

园区能源互联网的规划与运行研究综述

王 奖, 邓丰强, 张勇军, 苏洁莹, 谢小瑜

(华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心, 广东 广州 510641)

摘要: 园区能源互联网作为“源-网-荷-储-充”协调互补的能源系统, 具有多能耦合互补的特性, 有助于降低社会供能成本, 提升能源利用效率。首先阐述了园区能源互联网的内涵, 对其进行结构划分, 并讨论了园区能源互联网的功率平衡模型与电-气-热网潮流模型; 然后分别从设备规划、多能流优化调度、负荷侧多类型响应和计及储能的优化调度4个环节对该领域的研究现状进行了综述; 最后对有待深入研究的方向进行了展望, 分析了园区能源互联网在广义规划、智能优化以及市场交互方面的研究前景, 以期对园区能源互联网规划与运行未来的研究提供参考。

关键词: 园区能源互联网; 能源集线器; 规划; 优化调度

中图分类号: TM 715; TK 01

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202011021

0 引言

随着我国经济发展对能源需求的日益提高, 其面临的环境污染、能源利用效率以及可再生能源消纳问题, 使“多能互补”“源-网-荷-储”高度协调的能源互联网技术^[1]成为能源领域的研究热点。我国提出的“互联网+智慧能源”计划^[2]描绘了未来能源互联网愿景, 指出了充分考虑电、气、热等不同形式能源之间的耦合是构建能源互联网的重要基础^[3-4]。

园区能源互联网 PEI (Park Energy Internet) 是基于电力与天然气网络, 在园区级用户侧建立的多能耦合系统, 考虑了园区中多种能源的转换、分配与有机协调^[5], 并强调园区与用户的各种互动行为。随着电力体制改革的深化, 园区建设能源互联网成为我国能源转型的一个新趋势, 但如何进行科学规划和保障高效运行, 还缺乏现成的经验。研究 PEI 的经济规划与运行, 挖掘其用户侧响应与消纳新能源的潜力, 探讨园区不同主体间的交互与市场技术, 将提升 PEI 的经济性与环保性, 保障其安全稳定运行, 具有重要研究意义。

PEI 的规划与运行主要关注园区内能源生产、转换、储存设备与终端能源用户的统筹规划与调度, 并侧重于不同能源间的协同优化与分配^[6]。苏黎世联邦理工学院于 2007 年提出的能源集线器^[7]概念以高度抽象的数学形式体现了能源的转化、分配与储存功能, 是能源互联网中多种能源相互转化的中心^[8]。该模型通过矩阵的形式描述了 PEI 中各种能源以及设备间的数学关系, 是研究 PEI 中多种设备

耦合、各种能源平衡关系的基础模型。在此基础上, 对 PEI 中电、气、热三大耦合网络进行联合建模, 考虑由各网络之间耦合带来的安全稳定运行问题。基于能源集线器的 PEI 能量关系建模和 PEI 耦合网络建模共同构成了 PEI 规划与运行研究模型的基本框架。

近年来, 国内外学者针对 PEI 的规划与运行问题展开了大量研究, 对园区设备规划、耦合调度、不确定性处理及需求响应等各种技术进行了较多的讨论。PEI 中含有众多能源设备, 园区与用户间存在频繁的互动, 其复杂性决定了在 PEI 的规划设计与运行中将产生实际问题。因此, 需要从全过程出发, 定位问题所在环节, 对比不同技术路线在面对该问题时的适应性与欠缺之处, 从而指引进一步的研究与完善。基于此, 本文首先从 PEI 的内涵出发, 介绍了其物理模型及多源耦合互补的特性, 并探讨其规划与运行研究中的基本模型; 然后将当前 PEI 在设备规划及优化运行方面的研究分四大环节进行综述; 最后, 对 PEI 规划与运行的进一步研究方向进行了展望。

1 PEI 的内涵与特征

与全球能源互联网、区域能源互联网相比, PEI 可视为小型、单元级的能源互联网, 它是建在用户端以能源需求优化为目标, 通过整合园区内多种能源, 实现区域内“源-网-荷-储-充”优化协调的新型能源网络。目前, 国内外现有研究中已提出了 PEI 的各种表现形态, 包括综合能源系统、能量枢纽等^[9], 其系统在物理模型层面都包含电、冷、热、气等多种能源的生产、转换、储存、消费等环节。相较于综合能源系统与能量枢纽, PEI 在考虑园区内多种能源耦合、互补的基础上, 更关注于园区用户的信息互

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2020-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077)

动、市场交易等环节。PEI对园区范围内能源的生产、传输、转化、储存、分配、消费等环节进行有机协调,各类能量转换装置将冷、热、电、气等多种能源联结交互,形成了供热、供冷、供气、供电网络高度耦合,以智能用电、信息通信、负荷管理、分布式发电、电动汽车等技术为支柱的能源产销一体化系统。具有本地性、结构多样、运行方式灵活、整体可控、能量精确化管理、双边服务等6个特征^[10],其基本物理结构如图1所示。

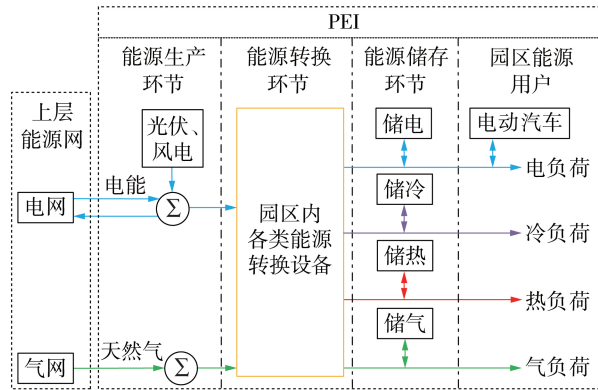


图1 PEI的基本物理结构

Fig.1 Basic physical structure of PEI

根据设备类型的不同,PEI中的各类能源设备可以按环节分为能源生产、转换与储存设备,具体如表1所示。

表1 PEI常见能源设备

Table 1 Common equipment in PEI

设备类型	设备	输入能源	输出能源
能源生产设备	光伏	太阳能	电
	风电	风能	电
	燃气轮机	天然气	电
能源转换设备	热电联产机组	天然气	电、热
	冷热电三联供机组	天然气	电、冷、热
	电锅炉	电	热
	空调	电	冷、热
	冰蓄冷	电	冷
能源储存设备	电解槽	电	氢
	燃料电池	氢	电
	甲烷化	氢	天然气
	热储罐	热	热
	贮气设备	气(天然气/氢)	气(天然气/氢)
	蓄电池	电	电

2 PEI建模基本方法

2.1 基于能源集线器的多能流关系模型

能源集线器模型用数学形式描述了能源互联网中能源的转化、储存、分配过程^[5],运用描绘能源输入-输出关系的矩阵体现了能源互联网中电、冷、热、气等多种能源之间的耦合关系^[8],对研究PEI的规划与运行具有重要意义。

基于能源集线器的PEI等效模型如图2所示,可描述为输入 M 种能源,经过PEI内部的能源生产、转换和储存环节,向能源负荷输出 N 种能源的二端口网络。图中, P^{In} 表示上层能源网输入的不同类型能源; G 表示园区内各类分布式能源生产设备; S 表示园区内各类能源的储存设备; P^{Out} 表示向园区用户输送的各类能源。

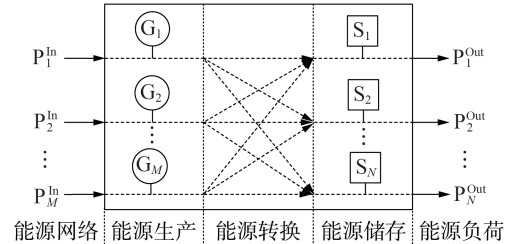


图2 PEI等效模型

Fig.2 Equivalent model of PEI

据此可得PEI的能源功率平衡关系如图3所示。图中, I 、 O 分别为能源转换设备输入、输出向量; C 为能源转换关系矩阵。

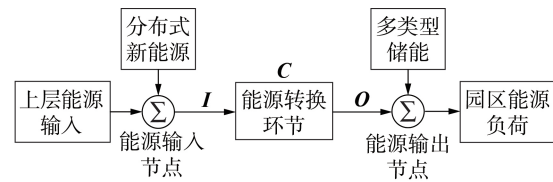


图3 PEI功率平衡模型

Fig.3 Power balance model of PEI

能源转换环节中,能源转换设备输入的 M 种能源向量 I 经过能源转换关系矩阵 $C=(C_{nm})_{N \times M}$ 的转换得到能源转换设备输出的 N 种能源 O 。其中, C_{nm} 为第 m 种输入能源与第 n 种输出能源之间的转换关系。

通常,将能源转换关系矩阵分解为 $C=\lambda \cdot \eta$ 来更好地描述该环节中能源的传输、转换和分配过程。其中, $\lambda=(\lambda_{nm})_{N \times M}$, λ_{nm} 为第 m 种能源输出至第 n 种能源的分配比例;“ \cdot ”表示2个同阶数矩阵相同位置的元素相乘; $\eta=(\eta_{nm})_{N \times M}$, η_{nm} 为第 m 种能源输出至第 n 种能源的效率关系。通过对矩阵 λ 、 η 的修改,可更准确地描述PEI的能流关系。

在基于上述PEI的数学模型进行设备规划及运行优化时,常将分配关系系数作为优化规划问题的决策变量。效率系数则是由能源设备自身的特性决定的,其不一定为常数,这提升了模型求解的难度。针对由非线性带来的求解困难的问题,通常可采取的处理方法有常数近似、分段线性或利用智能算法求解等。

2.2 电网-天然气网-热网潮流模型

由于PEI中存在电-气相互转换设备,使得电力

网络与天然气网络相互耦合且存在双向能流^[11],因此在PEI的规划与运行研究中应对天然气网进行建模。同时,由于电热耦合设备的存在,在PEI的基本建模中也应考虑热网模型。通过对电、热、天然气网进行建模,研究其运行约束条件及耦合运行带来的影响^[12-13]。

2.2.1 电网潮流模型

电网潮流模型采用经典交流潮流模型,可以根据模型需求在直角坐标或极坐标下进行表达,此处不再赘述。

2.2.2 天然气网潮流模型

类比于电网潮流基于节点注入功率求解节点电压及支路潮流的形式,天然气网则是在各节点注入流量已知的情况下求解节点气压及支路流量,天然气网的潮流模型如下。

(1) 天然气网传输管道模型。

由于天然气网中气体传输较慢,天然气网在运行过程中无需满足流量的实时平衡,存在时延效应,因此,考虑天然气网管道储存特性的“管存模型”^[14]常用于天然气网的运行研究,如图4所示。

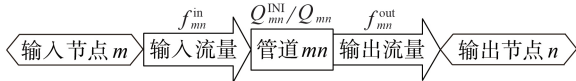


图4 管存模型

Fig.4 Line pack model

对于图4,管道 mn 的输入流量 f_{mn}^{in} 、输出流量 f_{mn}^{out} 与原有管存 Q_{mn}^{INI} 和当前管存 Q_{mn} 有以下平衡关系:

$$Q_{mn} = Q_{mn}^{\text{INI}} + f_{mn}^{\text{in}} - f_{mn}^{\text{out}} \quad (1)$$

Q_{mn} 、 f_{mn}^{in} 、 f_{mn}^{out} 与节点气压之间的关系为:

$$Q_{mn} = M_{mn} \frac{\pi_m + \pi_n}{2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{sgn}(\pi_m - \pi_n) f_{mn}^2 = \alpha_{mn} (\pi_m^2 - \pi_n^2) \\ f_{mn} = \frac{f_{mn}^{\text{in}} + f_{mn}^{\text{out}}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, M_{mn} 和 α_{mn} 为管道参数,均为常数; π_m 和 π_n 分别为输入节点 m 和输出节点 n 的气压; f_{mn} 为管道 mn 的平均流量; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

管存模型常被用于考虑天然气网动态特性的研究中。若考量实际需求,忽略动态特性,则认为管道输入流量与输出流量相等,即为天然气传输管道的Weymouth公式^[15],适用于天然气管网的稳态模拟。

(2) 压缩机模型。

为了补偿天然气沿管道传输产生的压降,保证各个节点的气压,天然气网中需要配置压缩机来提高气压。对于任一压缩机 pq ,其数学模型可表示如下^[16]:

$$\begin{cases} H_{pq} = B_{pq} f_{pq} (K_{pq}^{Z_{pq}} - 1) \\ K_{pq} = \frac{\pi_q}{\pi_p} \\ \tau_{pq} = \alpha_{pq} + \beta_{pq} H_{pq} + \gamma_{pq} H_{pq}^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中, π_p 和 π_q 分别为压缩机进、出口压力; τ_{pq} 和 f_{pq} 分别为压缩机所消耗天然气量和流经压缩机流量; H_{pq} 为过程变量; K_{pq} 为升压比,一般为已知量; B_{pq} 、 Z_{pq} 、 α_{pq} 、 β_{pq} 、 γ_{pq} 为压缩机模型参数,均为常数。

2.2.3 热网潮流模型

热网潮流模型由热网水力模型与热网热力模型组成。热网水力模型确定各管道水流量及各节点的注入水流量,热力模型确定热网节点温度之间关系,两者输出数据互为输入。

(1) 热网水力模型。

水力模型包括节点流量平衡方程、回路压力方程和压头损失方程^[21],分别表示如下:

$$\mathbf{A}_s \mathbf{m}_h = \mathbf{m}_q \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_h \mathbf{h}_f = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_f = \mathbf{K} \mathbf{m}_h \quad (7)$$

其中, \mathbf{A}_s 为供热网络的节点-支路关联矩阵; \mathbf{m}_h 为热网管道流量向量; \mathbf{m}_q 为节点注入负荷水流量向量; \mathbf{B}_h 为供热管网的回路关联矩阵; \mathbf{h}_f 为压头损失向量; \mathbf{K} 为管道阻力系数矩阵。

(2) 热网热力模型。

热力模型包括热负荷功率方程、管道降温方程和节点功率守恒方程^[17],分别表示如下:

$$\Phi = C_p m_q (T_s - T_o) \quad (8)$$

$$T_{\text{ed}} = (T_{\text{st}} - T_a) e^{-\lambda L / (C_p m_h)} + T_a \quad (9)$$

$$\left(\sum m_{\text{out}} \right) T_{\text{out}} = \sum (m_{\text{in}} T_{\text{in}}) \quad (10)$$

其中, Φ 为负荷功率; T_s 、 T_o 分别为流入、流出负荷的水温; m_q 为注入负荷水流量; C_p 为水的比热容; T_{st} 、 T_{ed} 分别为管道始端、末端水温; T_a 为外界自然温度; m_h 为管道水流量; λ 为管道热传导系数; L 为管道长度; m_{in} 、 m_{out} 分别为节点输入、输出管道的流量; T_{in} 、 T_{out} 分别为节点输入、输出管道的水温。

在PEI的规划与运行研究中,通过基于能源集线器的多能流关系模型来体现园区中的能源设备及其互联情况,研究电、气、热三网的耦合关系,并通过统一或解耦的方式^[18]求解网络潮流模型来探讨园区内及其上层网架的约束条件、运行状态及安全稳定情况,以上模型共同构成了PEI规划与运行研究的基础模型。在实际研究或者工程中,可根据具体的研究目的或工程情况简化或细化该模型的各个部分。此外,PEI的模型还包括各种能源设备的模型^[9]。由于其相对独立,可根据具体研究或项目需求以模块化的形式接入上述基本模型框架中,从而

探讨其运行情况及约束条件对PEI规划与运行的影响,此处不再赘述。

3 PEI规划的模型与方法

PEI中能源设备种类繁多、能源耦合紧密、用能方式多样,因此在规划中需统筹考虑系统涵盖的多种能源设备、涉及的各种能源形式、能源的复杂耦合关系及由此带来的供能方式的多样化^[19],对PEI的设备规划进行研究将具有重要意义。PEI设备规划应在考虑其自身特性的基础上,进一步结合现有的能源政策、区域特征以及供需特性等因素^[5]来达到提高资产利用效率、降低全社会成本的目的^[8]。

3.1 PEI设备规划模型

PEI的设备规划模型涉及能源设备的投建与容量规划,可根据具体需求考量包括建设成本、运行成本及各类自定义成本或惩罚在内的各种指标。根据文献[20-21],可以得到多时间尺度下PEI规划通用模型如下:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}_{inv}} F(\mathbf{x}_{inv}, \mathbf{x}_{ope}) = \sum (C_{inv} + C_{ope}) \\ \min_{\mathbf{x}_{ope}} f(\mathbf{x}_{inv}, \mathbf{x}_{ope}) = C_{ope} \\ \text{s.t. } \mathbf{G}(\mathbf{x}_{inv}, \mathbf{x}_{ope}) \leq 0, \mathbf{H}(\mathbf{x}_{inv}, \mathbf{x}_{ope}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, \mathbf{x}_{inv} 为投资变量; \mathbf{x}_{ope} 为运行变量; C_{inv} 和 C_{ope} 分别为PEI的年度投资和运行成本;目标函数 $F(\cdot)$ 表示PEI整体经济性; $f(\cdot)$ 表示PEI运行成本; $\mathbf{G}(\cdot)$ 、 $\mathbf{H}(\cdot)$ 分别为模型中的各种不等式、等式约束。

式(11)中,目标函数可根据实际需求,考量设备投资、综合购能、环境代价等多方面的成本。在等式/不等式约束中,可划分为投资约束与运行约束。其中,投资约束主要包括设备型号/容量选择约束与园区建设约束;运行约束包括能量平衡约束、潮流约束、设备容量/出力约束、供电可靠性约束、碳排放约束、购能约束以及上层能源网络的各种运行约束等。

在具体工程场景中应用上述规划模型,可在通用规划模型的基础上修改模型的目标函数以及约束条件以准确反映工程实际情况,满足具体工程要求。

3.2 PEI设备规划方法

在当前的PEI设备规划研究中,其规划方法可主要分为两大类:基于规划原则的经验测算规划方法和基于数学模型的优化规划方法。

3.2.1 经验测算规划方法

在经验测算规划方法中,规划人员依据工程经验的各种原则对目标区域进行规划,如以热定电、以电定热、按安装面积或比例配置等^[22]。文献[23]提出的冷热电三联供系统设计以屋顶面积作为设计依据,确定系统光伏安装容量,在考虑光伏系统及上层

供电的情况下,按冷、热平均负荷及50%电负荷进行设备容量配置。文献[24]根据发电自用、设备高负荷运行、设备效率优先的原则对冷热电联供项目进行设计,并分别以采暖期、制冷期及非采暖制冷期3种典型日运行情况,分析设计方案的经济性。经验测算规划方法具有计算过程直观、规划简便的特点,适用于对于经济性、环保性等规划指标考量较宽松的规划场景。但相较于建模优化规划方法,经验测算规划方法过于简化,未考虑PEI的不同运行方式对规划效益的影响^[25]。

3.2.2 建模优化规划方法

在建模优化规划方法中,需要构建优化模型来反映实际规划问题,并通过求解该模型得到规划方案。相较于经验测算规划方法,通过求解模型进行设备规划通常能够寻得场景下的最优配置。但其效果依赖于建模的精确程度,由此增加了模型的复杂程度,提升了求解难度^[26]。当前的PEI规划多以经济性为规划目标,辅以环保性、可靠性等指标^[27],并进一步考虑各个指标之间的平衡^[28-29]。

PEI的设备规划通常基于固定的源荷场景,在某一周期内完成经济最优的设备配置。PEI含有多种分布式新能源设备,涉及电、气、冷、热等多种能源,其不确定性是PEI设备规划中的重要考量因素。当前研究包括基于最劣条件的区间优化^[30]及基于场景的随机规划^[31],但其对于不确定量的考量大多集中于新能源出力的随机性,缺少对长时间尺度下负荷发展的考量。现有研究也仅通过主观置信度参数调节其规划方案的保守性,缺少未来负荷变动的概率信息。进一步研究适应于负荷变化的PEI设备优化配置方法,将影响负荷发展的概率因素考虑在内,平衡不同负荷发展下园区设备初始投资及未来设备缺口,使规划方案更适应未来负荷发展的随机性,从而提升规划方案在不同时间尺度上的经济性。

4 PEI运行的模型与方法

随着能源市场化的推进和信息通信技术的发展,对PEI进行统筹优化调度已经成为可能,如何充分发挥不同形式能源之间的互利互补,提高多能源利用的效率是亟待解决的技术问题。同时,在能源市场管制放松的背景下,园区能源用户的响应能力将作为一种可控资源,纳入PEI优化规划与运行工作中。因此,优化PEI运行,需在考虑园区运行成本及效率的基础上,计及不确定性及负荷侧的响应能力进行最优调度,通过合理安排其内部各类能源设备的出力及用户响应,以获取最大收益。

4.1 PEI多能流的优化调控

4.1.1 PEI的多能耦合调度

当前在PEI耦合多能流优化调度方面已有不少

研究,通常以经济性、环保性、可靠性、能源利用率为指标^[32],考虑源荷互动,寻求园区内多种能源设备的最优启停/出力组合^[33],并探讨设备种类、能源价格及用户舒适度对调度的影响^[34-36]。文献[37]面向居民用户,以能源购置成本最优进行了考虑系统内光伏、产热及储能设备的运行优化。文献[38]建立了考虑PEI结构和运行方式的混合整数线性优化模型,验证了该模型具有灵活切换不同能源转换设备的能力并成功降低了运营成本。文献[39]从PEI中的能量平衡关系出发,进一步考虑设备启停、操作限制、储能损耗等约束条件进行PEI的分段线性建模。

目前,PEI的优化调度大多关注其稳态运行下的经济性与可靠性,对PEI中电、气、热系统及其设备运行的动态特性考虑得较少,造成对PEI运行的安全稳定评估不够精确,其在稳态模型下的最经济运行方案若用动态模型考量则可能出现可靠性问题。应当考虑不同能源网络的暂态与时延特性,计及关键设备的动态模型,从而进一步优化调度结果。

4.1.2 源荷不确定性处理方法

PEI运行中具有大量的不确定性,包括风电、光伏等不可控分布式能源出力以及能源需求、能源价格的实时变动等,广泛存在于PEI的输入端和输出端。目前处理不确定性的研究和方法主要包括随机优化^[40]、区间优化^[41-42]、鲁棒优化及其多种改进形式^[43-45]等。文献[46]提出多园区场景下的优化共享运行策略,通过两阶段鲁棒优化内部的源荷不确定性,实现不同园区间的博弈与合作。文献[47]在市场环境下考虑多个PEI互联的负荷及可再生能源的不确定性,利用强化区间线性规划的方式保证求解的可行性,并以区间的形式反映系统中不确定性对系统收益的影响。文献[48]在经济调度模型中引入条件风险价值理论,将随机抽样后的场景转为确定性约束来处理系统中的不确定性。

在上述处理源荷不确定性的技术中,基于场景法的随机优化通过大量场景生成考虑不确定量的各种可能性,在兼顾系统运行的经济性与安全性方面表现较好。但其基于大量场景的模型给求解带来困难,研究场景的优选,通过极限场景、场景缩减等技术降低求解规模将推进场景法的应用。相较于随机优化,鲁棒优化与区间优化无需基于大量场景进行考虑。通过在系统运行的极端恶劣情况下进行调度来保证系统的安全稳定运行,因此其调度结果具有强保守性。当前改善其保守性的方法主要是通过引入调节其风险偏好的参数,通过改变调度场景的极端程度来平衡调度结果的安全性与经济性,但该参数的选定通常较为主观。利用分布鲁棒等技术,结合不确定量的概率信息对该参数进行取值优化可以作为进一步研究的方向。

4.2 考虑负荷侧多类型响应的优化调控

随着通信技术的发展,能源网络中的源荷互动变得更加高效与频繁,负荷侧的多种响应能力,包括需求响应、电动汽车等技术,作为PEI中的调控资源正受到广泛关注。

4.2.1 基于需求响应的负荷调控

能源网络中的需求响应是指能源供应商向用户传递自身运行需求,能源用户在此基础上改变原有的用能模式,从而提升系统中源荷的匹配度,深入挖掘PEI运行的优化潜力。其手段包括基于调度中心的集中式激励型需求响应^[49]及基于能源价格的需求响应^[50]。文献[51]在能源互联网框架下,将园区内柔性负荷划分为可转移、可削减及可转换3类,并在考虑人体舒适度的情况下实现运营商收益最大化。文献[52]基于集中式激励型需求响应建立了园区日前-实时两阶段优化调度模型,并提出了适用于该模型的分层次密度聚类的变异头脑风暴优化算法。文献[53]将能源价格作为调控资源,通过能源价格弹性及可平移负荷的可选时间区间,实现了产销者收益的提升。文献[54]提出用户需求响应的潜力识别和量化方法,在不同的能量转移策略下评估需求响应的成本及收益。

4.2.2 基于电动汽车储能的充放电调度

随着电动汽车技术及市场的发展,电动汽车将作为资源加入PEI的调度过程。在电动汽车汽车入网V2G(Vehicle-to-Grid)模式中,用户可根据自身情况与上层电网发布的需求进行充电方式的选择,提供响应能力。文献[55]从家庭能源管理系统出发,考虑在高电价时段电动汽车向负荷供电的能力,提出了一种家庭能源管理系统的优化运行方法。文献[56]同样针对家庭式系统,对其中包含的热电联产、电动汽车等设备进行优化调控。文献[57]对商业PEI进行分析,以能源集线器模型为基础建立了包括电动汽车在内的PEI优化调度模型。文献[58]建立了包含电动汽车停车场的能源中心模型,对停车场内热电联产系统联合电动汽车响应进行调度来获得更高收益。

需求响应与电动汽车调度均为PEI在负荷侧的调度资源,在能源市场逐步放开的背景下,能源价格作为调控园区负荷的重要手段,成为当前研究领域的热点。区别于传统的集中式调度,基于能源价格的调度中各个决策主体根据自身利益及需求,其负荷的响应结果将在很大程度上取决于其自身特性(如用能模式、出行习惯等)。目前研究中基于市场的负荷响应模型偏理想化,如何与大数据相关技术结合,通过标签聚类的方式考虑响应中的个体差异有进一步研究的意义。

4.3 计及储能的PEI优化调度

储能设备是PEI多能调度中的重要能源设备之一,通过多类型储能的单一或混合配置^[59-60],在经济调度、削峰填谷、消纳可再生能源、保障系统安全稳定等方面发挥关键作用。文献[61]基于带有中间缓冲环节的电转气(P2G)提出一种氢能-天然气混合储能系统,并在不同水平风电渗透率的场景中证明其具有经济性与环保性。文献[62]考虑电-热储能的协调运行,强调其相较于单一储能方案具有更强的削峰填谷能力。文献[63]考虑电、气、热3种储能设备,并通过4种场景证明3种设备的混合调度具有最优经济效益。文献[64]在PEI中考虑蓄热装置热备用,在电-气互联场景下提出一种多阶段弹性调度策略,其在备用容量最小的前提下能显著提升系统对于故障的适应性。

当前考虑储能的调度技术主要关注多种类型的储能通过混合调度的方式形成互补,从而保障PEI运行的安全稳定,提升经济效益。PEI强调源荷之间的互动,其中的需求响应、电动汽车充放电调度等技术应用于优化调度中同样能参与经济调度,提供备用容量,从而提升系统稳定性。其相较于储能具有单位成本低、潜力大的优点,但同时也存在具有不确定性、突发故障下响应慢的不足。通过与储能出力确定、响应快速的特点结合,可以进一步减少PEI中的储能备用,降低储能投资。在未来研究中考虑储能与PEI中需求响应、电动汽车等技术的联合调度,形成优势互补,将进一步提升PEI的稳定性与经济性。

5 有待深入研究的方向展望

5.1 考虑自然及社会资源的广义PEI规划建模研究

进行PEI规划需要对规划区域进行不同时间尺度上的刻画,其刻画的精确程度将直接影响规划结果。广义PEI规划除考虑园区内原有负荷因素外,还需统筹规划区域内的自然能源资源(如太阳能、风能、水资源)情况及其社会资源(如规划区域功能、行业政策、用户特征及出行习惯等)情况,考量其对区域内未来源荷发展的影响,精细刻画该区域的发展情况,从而提升规划方案在不同时间尺度上的效益。广义PEI规划模型综合考虑规划区域内交通、燃气、供热网络,并利用地理信息系统(GIS)模型^[65]、可再生能源资源潜力评估模型^[66]等为PEI的规划工作提供数据支撑^[67]。通过设计不同模型间的接口实现数据交换,广义PEI规划模型将提升模型的规划维度及规划效果。

5.2 利用人工智能技术提升优化模型决策能力研究

PEI的基本模型涉及能源设备耦合关系模型及

电-气-热三网的潮流模型,其数据有多源多态、复杂高维的特点,包括其数据的不确定性、指数增长等特征^[68]将给PEI运行优化的精确建模、数据处理带来挑战,其中的复杂耦合关系及能源网模型中的大量非线性描述同样提升了求解难度。近年来,人工智能技术(如机器学习、群体智能算法等)在数据解析、学习和计算方面已取得长足进步,在不同领域取得了良好的应用效果。收集PEI中自然环境、设备参数与运行状态的海量数据,运用大数据相关技术,接入PEI运行优化模型;将机器学习中的深度学习DL(Deep Learning)、强化学习RL(Reinforcement Learning)与迁移学习TL(Transfer Learning)等智能技术应用于PEI优化模型,发挥DL在新能源出力预测与负荷预测、RL在求解高维非线性优化模型、TL在处理多元多目标优化问题上的优势,从而有效提升优化模型的决策能力。

5.3 含多PEI的市场交互技术研究

在我国电力体制改革与能源结构转型的大背景下,随着市场管制的放松,电力与能源市场开始逐步兴起。随着PEI落地项目的不断增加,未来势必会形成多个PEI主体互联的局面。在开放的能源市场下,多个PEI决策主体间以利益为导向产生频繁且复杂的交互进行博弈,势必会给PEI运行的稳定性与经济性带来挑战。不同主体根据其自身特性对能源市场价格进行差异化响应,也将增加PEI市场调控的难度。合理调控PEI能源市场,完成不同园区间间的特性、优势互补,将提升PEI节能减排、消纳分布式新能源、保证能源系统安全稳定运行的能力。因此,研究含多PEI的市场交互技术将成为重点。

区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与PEI的能源服务的需求有天然匹配性^[69]。其去中心化的特点将充分调动各主体在市场能源价格因素下的自发响应。通过区块链技术为PEI市场交互技术提供架构支撑,并结合大数据技术收集海量信息,特异化构建不同园区及其用户在PEI市场下的用能画像,将提高市场调控的针对性和有效性,进一步推动PEI的市场交互发展。

6 结语

PEI是区域内多种能流相互耦合,“源-网-荷-储-充”协调互补的能源系统。随着能源革命的纵深发展以及我国“互联网+智慧能源”战略的推进,PEI将呈现出越来越强的生命力,这对支持可再生能源的分布式利用、促进能源利用效率的提升和形成能源生产消费新业态起到重要的推动作用。

参考文献:

[1] CAO Yijia, LI Qiang, TAN Yi, et al. A comprehensive review

- of energy internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(3):399-411.
- [2] 国务院. 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[EB/OL]. (2015-07-04)[2020-03-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content_10002.htm.
- [3] 米阳, 刘红业, 宋根新, 等. 面向能源互联网的多能源局域网两层功率优化分配[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(7):1-10.
MI Yang, LIU Hongye, SONG Genxin, et al. Two-layer power optimization allocation of multi-energy local networks oriented to energy internet[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7):1-10.
- [4] ALSTONE P, GERSHENSON D, KAMMEN D M. Decentralized energy systems for clean electricity access[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(4):305-314.
- [5] 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):3292-3306.
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 the CSEE*, 2016, 36(12):3292-3306.
- [6] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1):1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1):1-13.
- [7] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(1):24-30.
- [8] 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 Chongqi. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22):5669-5681.
- [9] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. *电网技术*, 2018, 42(6):1697-1708.
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6):1697-1708.
- [10] 谭涛, 史佳琪, 刘阳, 等. 园区型能源互联网的特征及其能量管理平台关键技术[J]. *电力建设*, 2017, 38(12):20-30.
TAN Tao, SHI Jiaqi, LIU Yang, et al. Characteristics of industrial park energy internet and key technologies of its energy management platform[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(12):20-30.
- [11] 吴峰, 吕焱. 电力-天然气区域综合能源系统多能流计算及静态稳定性分析[J]. *广东电力*, 2019, 32(10):28-35.
WU Feng, LÜ Yao. Multi-energy flow calculation and static stability analysis of electric power-LNG regional integrated energy system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(10):28-35.
- [12] 苏洁莹, 林楷东, 张勇军, 等. 基于统一潮流建模及灵敏度分析的电-气网络相互作用机理[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2):43-59.
SU Jieying, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2):43-59.
- [13] 刘述欣, 戴赛, 胡林献, 等. 计及回水管网热损失的热电联合系统潮流模型及算法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4):77-81, 134.
LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Power flow model and algorithm of combined power and heat system considering heat loss in return pipe network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4):77-81, 134.
- [14] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6):3347-3355.
- [15] DE WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. *Management Science*, 2000, 46(11):1454-1465.
- [16] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4):2156-2166.
- [17] 王文学, 胡伟, 孙国强, 等. 电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(1):83-95.
WANG Wenxue, HU Wei, SUN Guoqiang, et al. Interval energy flow calculation method of integrated electro-thermal system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1):83-95.
- [18] 陈泽兴, 林楷东, 张勇军, 等. 电-气互联系统建模与运行优化研究方法评述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3):11-23.
CHEN Zexing, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. A review of modeling and optimal operation of integrated electricity-gas system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3):11-23.
- [19] 林晓明, 张勇军, 陈伯达, 等. 计及多评价指标的园区能源互联网双层优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(20):8-15, 30.
LIN Xiaoming, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Bi-level optimal configuration of park energy internet considering multiple evaluation indicators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(20):8-15, 30.
- [20] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型DG和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(18):4911-4922.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(18):4911-4922.
- [21] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22):6445-6462.
BIE Zhao hong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22):6445-6462.
- [22] 刘高科, 沈国民, 徐新华, 等. 某车站综合体天然气冷热电联供系统方案研究[J]. *煤气与热力*, 2018, 38(8):30-35.
LIU Gaoke, SHEN Guomin, XU Xinhua, et al. Design study on natural gas combined cooling, heating and power system for a station complex[J]. *Gas & Heat*, 2018, 38(8):30-35.
- [23] 薛小代, 刘彬卉, 汪雨辰, 等. 基于压缩空气储能的社区微能源网设计[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12):3306-3313.
XUE Xiaodai, LIU Binhui, WANG Yuchen, et al. Micro energy network design for community based on compressed air energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(12):3306-3313.
- [24] 彭丹, 焦建通, 姚瑶. 郑州市某小区冷热电三联供能源系统配置方案及经济性分析[J]. *能源研究与管理*, 2019(1):102-105.
PENG Dan, JIAO Jiantong, YAO Yao. Configuration program and economic analysis for the unit of distributed energy system which supplied cold, heat and power triple for a community in Zhengzhou city[J]. *Energy Research and Management*,

- 2019(1):102-105.
- [25] 程洁. 基于冷热电三联供系统的综合能源系统设计与研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
CHENG Jie. The design and research of comprehensive energy system based on the CCHP system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.
- [26] 白学祥,曾鸣,李源非,等. 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(5):65-72.
BAI Xuexiang,ZENG Ming,LI Yuanfei,et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control,2017,45(5):65-72.
- [27] 于波,孙恒楠,项添春,等. 综合能源系统规划设计方法[J]. 电力建设,2016,37(2):78-84.
YU Bo,SUN Hengnan, XIANG Tianchun,et al. Planning design method of integrated energy system[J]. Electric Power Construction,2016,37(2):78-84.
- [28] 张涛,朱彤,高乃平,等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3706-3713.
ZHANG Tao,ZHU Tong,GAO Naiping,et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3706-3713.
- [29] 孙强,高松,谢典,等. 协调可靠性与经济性的园区综合能源系统优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(4):76-82.
SUN Qiang,GAO Song,XIE Dian,et al. Optimum planning for integrated community energy system with coordination of reliability and economy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(4):76-82.
- [30] 仇知,王蓓蓓,贾树俊,等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):176-185.
QIU Zhi,WANG Beibei,BEN Shujun,et al. Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):176-185.
- [31] 赵瑾,雍静,郇嘉嘉,等. 基于长时间尺度的园区综合能源系统随机规划[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):62-67.
ZHAO Jin,YONG Jing,HUAN Jijia,et al. Stochastic planning of park-level integrated energy system based on long time-scale[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):62-67.
- [32] 陈中豪,林晓明,陈丽萍,等. 社区级综合能源系统多目标模糊日前优化调度模型[J]. 广东电力,2019,32(1):93-99.
CHEN Zhonghao,LIN Xiaoming,CHEN Liping,et al. Multi-objective fuzzy optimal day-ahead dispatching model for integrated community energy system[J]. Guangdong Electric Power,2019,32(1):93-99.
- [33] 林晓明,张勇军,肖勇,等. 计及设备启停的含电转气园区能源互联网两阶段优化调度模型[J]. 广东电力,2019,32(10):62-70.
LIN Xiaoming,ZHANG Yongjun,XIAO Yong,et al. A two-stage dispatch model of park energy internet with power-to-gas devices considering start-stop state of devices[J]. Guangdong Electric Power,2019,32(10):62-70.
- [34] CHICCO G,MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. Energy,2009,34(3):261-273.
- [35] BARMAYOON M H,FOTUHI-FIRUZABAD M,RAJABI-GHAHNAVIEH A,et al. Energy storage in renewable-based residential energy hubs[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2016,10(13):3127-3134.
- [36] BOZCHALUI M C,HASHMI S A,HASSEN H,et al. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(4):1755-1766.
- [37] HA T,ZHANG Y,THANG V V,et al. Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2017,5(3):389-399.
- [38] HA T,ZHANG Y,HAO J,et al. Energy hub's structural and operational optimization for minimal energy usage costs in energy systems[J]. Energies,2018,11(4):707.
- [39] EVINS R,OREHOUNIG K,DORER V,et al. New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints[J]. Energy,2014,73:387-398.
- [40] DOLATABADI A,JADIDBONAB M,MOHAMMADI-IVATLOO B. Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: a hybrid stochastic/IGDT approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(1):438-448.
- [41] BAI Linqun,LI Fangxing,CUI Hantao,et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy,2016,167:270-279.
- [42] QIAO Zheng,GUO Qinglai,SUN Hongbin,et al. An interval gas flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy,2017,201:343-353.
- [43] PARISIO A,DEL VECCHIO C,VACCARO A. A robust optimization approach to energy hub management[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,42(1):98-104.
- [44] 张勇军,林晓明,许志恒,等. 基于弱鲁棒优化的微能源网调度方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):75-82.
ZHANG Yongjun,LIN Xiaoming,XU Zhiheng,et al. Dispatching method of micro-energy grid based on light robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(14):75-82.
- [45] HASHEMI Z,RAMEZANI A,MOGHADDAM M P. Energy hub management by using decentralized robust model predictive control[C]//International Conference on Control. Shenzhen, China:IEEE,2016:105-110.
- [46] 李驰宇,高红均,刘友波,等. 多园区微网优化共享运行策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):29-36.
LI Chiyu,GAO Hongjun,LIU Youbo,et al. Optimal sharing operation strategy for multi park-level microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):29-36.
- [47] 白牧可,王越,唐巍,等. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术,2017,41(12):240-247.
BAI Muke,WANG Yue,TANG Wei,et al. Day-ahead optimal dispatching of regional integrated energy system based on interval linear programming[J]. Power System Technology,2017,41(12):240-247.
- [48] LI Yang,LIU Weijia,SHAHIDEHPUR M,et al. Optimal operation strategy for integrated and power-to-gas conversion facilities[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(4):1870-1879.
- [49] SETLHAOLO D,SICHILALU S,ZHANG J. Residential load management in an energy hub with heat pump water heater[J]. Applied Energy,2017,208:551-560.
- [50] 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.
- [51] 江岳春, 曾诚玉, 邹嘉嘉, 等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 254-260.
JIANG Yuechun, ZENG Chengyu, HUAN Jiajia, et al. Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 254-260.
- [52] 于壮状, 曾鸣, 刘英新, 等. 基于多层次DBSCAN-VBSO算法的区域综合能源系统两阶段调度优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 63-72.
YU Zhuangzhuang, ZENG Ming, LIU Yingxin, et al. Two-stage dispatching optimization of regional integrated energy system based on hierarchical DBSCAN-VBSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 63-72.
- [53] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 41-48.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy management of community energy internet based on leader-followers game[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 41-48.
- [54] MANCARELLA P, CHICCO G. Real-time demand response from energy shifting in distributed multi-generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1928-1938.
- [55] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 18-26.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. A scheduling algorithm for home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 18-26.
- [56] RASTEGAR M, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M. Home load management in a residential energy hub[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 322-328.
- [57] 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.
- [58] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system[J]. Energy and Buildings, 2015, 90: 65-75.
- [59] 杨利, 刘永林, 房伟, 等. 配置储热罐后热电联产机组运行优化[J]. 热力发电, 2020, 49(4): 70-76.
YANG Li, LIU Yonglin, FANG Wei, et al. Operation optimization of cogeneration unit equipped with heat accumulator[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 70-76.
- [60] 刘超, 陈思宇, 孟冰冰, 等. 考虑电气混合储能的小区能源系统调度方法研究[J]. 热力发电, 2020, 43(8): 156-161.
LIU Chao, CHEN Siyu, MENG Bingbing, et al. Scheduling method for regional energy system considering electric hybrid energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2020, 43(8): 156-161.
- [61] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能的气-电综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-179.
LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-179.
- [62] 刁涵彬, 李培强, 王继飞, 等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4532-4543.
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532-4543.
- [63] 施泉生, 丁建勇, 刘坤, 等. 含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 269-276, 293.
SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276, 293.
- [64] 练依倩, 郭祚刚, 马溪原, 等. 考虑热备用的气-电耦合园区综合能源系统弹性调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 115-121.
LIAN Yiqing, GUO Zuogang, MA Xiyuan, et al. Resilience scheduling of integrated electricity and gas community system considering hot reservation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 115-121.
- [65] 朱庆. 三维GIS及其在智慧城市中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 151-157.
ZHU Qing. Full three-dimensional GIS and its key roles in smart city[J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(2): 151-157.
- [66] TWIDELL J, WERT T. Renewable energy resources[M]. London, UK: Routledge, 2015: 238-266.
- [67] 黄子硕, 何桂雄, 闫华光, 等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 10-18.
HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [68] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 15-43.
CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Machine learning for energy and electric power systems: state of the art and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 15-43.
- [69] 龚钢军, 张桐, 魏沛芳, 等. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1278-1290.
GONG Gangjun, ZHANG Tong, WEI Peifang, et al. Research on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy internet based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1278-1290.

作者简介:



王 奖

王 奖(1996—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为能源互联网的优化规划与运行(E-mail: 609057688@qq.com);

邓丰强(1986—), 男, 广东韶关人, 实验师, 硕士, 通信作者, 主要研究方向为智能配电网与能源互联网的运行(E-mail: epfqdeng@scut.edu.cn);

张勇军(1973—), 男, 广东河源人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制等(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第55页 continued on page 55)

Control strategy of time-shift facility agriculture load and photovoltaic local consumption based on energy blockchain

CHEN Zheng¹, YANG Jianhua¹, JIN Kaiyuan¹, HOU Bin¹, WANG Weizhou²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the development of facility agriculture, the distributed generation power of agricultural network can be absorbed effectively by setting appropriate control strategies and using new agricultural load. Blockchain has gradually attracted the attention of energy field due to its characteristics of security, consensus and motivation. Based on the time-shift characteristic of facility agriculture load, optimization objectives are respectively constructed in the micro-energy network layer and the greenhouse layer in the agricultural park, and the control strategy of micro-energy network in the park is proposed based on the blockchain technology. With the goal of maximizing local consumption of photovoltaic in each greenhouse, based on the energy consumption data, equipment parameters, operation data, and so on, which are shared in the blockchain, the operation strategy for the next period is proposed responding to output power fluctuation of photovoltaic, time-shift load and configuration of energy storage in the micro-energy network. The evaluation index of photovoltaic consumption ratio is set to evaluate the consumption condition of each greenhouse, and the optimal load operation scheme is always recorded in the blockchain. The example results show that the proposed control strategy can effectively improve the local consumption of distributed photovoltaic in the park, reduce the power purchase cost and network loss of micro-energy network, and improve the voltage quality of the power grid.

Key words: energy blockchain; facility agriculture; distributed photovoltaic; local consumption; time-shift load; control strategy

~~~~~  
(上接第 32 页 continued from page 32)

## Review on planning and operation research of park energy internet

WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, SU Jieying, XIE Xiaoyu

(Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power,  
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** As a coordinated and complementary “generation-grid-load-storage-charging” energy system, park energy internet has the characteristics of multi-energy coupling and complementing, which contributes to the reduction of social energy costs as well as the improvement of energy efficiency. Firstly, the connotation and structural division of park energy internet are expounded. On this basis, the power balance model and power flow model of electricity-gas-heat network are discussed. Secondly, the research status of the park energy internet is reviewed from aspects of equipment planning, multi-energy flow optimal scheduling, load-side multi-type response and optimal scheduling considering energy storage. At last, the issues to be further studied are proposed, and the prospects of broad planning, intelligent optimization and interactive market of park energy internet are analyzed, so as to provide references for the future planning and operation research of park energy internet.

**Key words:** park energy internet; energy hub; planning; optimal scheduling