

能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望

殷爽睿¹, 艾芊¹, 曾顺奇², 吴琼², 郝然¹, 江迪²

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 广州供电局有限公司, 广东省 广州市 510620)

Challenges and Prospects of Multi-Energy Distributed Optimization for Energy Internet

YIN Shuangrui¹, AI Qian¹, ZENG Shunqi², WU Qiong², HAO Ran¹, JIANG Di²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Driven by renewable power technology, internet technology and other technologies, Energy Internet becomes inevitable trend for traditional energy systems. However, the issues of coordinated operation and control become bottlenecks in its development. The issues are divided into two aspects, multi-energy coordinated operation and distributed collaborative control, in this paper. Basic methods and research challenges of energy hub modeling, multi-energy flow network modeling and optimal operation scheduling are analyzed in detail. Then based on hierarchical and distributed control architecture, application of multi-agent system for Energy Internet operation control is introduced, combined with distributed optimization algorithm. Finally, subsequent developments and research directions of the distributed architectures of coordinated operation and control, multi-energy flow optimization and decentralized trading mode are proposed.

KEY WORDS: energy internet; multi-energy complementation; distributed optimization; energy hub; multi-agent system

摘要: 在可再生能源发电技术、互联网技术等先进技术的推动下, 能源互联网成为传统能源系统发展的必然趋势。考虑到能源互联网的协调运行与控制技术是制约其发展的关键瓶颈之一, 从多能协调运行和分布式协同调控 2 个方面入手, 具体分析了能量枢纽建模、多能流网络建模、优化运行策略等基本方法和研究挑战, 并在分层分布式控制架构的基础上结合分布式优化算法介绍了多智能体系统在能源互联网运行调控中的应用。最后对能源互联网分布式运行与控制体系、多能流优化调控以及去中心化交易模式的发展前景做了进一步展望。

关键词: 能源互联网; 多能互补; 分布式优化; 能量枢纽; 多智能体系统

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2849

0 引言

能源是人类生存的物质保障和社会经济发展的动力源泉, 然而随着全球经济的飞速发展, 能源短缺问题日益凸显。同时, 化石能源的大规模使用所导致的环境污染和气候恶化等问题越来越严重。针对能源与环境领域的紧迫形势, 清洁可再生能源的发展备受关注, 但其消纳问题十分突出, 弃风、弃光现象较为严重, 并且用能侧的能源利用效率较低, 直接制约了我国的经济社会转型。

以物联网、大数据、云计算、移动互联网等为代表的互联网技术的深入发展使其与传统工业相结合的理念备受关注, 能源互联网成为解决分布式可再生能源就地消纳问题、实现多种能源网络紧密融合、提高系统整体能效的必然趋势。美国、德国、欧盟和日本分别开展了 FREEDM 项目、E-Energy 计划、FINSNEY 项目等以寻求在新能源智能并网和能源互联网领域的突破性进展^[1-3]。在能源互联网兴起的大背景下, 我国研究人员于 2012 年开始从能源互联网的基本概念、架构设计、核心技术、关键设备、运行调控等不同层面进行探讨^[4-5]。2016 年, 国家发改委和能源局公布了《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见》, 为我国能源互联网的进一步发展指明了方向。

开放互联作为能源互联网的核心特征之一, 在架构上体现为物理互联和信息互联的融合, 而从运行控制的角度考虑, 则可分为横向互联与纵向互联 2 个层面。一方面, 横向互联主要体现为多种能源的耦合互补。传统的能源系统是分散化的系统, 电

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901302); 国家自然科学基金项目(51577115, U1766207)。

Project Supported by the National Key R&D Plan (2016YFB0901302); National Natural Science Foundation of China (51577115, U1766207).

力系统、热力系统、天然气系统之间虽然在供能侧存在小范围的能源转化；但整体仍表现为各系统的独立规划、运行与控制，导致能源的综合利用效率较低。如何在多能转化技术的支撑下对多能源网络进行集成优化建模，实现综合能源系统的协调运行是解决从能源生产、传输到能源消费等各个环节中存在的能效问题的关键。另一方面，能源互联网的纵向互联体现在源-网-荷-储的协同运行控制。传统能源系统中的负荷具有单一属性，能源单向流动利于集中管理；但在能源互联网中由于分布式可再生能源的大规模接入，用能环节将具有“源-荷”双重属性。集中分级式调控策略因其高敏感性、低鲁棒性而不再适用于这种支持所有参与者对等接入的自由多边互联网架构，这就需要利用能源路由器等控制设备实现多能源系统的分布式优化，打破能源在生产、传输、转化、存储、利用等各个环节存在的壁垒^[6]。此外，分布式的优化方法与控制策略也有利于实现“发用电联合体”的能源互联与共享^[7]，促进源、网、荷深度融合、紧密互动，为能源市场的多边交易提供坚实基础。

针对能源互联网横向与纵向互联的特点，本文首先分析总结了多能协调优化运行问题中的能量枢纽与多能流网络建模方法以及相关优化运行策略，在此基础上对能源互联网分层分布式控制架构和分布式优化调控算法进行了归纳，并介绍了多智能体系统在能源互联网分布式优化中的应用前景，最后对能源互联网在多能分布式优化运行与控制领域的相关研究进行了展望。

1 多能协调优化运行

能源互联网中由于需要考虑电、气、热等不同能源网络间的横向融合问题，可利用能量枢纽作为综合能源系统中的虚拟节点进行辅助建模分析；对于多能源网络中的协调运行问题还需要计及多能流网络建模，同时应选取合适的优化运行策略。其研究关系如图 1 所示。

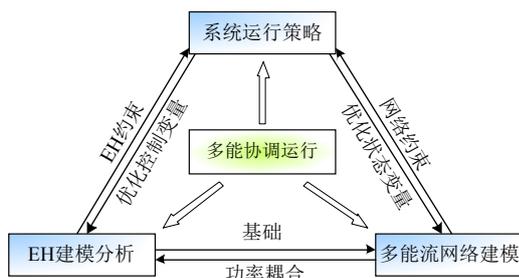


图 1 多能协调运行问题研究关系图
Fig. 1 Research diagram of multi-energy coordinated operation

1.1 能量枢纽建模与分析

能量枢纽(energy hub, EH)又称为能量集线器、能量转换中心，是由苏黎世联邦理工学院于 2007 年首次提出的概念^[8]，被视为能够实现多能互补转化与存储的虚拟实体，一般可用耦合矩阵的形式加以描述。

$$L = CP \quad (1)$$

式中： $P=[P_1, P_2, \dots, P_m]^T$ 为风、光、气、电等注入能源组成的输入变量； $L=[L_1, L_2, \dots, L_n]^T$ 为冷、热、电等能源产品组成的输出变量； C 为转换矩阵，其中的每个元素 c_{ij} 称为耦合因子，并具有如下关系。

$$C = \eta N \quad (2)$$

式中： $\eta=(\eta_{ij})$ 为效率矩阵，其中的每个元素 η_{ij} 为效率因子； $N=(v_{ij})$ 为分配矩阵，相应元素 v_{ij} 为分配因子。可以看出，能量枢纽是一多输入-多输出端口模型，第 i 种形式的能源输出量与第 j 种输入能源用于该种形式输出的分配比例和转化效率成正比。

基于此，研究人员建立并完善了考虑储能设备、需求侧响应、电动汽车、新能源并网的能量枢纽静态数学模型，并提出将多能量枢纽网络中的能量传导器视为特殊的“能量枢纽”进行网络综合建模分析^[9-10]。文献[11]在热电联产(combined heat and power, CHP)机组热电比可调的运行模式下建立了能量枢纽的动态扩展模型。文献[12]建立了包括 CHP、插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)、蓄热室、太阳能电池板和普通家用电器的住宅区能量枢纽模型。对具有相似特性或功能的系统元件可以由已知元件的模型进行类比处理，如电动汽车停车场的集聚模型可视为额定充放电功率与容量随机波动的动态储能模型^[13]；冷热电三联产系统问题中冷负荷可等效为负值的热负荷，考虑将吸收式制冷机的工作特性类比 CHP 系统进行建模^[14]。

然而现有研究对能量枢纽中各元件的动态过程考虑较少，如未计及气热转化中的时延特性等，且缺乏对各环节中存在不确定性的考虑，在复杂系统分析中还需对能量枢纽模型做进一步完善。此外，随着能源互联网中不同能源在转换、传输、分配、存储等各个环节的融合深度逐渐提高，能量枢纽数学模型可能难以用公式直接表达，可考虑利用数据挖掘技术识别和获取能量枢纽的关键参数，对其中相应的输入输出量进行关联分析，这也是能量枢纽智能化建模的下一步研究方向之一。

1.2 多能流网络建模与求解

考虑多种能源网络的交互与融合,多能流网络建模与混合潮流计算成为能源互联网稳态分析的核心问题^[15-16]。包含电能、天然气、热能的多能源网络稳态混合潮流模型的一般表述形式为

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{F}(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{H}(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{C}_{EH}(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{F} 代表电力系统潮流方程; \mathbf{G} 为天然气系统代数方程, 包括支路流量方程、压力回路方程、压力损失方程等; \mathbf{H} 表示由支路水力方程、压力回路方程、节点工质混合方程等组成的热力系统能流方程; \mathbf{C}_{EH} 为能量枢纽的输入输出耦合方程; x_e, x_g, x_h, x_{eh} 分别代表电力系统、天然气系统、热力系统以及能量枢纽的相关变量。对于含多个能量枢纽的多能源系统, 各能量枢纽与传输网络间的功率流向关系也可用矩阵的形式进行表述

$$\begin{bmatrix} P_{1\alpha} \\ P_{2\alpha} \\ \vdots \\ P_{m\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{m1} & \gamma_{i2} & \cdots & \gamma_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1\alpha} \\ T_{2\alpha} \\ \vdots \\ T_{n\alpha} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $P_{i\alpha}$ ($i=0, \dots, m$) 为与载能体 α 相连的第 i 个能量枢纽的对应输入功率; $T_{j\alpha}$ ($j=0, \dots, n$) 为含有载能体 α 的第 j 条传输通道; m, n 分别为能量枢纽与传输通道的数量; $\mathbf{H}_\alpha = (\gamma_{ij})$ 为 α 的网络连接矩阵, 由 $\{0, 1, -1\}$ 3 种元素构成, 0 表示对应 EH 与传输通道不存在 α 的功率交互, 1、-1 分别表示对应 EH 中载能体 α 的流入和流出。

注意到电、热、气 3 种能源网络均遵循基尔霍夫第一、第二定律, 有学者提出对多能流网络进行“同质化”耦合建模, 并引入了“热阻”的概念类比电网模型对热力系统进行分析^[17]。但由于电流、热流、气流在传输过程中遵循的物理机理不尽相同, 热力网模型中的支路水力方程、支路热力方程和节点工质混合方程以及天然气网模型中的支路流量方程在电网模型中均无法找到类似表述, 故在能源互联网短期优化调度和超短期精确控制中的应用存在较大难度。

在混合潮流的求解方法上, 现有研究主要可分为统一求解法与解耦求解法两类。采用统一求解法时需要将不同能源网络方程联立进行统一迭代求解, 导致非线性方程的维数和决策变量个数大幅增

加, 对求解过程要求较高, 可采用扩展 Newton-Raphson 法或其他迭代算法^[18]。而解耦求解法则是通过对能源耦合部分的能量作等值处理将混合潮流方程分配到不同的能源网络独立求解, 从而降低了问题难度^[19]。但解耦求解法存在不同能源网络的求解顺序问题, 可能出现后求解的系统潮流不收敛的情况, 需要对已求解的系统调整参数进行重新计算直到所有系统潮流均收敛为止。在功率流的优化计算方面, 可以将求解过程分为配电网三相潮流计算、燃气管网潮流计算及 EH 潮流计算、系统优化计算 3 个模块进行^[20], 从而提高计算效率。也有学者将 TLBO (teaching-learning-based optimization) 优化算法应用于求解多能源系统的最优功率流问题, 并综合考虑了能源与环境效益^[21]。

以上研究主要基于电-气-热系统的稳态能量流模型, 未考虑天然气网和热力网的慢动态特性, 可能导致计算结果脱离实际。因此, 在能源互联网运行规划与实时调度中需要计及多能源系统传输过程存在的不同时间尺度的影响, 引入天然气网与热力网的暂态能量流模型作进一步完善。对于天然气网, 其暂态模型主要考虑能量守恒、质量守恒及牛顿第二定律在天然气管道流量方程中的偏微分表述形式, 而在气体流量温度与环境温度相同时可忽略能量守恒公式^[22]。具体描述为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial P_{\text{gas}}}{\partial t} + G\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{F\rho v |v|}{2D} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: l 为管道长度; t 为时间; ρ 为天然气密度; v 为天然气轴向流速; P_{gas} 为天然气压力; G 为重力加速度; H 为高程; F 为摩擦因子; D 为管道内径。热力网的暂态模型主要考虑热流体温度在管网、换热器、散热器处的动态变化^[23], 如管网支路中的热流体温度可简单表示为关于时间 t 和空间位置 x 的函数 $T(t, x)$, 相应关系式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha T = 0 \quad (6)$$

式中 α 为管道的热损耗系数。总的来说, 天然气网和热力网的动态工况模型因系统连接方式、用户使用习惯及运行控制水平的不同而变化, 在能源互联网多时间尺度混合潮流模型中可根据实际情况进行适当简化。

此外, 由于能源互联网中可再生能源的高渗透率以及高比例柔性负荷的参与, 上述混合潮流模型

中还需要考虑不确定因素在不同能源网络间的传播问题。但目前这方面的研究成果较少，如何类比电力系统随机潮流建立能源互联网随机混合功率流模型进行分析计算将是接下来的研究重点之一。

1.3 优化运行策略

基于上述能量枢纽和多能流网络的建模方法与分析，可将能源互联网中的优化运行问题分为2层：第1层是以多能源最优混合潮流为核心的跨区级和区域级的能量优化调度^[15]；第2层是根据某一能量枢纽内的设备配置及系统约束决定各时段该能量枢纽内部的能源分配、转化与存储策略等^[24]。

单个能量枢纽的运行优化问题由于不需要考虑混合潮流计算，使其相较于跨区级和区域级的能源互联网优化调度更容易求解。优化模型中通常将能量枢纽与其连接的分布式电源和负荷等视为一个整体进行分析，选取能量枢纽运行成本最低、能效最高、碳排放量最少等为目标函数^[11]，能源分配系数、CHP 热电比、需求响应(demand response, DR)功率等为决策变量^[25]。约束条件包括能量平衡约束、能源网络输入功率限制与机组出力限制等技术条件约束，发电机与储能设备等运行特性约束以及需求响应约束等。相应优化问题的一般建模思路如图2所示。

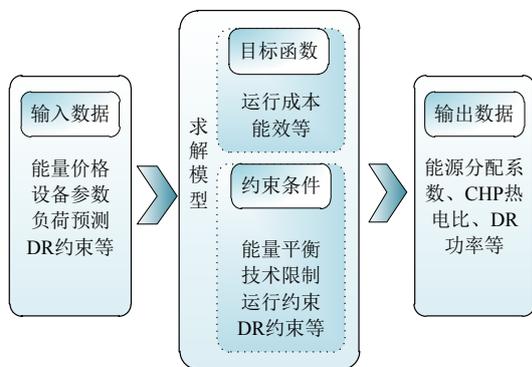


图2 优化运行问题建模思路

Fig. 2 Modeling approach of optimal operation issues

考虑到热电负荷、市场价格和风速等系统的不确定性，可采用随机规划方法研究能源市场环境下的能量枢纽最优运行问题^[26]。对于计及 CHP 机组运行约束及储能元件寿命等因素所带来的优化模型非凸性，运用混合整数线性规划方法建模分析并利用数值方法与人工智能算法相结合的手段进行求解是解决该问题的有效途径^[27-28]。但现有研究对多能源系统中包含用户进行用能形式切换的综合能源需求响应考虑还不够充分。同时，由于能源互联网支持分布式设备即插即用的特点，如何在能量枢纽优化建模中考虑其组成元件及拓扑结构变化

造成的影响是一个亟待解决的问题。

对于跨区级和区域级的能源互联网，多个能量枢纽以虚拟节点的形式接入电网、热网、燃气网等多能源网络，其整体的优化调度就需要研究多能源最优混合潮流问题^[29]。结合式(3)所示的多能源网络稳态混合潮流方程建立的能源互联网优化调度模型^[14]为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中： \mathbf{x} 为状态变量，包括电力系统中的电压、电流，天然气系统的气压、流量，热力系统的热媒温度、流量^[30]，能量枢纽的交换功率等； \mathbf{u} 为控制变量，包括电力系统发电单元出力，天然气系统压缩机变比，热力系统的热源出力，能量枢纽分配系数等。目标函数 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 的选取通常要考虑能源互联网的经济效益和环境效益。等式约束 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u})=0$ 主要包括网络混合潮流平衡方程、能量枢纽内部能量方程、网络与能量枢纽耦合方程；不等式约束 $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$ 主要包括技术约束、系统运行约束、能量枢纽自身约束等。

上述模型主要适用于区域能源互联网稳态运行模式下的长时间尺度优化调度方案，而对于能源互联网的故障状态或异常状态，则需要采用自适应的协调优化模型，计及线路、设备故障等突发因素对能源互联网运行的影响^[31]。另一方面，主干电网作为能源互联网的核心支撑网架，各区域综合能源系统在实现自治多能协调优化的同时应保证电网的电压质量和稳定性。此外，考虑到大规模可再生能源接入等不确定因素影响下广域多能源系统的复杂性与随机性，多能协调运行策略由集中式优化向分布式优化的转变已成为一种必然趋势。在能源互联网的分层分布式控制结构下采用分布自治的运行调控模式可降低优化模型的求解难度，该部分内容将在下一节中详细介绍。

2 分布式协同优化调控

2.1 分层分布式控制架构

能源互联网在源-网-荷-储一体化纵向互联方面具有可再生能源发电渗透率较高、混合潮流双向流动、大规模分布式设备平等接入、即插即用等特点，采用传统的集中式调控方法需要在式(7)的基础上建立一个非线性高维数优化模型，并设计一个能够处理海量数据的集中控制器用于判断网络各节

点的运行状况^[4,23]，导致计算时间较长，且由于通信延迟问题使其计算准确性无法保障。同时，大量分布式设备的即插即用使能源互联网的拓扑结构可能随时发生变化，集中式优化方案将难以适用。针对上述问题，分层分布式优化方法逐渐成为能源互联网协调运行与控制的研究热点，其与多智能体系统的有机结合为能源互联网的智能调控提供了有效解决途径。

相较于分布式控制，分层控制策略研究起步较早并已在电力系统中获得了广泛应用。传统分层方式通常是按照网络的物理结构进行划分，如先按照电压等级分层，再考虑地域和网架结构等因素进一步分为若干区域。这样的分层方式在应对故障隔离、局部系统变更等情况时具有明显优势，有利于提高系统整体的可靠性、灵活性及可扩展性。然而，多区域多层次的协调控制会造成大量的通信延时问题，影响系统的整体运行效率。基于此，有学者提出按照功能进行分层的思路，将能源互联网视为由能源路由器层、能源交换机层和能量接口层组成的 3 层结构，分别实现区域能源互联网与传统电网的连接、能源子网与能源路由器的连接以及分布式设备与能源子网的连接^[32]。采用功能分层控制结构进行能量平衡控制、供电质量调节和经济优化调度，不仅提高了系统整体运行效率，而且易于实现能源互联网的标准化和模块化。

基于物理与功能分层优化调控策略的思想，图 3 给出了能源互联网基本控制架构示意图。

在该分层分布式控制架构下，能源互联网中的多个能源子网通过主干网架实现多种能源的功率交换，其控制方式与传统模式的不同主要体现在信

息流的交互方面。每个能源子网都具有一个或少量主导节点和多个自治节点，其中，主导节点对整个网络的信息互联起到了关键作用。一方面，主导节点通过 2 种路径与外界相连，一种是与上级控制层直接互联，另一种是与相邻能源子网的主导节点相连。正常运行时，邻接主导节点间的信息交互即可实现广域的分布式调控；特殊或紧急情况下上级控制层可直接将控制指令下达给各个主导节点，实现集中与分布式控制的统一。另一方面，主导节点负责将从外界收集到的信息汇总整理，并转发给所在能源子网内相邻的自治节点，再由自治节点间的邻接信息通道将信息传递给其余自治节点，从而实现区域内的分布式调控。

分布式协同控制方法在处理能源互联网中大量分布式资源不确定性与波动性的底层控制问题上表现出巨大潜力。分布式调控手段无需建设复杂的通信网络，其通过各分布式可控单元与其他邻近单元通信，结合收集到的有限状态信息进行迭代控制，取代了传统集中控制器的作用，并可在“激励-响应”模式下快速响应分布式设备的频繁状态波动。

2.2 分布式优化调控算法

分布式控制方法在解决实际问题中广泛应用的全分布式优化算法主要有一致性算法和分布式次梯度算法。其中，一致性算法的基本思想是通过各节点与相邻节点的信息交互，选取适当的分布式协议更新自身的关键变量，如电压、频率、温度等，最终使得网络中所有节点的关键变量收敛于相同的群体决策值。对于具有 n 个节点的有向网络 G ，令 $x_i[k]$ 代表节点 v_i 在离散时间 k 时的关键变量， N_i 代表节点 v_i 所有相邻节点的集合，则基于离散时间的一阶一致性算法^[33]可表述为

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j[k] \tag{8}$$

写成矩阵形式

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{D}[k]\mathbf{x}[k] \tag{9}$$

式中 d_{ij} 为状态转移矩阵 $\mathbf{D}[k]$ 的系数，由通信网络拓扑结构决定，当 $v_j \notin N_i$ 时， $d_{ij} = 0$ 。

分布式次梯度算法作为另一种重要的全分布式优化算法，其主要思路是：每个分布式自治单元通过其自身的目标函数信息（即目标函数的次梯度）对决策变量进行估计，并与网络中的其他自治单元直接或间接地交换这些估计用于下一次的迭代更新，最终给出全局目标最优时的决策变量。对

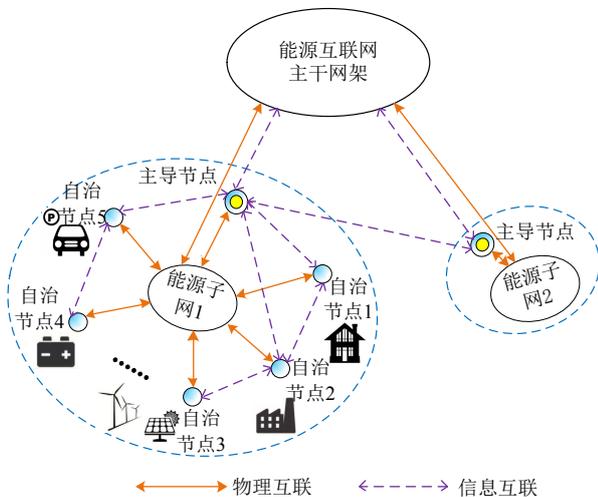


图 3 能源互联网分层分布式控制架构

Fig. 3 Hierarchical and distributed control architecture for energy internet

于以下无约束凸优化问题

$$\min \sum_{i=1}^n f_i(x) \quad \text{s.t. } x \in F^n \quad (10)$$

用 $x_i[k] \in F^n$ 表示自治单元 i 在第 k 步迭代对决策变量 x_i 的估计值。在不考虑通信时延的情况下，自治单元 i 对估计值的更新方式^[34]如下。

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n a_{ij}[k]x_j[k] - d_i[k]s_i[k] \quad (11)$$

式中： $a_{ij}[k]$ 为单元 i 与单元 j 的通信权重系数；标量 $d_i[k] > 0$ 是代理 i 的迭代步长；向量 $s_i[k]$ 是单元 i 的目标函数 $f_i(x)$ 在点 $x = x_i[k]$ 的偏转次梯度。同时，次梯度算法在信息交换过程中还需要满足权重规则、连通性规则和通信频率规则。考虑到分布式稀疏通信网络拓扑属于无向图，从式(9)(11)可知，若偏转次梯度 $s_i[k]$ 可以由 $x_j[k]$ ($j=1,2,\dots,n$) 线性表示，则一致性算法可视为一种特殊的次梯度算法。如在分布式电源的有功功率经济分配问题中，目标函数的次梯度信息即各分布式电源的成本微增率，由于优化问题的最优解即为等微增率点，而等微增率点又可视作以成本微增率为决策变量的一致性问题的群体决策值^[35]，这样，次梯度优化算法便退化为一一致性算法。

一致性算法与次梯度算法在应对网络拓扑结构的改变时仅需分别对状态转移矩阵 $D[k]$ 和通信权重系数 $a_{ij}[k]$ 作相应修改，可靠性高，时效性强且便于扩展，适用于能源互联网分布式设备的“即插即用”，从而成为了分布式协同调控研究中的热点。一方面，考虑到一致性算法可快速获取全网各节点状态变量的平均值、最大值和最小值等信息，其与下垂控制相结合可实现电压、电流等的全局协同控制^[36]。另一方面，由于次梯度算法中本就包含优化模型信息，同时考虑上述一致性问题与分布式优化问题的相关性，次梯度算法与一致性算法可广泛应用于能源互联网区域自治优化调度及频率快速恢复^[37-39]，在维持多能源系统的实时供需平衡的前提下降低全网的调节成本。

然而一致性算法与次梯度算法均只有一阶收敛性，收敛速度较慢，故有学者提出采用具有超线性收敛速度的分布式算法，如分布式牛顿法^[40-41]，但其在应用时对包含二阶梯度信息的海森矩阵 H_k 的求逆过程耗时较长，且由于多能耦合模型的复杂性，实现 H_k^{-1} 的分布式求解十分困难，在能源互联网中的适用性有待进一步讨论。另一方面，由于成

本微增率等优化目标函数的(次)梯度信息和二阶梯度信息属于各分布式单元的私有信息，对所属不同主体的分布式设备进行信息交互会造成能源互联网参与者隐私泄露，而采用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM) 仅需交换“期望交换功率”等信息，可有效解决这个问题，符合未来能源市场的交易要求^[42-43]。此外，考虑到上述方法主要应用于凸优化问题，当优化目标或可行域非凸时，其收敛性无法保证。因此，在解决能源互联网中考虑最优功率流等非凸优化问题时可考虑运用二阶锥松弛、序列凸近似^[44-45]等方法将问题转化为凸优化问题继续求解。

2.3 多智能体系统的应用

上文中已经提到，实现分层分布式优化策略需要具有自治控制和响应调控指令能力的分布式可控单元的参与，而这些分布式可控单元就相当于不同的智能体，从而构成了多智能体系统(multi-agent system, MAS)。多智能体系统也称为多代理系统，广义来讲，MAS 可视为分布式人工智能的应用，其中的每个智能体能够充分发挥自主性并具有与系统中其他智能体交互、协调、达成一致的社会能力^[46]。

在多智能体系统中，每个智能体可依据图 4 中的 Agent 工作流程按照不同功能设计成双层控制结构。在上层控制中，各 Agent 通过感知器接收所在代理区域的状态信息后交由事件处理分发器进行数据的分类和预处理，并映射到相应场景。在该场景下，各 Agent 利用通信系统与其他 Agent 进行协

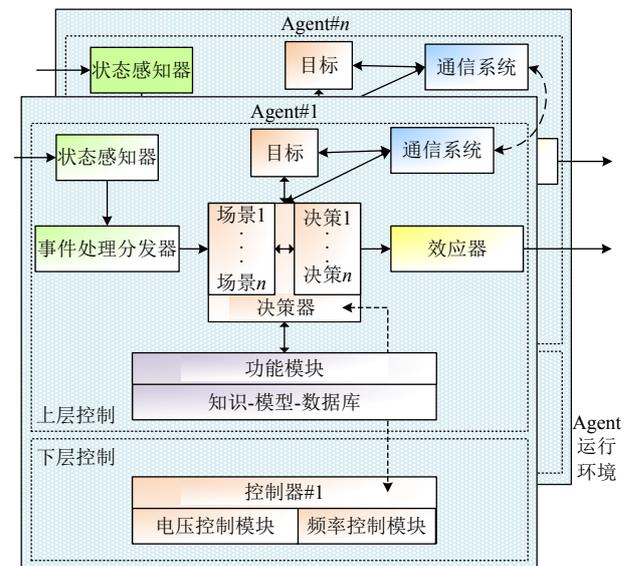


图 4 智能体工作流程
Fig. 4 Workflow of agent

商与合作确立最优目标,并根据此目标在决策器中选择适当的决策;随后在功能模块已有知识或规则支持下制定响应计划;最后通过效应器作用于系统运行环境。下层控制主要包含电压控制、频率控制等功能,以保证区域供需平衡和安全稳定运行,实现自律调控^[47]。

在广义能源互联网中,智能体的概念可做进一步扩展。基于分层分布式的优化调控结构,电力系统、热力系统、天然气系统和智能化交通系统可设计为顶层智能体;中间层智能体由区域能源子网或广义虚拟电厂(generalized virtual power plant, GVPP)构成,是整个多能源系统分层分布式架构中最关键、最复杂、最多样的一环;底层智能体则负责各种分布式设备的即插即用与协同控制,大多数设置在各分布式设备的能源接口处^[48]。其中,中间层智能体在能源互联网中处于决定性地位,是联系顶层智能体与底层智能体的纽带,主要包括能量枢纽智能体、能源路由器智能体、微电网智能体等,通过分工合作完成接收顶层智能体综合调控指令,与邻接中间层智能体通信以及制定并下发模式切换策略和功率控制指令等功能,从而实现不同能源子网间的协调运行。中间层智能体与底层智能体的出现弱化了顶层智能体的调控功能,使得能源互联网由传统电网的垂直结构向扁平化发展。

多智能体系统作为分布式优化算法实现的基础,在能源互联网分布式调控中的应用十分广泛。文献[49]基于多智能体一致性算法,设计了一种用于分布式发电的新型分布式协调控制器,以解决能源互联网中因分布式发电单元输出电压幅值和相角间微小差异而引起较大循环电流的问题。在能源互联网经济运行方面,多智能体优化策略被广泛应用于有功功率和频率的精确控制^[50]以及分布式电源竞价机制制定^[51]等领域。同时,作为能源互联网中的关键接口设备,能源路由器可视为一种特殊的管理智能体,其相关设计与控制问题也备受关注^[52-54]。多智能体优化理论为能源互联网的分层分布式调控提供了新的思路,但对于网络中复杂的多能耦合分布式优化问题,如何改进现有的分布式优化算法与多智能体交互机制,来减少分布式控制器的计算时间并适应能源互联网多时滞^[55]、变拓扑结构的特点,还有待进一步研究。此外, MAS 在能源互联网中的应用还需要解决标准化的开发平台与通信语言以及模块化、高度集成化的电子互联技

术等关键问题。

3 研究展望

能源互联网的多能分布式优化问题涉及领域十分广泛,需要多智能体、信息物理融合、智能能源管理等理论的应用和信息通信、电力电子、新型储能、能源转换等先进技术的支撑。在能源互联网的研究热潮中,新的理念与思路不断涌现,如何选取合适的运行控制体系和机制,如何实现多能流分布式优化调控,如何设计适应能源互联网的商业运营模式,成为未来的主要研究方向。

1) 分布式运行控制体系。

目前在电力系统中广泛应用的先分层后分区的运行控制体系从电能传输与利用的角度将整个电网主要分为输电和配电2层。但由于在能源互联网中间歇性分布式可再生能源的渗透率大幅提升,呈现出源-网-荷-储深度融合的特点,同时不同能源的耦合互补也使得多能源系统具有调度灵活性、多样性,导致能源传输环节的控制作用被大大削弱。因此,有必要将上文所述的分层分布式控制架构结合智能电网 Web of Cell(WoC)体系“弱中心化”的思想^[56]构建能源互联网运行与控制新体系,将能源互联网分成若干个结构较为简单的能源自治区域(Cell),区内集中自治,区间分散协调,从而实现全局的优化运行。每个能源子网并不是单一的供能侧或用能侧,而是可以包含能源生产、传输、分配、使用等各个环节,结合开放系统互连模型(open system interconnection/reference model, OSI/RM)按功能划分不同的层次结构^[57],如图5所示。该体系可以在不改变现有能源系统网架结构和地理边界的情况下实现能源互联网的群体智能化,具有良好的发展前景,是下一步研究需要关注的重点。

2) 多能流分布式优化调控。

目前,分布式优化调控研究多集中于主动配电

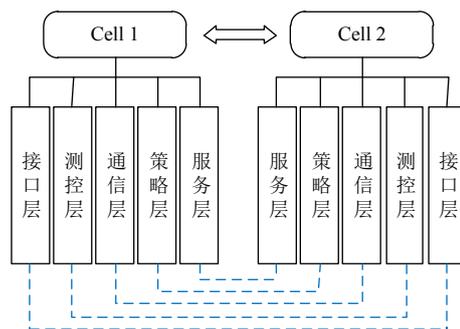


图5 基于 WoC 体系的功能分层结构
Fig. 5 Functional layering structure based on WoC system

网层面或互联微电网系统,对于包含多能量枢纽的多能源系统涉及较少,尤其是考虑到能源互联网多能流耦合、多时空尺度、多智能体控制的运行方式,需要对现有的分布式优化策略进行改进和创新^[58]。首先,由于不同能源系统的量测精度差异,需要研究稀疏通信网络下的分布式状态估计算法,满足各能流耦合环节信息交互的快速性与可靠性要求。在此基础上,针对不同能流系统响应时间的差异以及动态过程的相互影响,需要提出多优化周期的分布式多能流调控模型,研究多重优化模型下不同分布式优化算法的适用性问题,并考虑针对可再生能源出力等不确定性的模型预测控制^[59]。此外,在人工智能兴起的大背景下,未来能源互联网应是能源调控方式与人类行为紧密耦合的信息-物理-社会融合系统,如何利用调度机器人群体的平行机器学习^[60]实现多能源系统的分布调控将是具有前瞻性和开创性的研究课题。

3) 能源市场去中心化交易模式。

在能源互联网分布式运行体系下,电网调度中心的主导地位将逐渐弱化,需要对供电、用能、储能及中间商等交易实体采用基于分散化决策和帕累托最优的微平衡交易模式^[61]。但由于目前还未建立起协同多能源系统的跨平台商业模式和激励相容机制,如何利用区块链技术协同自治、去中心化、合约执行自动化及可追溯性的特点构建高效透明、广泛参与和全面信任的金融交易体系,形成面向分布式交易主体的可交易能源系统是实现能源互联网信息-物理-社会系统与金融体系之间立体化融合的关键^[62-65]。然而我国区块链技术在能源互联网中的发展还处于理想化的场景分析阶段,面临计算能力不足、网络信息安全保障不充分、智能合约责任主体不明确等技术瓶颈,同时缺乏相应的政策约束与监管体系,需要结合能源互联网基础设施建设与改造进程探索分阶段的能源市场化发展策略,丰富去中心化交易模式的理论基础与工程实证。

4 结语

针对能源互联网开放互联、以用户为中心、共享对等的特点,相关协调运行与控制问题成为限制其规模与融合深度的瓶颈之一,需要分布式优化策略与调控技术的支撑。本文基于能源互联网“横向多能互补,纵向源-网-荷-储一体化协调”的互联模式,从能量枢纽建模、多能流网络建模与优化运行策略3个方面对多能协调运行优化基本方法和研究现状做了简要介绍与评述。随后,在分层分布式

控制架构的基础上分析了适用于分布式设备广泛接入、即插即用的分布式优化算法与控制策略,并进一步介绍了多智能体系统的应用现状。最后展望了能源互联网在运行控制体系、多能流优化调控以及能源市场交易模式等方面的发展前景,对于日后能源互联网的应用与实践具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
Tian Shiming, Luan Wenpeng, Zhang Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494(in Chinese).
- [3] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
Zeng Ming, Yang Yongqi, Liu Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124(in Chinese).
- [4] 董朝阳, 赵俊华, 文福栓, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [5] 张涛, 张福兴, 张彦. 面向能源互联网的能量管理系统研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 146-155.
Zhang Tao, Zhang Fuxing, Zhang Yan. Study on energy management system of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 146-155(in Chinese).
- [6] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
Chen Qixin, Liu Dunnan, Lin Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet(1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [7] 周海明, 包喜春, 赵琦. 能源互联网结构及其典型应用模式[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6619-6626.
Zhou Haiming, Bao Xichun, Zhao Qi. Research on the framework and typical application pattern of the energy interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6619-6626(in Chinese).
- [8] Geidl M, Koepfel G, Favre-P P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [9] Zhang X J, Karady G G, Ariaratnam S T. Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 246-253.
- [10] 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 CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [11] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统

- 分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.
- Hao Ran, Ai Qian, Zhu Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178(in Chinese).
- [12] Rastegar M, Zareipour H. A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2217-2227.
- [13] Mortaz E, Valenzuela J. Microgrid energy scheduling using storage from electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2017(143): 554-562.
- [14] Chicco G, Mancarella P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. Energy, 2009, 34(3): 261-273.
- [15] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
- Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305(in Chinese).
- [16] 杨帅, 陈磊, 徐飞, 等. 基于能量流的电热综合能源系统弃风消纳优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 417-426.
- Yang Shuai, Chen Lei, Xu Fei, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electrical-thermal power system based on power flow model[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 417-426(in Chinese).
- [17] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3479.
- Dai Yuanhang, Chen Lei, Min Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470-3479(in Chinese).
- [18] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.
- Wang Yingrui, Zeng Bo, Guo Jing, et al. Multi energy flow calculation method of an electric thermal gas integrated energy system[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950(in Chinese).
- [19] 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).
- [20] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑配电网重构的区域综合能源系统最优混合潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 18-24.
- Jin Xiaolong, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al. Calculation of optimal hybrid power flow for integrated community energy system considering electric distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 18-24(in Chinese).
- [21] 孙秋野, 赵美伊, 陈月, 等. 能源互联网多能源系统最优功率流[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1590-1598.
- Sun Qiuye, Zhao Meiyi, Chen Yue, et al. Optimal energy flow of multiple energy systems in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1590-1598(in Chinese).
- [22] 卫志农, 梅建春, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 41-47.
- Wei Zhinong, Mei Jianchun, Sun Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47(in Chinese).
- [23] 王赫. 供热系统动态特性的模拟研究及在电力调峰中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [24] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 176-194.
- Sun Qiuye, Teng Fei, Zhang Huaguang. Energy internet and its key control issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(2): 176-194(in Chinese).
- [25] Rastegar M, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. Home load management in a residential energy hub[J]. Electric Power Systems Research, 2015(119): 322-328.
- [26] Vahid-P M J, Nojavan S, Mohammadi-I B, et al. Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response[J]. Energy Conversion and Management, 2017(145): 117-128.
- [27] Dzobo O, Xia X. Optimal operation of smart multi-energy hub systems incorporating energy hub coordination and demand response strategy[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2017, 9(4): 1489-1497.
- [28] Huo D, Le Blond S, Gu C H, et al. Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018(95): 36-46.
- [29] Shabanpour-Haghighi A, Seifi A R. Energy flow optimization in multicarrier systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(5): 1067-1077.
- [30] 顾伟, 陆帅, 王琚, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1315.
- Gu Wei, Lu Shuai, Wang Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315(in Chinese).
- [31] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.
- Pu Tianjiao, Chen Naishi, Wang Xiaohui, et al. Architecture analysis and application design of multi source cooperative optimization dispatching for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23(in Chinese).
- [32] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571-4580.
- Sun Qiuye, Wang Bingyu, Huang Bonan, et al. The optimization control and implementation for the special energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580(in Chinese).
- [33] Zhang Z A, Chow M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [34] 蔡高原. 多微网互联系统动态经济调度研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [35] 吴莹, 章雷其, 赵睿, 等. 稀疏通信下分布式电源微增率一致性加速算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 86-92.
- Wu Ying, Zhang Leiqi, Zhao Rui, et al. Consensus acceleration algorithm of incremental cost rate for distributed generators under

- sparse communication network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 86-92(in Chinese).
- [36] 顾伟, 薛帅, 王勇, 等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 49-55.
Gu Wei, Xue Shuai, Wang Yong, et al. Finite-time consensus based distributed cooperative control for DC Microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 49-55(in Chinese).
- [37] 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(6): 1579-1589.
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).
- [38] Xu Y L, Zhang W, Liu W X, et al. Distributed subgradient-based coordination of multiple renewable generators in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 23-33.
- [39] Wang Z G, Wu W C, Zhang B M. A fully distributed power dispatch method for fast frequency recovery and minimal generation cost in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 19-31.
- [40] Mokhtari A, Ling Q, Ribeiro A. An approximate Newton method for distributed optimization[C]//IEEE ICASSP. IEEE, 2015: 2959-2963.
- [41] 陈刚, 杨毅, 杨晓梅, 等. 基于分布式牛顿法的微电网群分布式优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 156-162.
Chen Gang, Yang Yi, Yang Xiaomei, et al. Distributed optimization scheduling method for microgrid cluster based on distributed Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 156-162(in Chinese).
- [42] 李佩杰, 陆镛, 白晓清, 等. 基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2428-2435.
Li Peijie, Lu Yong, Bai Xiaoqing, et al. Decentralized optimization for dynamic economic dispatch based on alternating direction method of multipliers[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2428-2435(in Chinese).
- [43] 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(9): 2675-2681.
Wang Cheng, Liu Nian. Distributed optimal dispatching of interconnected microgrid system based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2675-2681(in Chinese).
- [44] Zheng W Y, Wu W C, Zhang B M, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [45] Molzahn D K, Dörfler F, Sandberg H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [46] 艾芊, 刘思源, 吴任博, 等. 能源互联网中多代理系统研究现状与前景分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2697-2706.
Ai Qian, Liu Siyuan, Wu Renbo, et al. Research and prospect of multi-agent system in energy internet system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2697-2706(in Chinese).
- [47] 蒲天骄, 刘克文, 李焯, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1864-1874.
Pu Tianjiao, Liu Kewen, Li Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy-cooperative optimization control on active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874(in Chinese).
- [48] 高扬, 艾芊. 基于多智能体系统的微电网联络线潮流精确控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 140-146.
Gao Yang, Ai Qian. Precise control of tie-line power for microgrid based on multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 140-146(in Chinese).
- [49] Sun Q Y, Han R K, Zhang H G, et al. A multi-agent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006-3019.
- [50] 郝然, 艾芊, 朱宇超. 基于多智能体一致性的能源互联网协同优化控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 10-17.
Hao Ran, Ai Qian, Zhu Yuchao. Cooperative optimal control of energy internet based on multi-agent consistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 10-17(in Chinese).
- [51] 孔祥玉, 曾意, 陆宁, 等. 基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1626-1633.
Kong Xiangyu, Zeng Yi, Lu Ning, et al. Optimal bidding management for agent-based microgrid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1626-1633(in Chinese).
- [52] 曹阳, 袁立强, 朱少敏, 等. 面向能源互联网的配网能量路由器关键参数设计[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3094-3101.
Cao Yang, Yuan Liqiang, Zhu Shaomin, et al. Parameter design of energy router orienting energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3094-3101(in Chinese).
- [53] 田兵, 雷金勇, 郭晓斌, 等. 多接口能源路由器主回路结构及功能仿真[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 16-21.
Tian Bing, Lei Jinyong, Guo Xiaobin, et al. Main circuit structure and function simulation of multi-interface energy router[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 16-21(in Chinese).
- [54] 江渝, 叶泓炜, 张青松, 等. 能源互联网中基于 Dijkstra 算法的分布式电能路由策略的实现[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2071-2078.
Jiang Yu, Ye Hongwei, Zhang Qingsong, et al. Implementation of distributed power routing strategy based on Dijkstra algorithm in energy internet[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2071-2078(in Chinese).
- [55] Dou C X, Yue D, Guerrero J M, et al. Multi-agent-system-based distributed coordinated control for radial DC microgrid considering transmission time delays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2370-2381.
- [56] 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(in Chinese).
- [57] 吴克河, 王继业, 朱亚运. 基于 OSI 的能源互联网模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 685-695.
Wu Kehe, Wang Jiye, Zhu Yayun. Study of energy internet model based on OSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 685-695(in Chinese).
- [58] 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.
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(in Chinese).
- [59] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3451-3462.

- Zhang Yan, Zhang Tao, Liu Yajie, et al. Stochastic model predictive control for energy management optimization of an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3451-3462(in Chinese).
- [60] 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(in Chinese).
- [61] 刘敦楠, 唐天琦, 杨建华, 等. 面向能源互联网的微平衡调度交易设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 1-8.
- Liu Dunnan, Tang Tianqi, Yang Jianhua, et al. Energy internet based micro balance dispatching and trading design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 1-8(in Chinese).
- [62] 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): 4011-4022.
- 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): 4011-4022(in Chinese).
- [63] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
- Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [64] 杨德昌, 赵肖余, 徐梓潇, 等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3664-3671.
- Yang Dechang, Zhao Xiaoyu, Xu Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671(in Chinese).
- [65] 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, 42(3): 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, 42(3): 1-7(in Chinese).



殷爽睿

收稿日期: 2017-12-01。

作者简介:

殷爽睿(1995), 女, 博士研究生, 研究方向为能源互联网及虚拟电厂优化运行, E-mail: yinsr28@sjtu.edu.cn;

艾芊(1969), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电、微电网、人工智能及其在电力系统中的应用, E-mail: aiqian@sjtu.edu.cn;

曾顺奇(1986), 男, 工程师, 硕士, 从事配电网规划运行研究;

吴琼(1972), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统生产和技术管理工作;

郝然(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网运行控制;

江迪(1973), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电力需求侧管理工作。

(责任编辑 徐梅)