- [23] 汤毅, 程乐峰, 李正佳, 等. 基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 150-158.
TANG Yi, CHENG Lefeng, LI Zhengjia, et al. Design of economic operation and optimization analysis system based on intelligent area power network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 150-158.
- [24] 程祥, 李林芝, 吴浩, 等. 非侵入式负荷监测与分解研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3108-3117.
CHENG Xiang, LI Linzhi, WU Hao, et al. A survey of the research on non-intrusive load monitoring and disaggregation[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3108-3117.
- [25] 程媛. 家用电器负荷在线参数辨识方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
CHENG Yuan. Research of household appliances online parameter identification methods[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [26] 郑碧如, 吴广潮. 基于信息论方法的分类数据相似性度量[J]. 计算机与现代化, 2018(5): 30-34.
ZHENG Biru, WU Guangchao. Similarity measure of categorical data based on information theory[J]. Computer and Modernization, 2018(5): 30-34.
- [27] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息-物理-社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 25-40.
CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 25-40.
- [28] 程乐峰, 余涛. 开放电力市场环境下多群体非对称演化博弈的均衡稳定性典型场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5687-5703.
CHENG Lefeng, YU Tao. Typical scenario analysis of equilibrium stability of multi-group asymmetric evolutionary games in the open and ever-growing electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5687-5703.
- [29] 曾鸣, 韩旭, 孙静惠, 等. 能源互联网背景下自动需求响应关键问题及展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 21-27.
ZENG Ming, HAN Xu, SUN Jinghui, et al. Key issues and prospects of automated demand response under energy internet background[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 21-27.

- [30] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1026-1034.
DING Wei, WANG Guocheng, XU Aidong, et al. Research on key technologies and information security issues of energy blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1026-1034.
- [31] ASTE T, TASCIA P, MATTEO T D. Blockchain technologies: the foreseeable impact on society and industry[J]. Computer, 2017, 50(9): 18-28.
- [32] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [33] 刘世成, 张东霞, 朱朝阳, 等. 能源互联网中大数据技术思考[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 14-21, 56.
LIU Shicheng, ZHANG Dongxia, ZHU Chaoyang, et al. A view on big data in energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 14-21, 56.
- [34] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8, 16.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8, 16.
- [35] 张有兵, 王嘉瑶, 杨晓东, 等. 计及电转气技术的区域综合能源系统在线优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2467-2477.
ZHANG Youbing, WANG Jiayao, YANG Xiaodong, et al. An online optimal scheduling approach for regional integrated energy system considering P2G[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2467-2477.
- [36] 王丹, 智云强, 贾宏杰, 等. 基于多能源站协调的区域电力-热力系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 59-67.
WANG Dan, ZHI Yunqiang, JIA Hongjie, et al. Day-ahead economic dispatch strategy of regional electricity-heating integrated energy system based on multiple energy stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 59-67.
- [37] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [38] 宋蕙慧, 于国星, 曲延滨, 等. Web of Cell 体系——适应未来智能电网发展的新理念[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 1-9.
SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of cell architecture-new perspective for future smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9.
- [39] 丁明, 马凯, 毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 1-8.
DING Ming, MA Kai, BI Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 1-8.
- [40] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.
- [41] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2439-2448.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2439-2448.
- [42] 李喧, 马瑞, 罗阳. 基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.
LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 88-95.
- [43] CHENG Lefeng, YU Tao. Nash equilibrium-based asymptotic stability analysis of multi-group asymmetric evolutionary games in typical scenario of electricity market[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 32064-32086.
- [44] 张忠会, 赖飞屹, 谢义苗. 基于纳什均衡理论的电力市场三方博弈分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3671-3679.
ZHANG Zhonghui, LAI Feiyi, XIE Yimiao. Analysis of trilateral game in electricity market based on Nash equilibrium theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3671-3679.
- [45] 程乐峰. 专线用户智能节能诊断装置的设计与关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
CHENG Lefeng. Design and research on key technology of intelligent energy-saving and diagnosis device based on dedicated use[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

谈竹奎(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网/配网自动化; E-mail: powerto you@163.com

程乐峰(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制、智能配电网、智能用电、电力市场及博弈论等; E-mail: chenglf_scut@163.com

史守圆(1994—), 男, 研究方向为智能配电网、智能用电等相关技术研究。Email: shishouyuan@outlook.com

(编辑 张爱琴)