

# 数据中心园区能源互联网的关键技术与发展模式

王奖, 张勇军, 李立涅, 李钦豪, 苏洁莹

(华南理工大学电力学院智慧能源工程技术研究中心, 广州 510641)

**摘要:** 数据中心作为“新基建”的重要方向之一, 其节能降耗问题一直是领域的研究重点。园区能源互联网注重清洁能源消纳, 强调能源利用效率的提升, 其“源-网-荷-储-充”的协调技术是提升数据中心能效的关键, 探索数据中心园区能源互联网的关键技术与发展模式具有现实意义, 然而目前数据中心与园区能源互联网的研究各自独立, 技术之间缺乏相互结合。本文针对目前两者融合研究的领域空白, 首先分析了数据中心与园区能源互联网技术的结合点, 探讨其在设备规划、直流配电、余热回收、多能调度、负荷管理以及储能调度 6 个方面的关键技术与融合方向。在此基础上提出数据中心园区能源互联网的基本建设架构, 对商业与运营模式进行论证, 并展望领域未来发展的重点。最后, 针对我国数据中心园区能源互联网的进一步发展提出建议, 技术融合、试点实践、政策扶持及三者的有机结合是保障发展的关键。

**关键词:** 能源互联网; 数据中心; 设备规划; 运行优化; 商业模式

**中图分类号:** TM73; TK01 **文献标识码:** A

## Key Technologies and Development Modes of Park Energy Internet in Data Centers

Wang Jiang, Zhang Yongjun, Li Licheng, Li Qin hao, Su Jieying

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

**Abstract:** Data center is one of the important directions of the New Infrastructure initiative, and the energy efficiency of the data centers has always been a focus of research. Park Energy Internet (PEI) is a system that emphasizes the consumption of clean energy and the promotion of energy efficiency. The “generation, grid, load, storage, and charging” coordination technology of PEI will be the key to improving the energy efficiency of data centers. So exploring the key technologies and development modes of PEI in data centers will be significant. However, the current research on data centers and PEI is independent to each other. Therefore, this study analyzes the integration of data centers and PEI, and discusses the key technologies in equipment planning, DC power distribution, waste heat recovery, multi-energy dispatch, load management, and energy storage dispatch. On this basis, we proposes the infrastructure framework of the PEI in data centers, explores its business models, and prospects the priority of further development. Finally, suggestions for the further development of the PEI in data centers in China are proposed; technology integration, pilot practice, and policy support are the key elements which promote its development.

**Keywords:** Energy Internet; data center; equipment planning; operation optimization; business model

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-22

通讯作者: 张勇军, 华南理工大学电力学院教授, 研究方向为智能电网与能源互联网的规划与运行; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划战略研究(2035)”(2018-ZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

### 一、前言

随着第五代移动通信（5G）、云计算等新兴技术的大规模推广与不断发展，相关数据量也呈几何级数增长。作为承担互联网数据储存与处理的核心，数据中心成为各地建设的热点。2020年3月国家提出加快5G网络、数据中心等新型基础设施建设进度，标志着数据中心作为“新基建”七大领域之一，将进入更快速的发展阶段。

数据中心作为海量数据储存、运算与交互的实体，包括了计算机、制冷、供电、照明与机械等设备，也是5G、人工智能（AI）、物联网、云计算等技术的数据中枢和计算载体，成为“新基建”发展的重要支撑。按照服务对象，数据中心可以分为互联网数据中心（IDC）、企业数据中心和国家数据中心。

与典型居民、工业和商业负荷不同，数据中心所包含的服务器集群及辅助冷却系统属于不间断运行的高能耗设备。随着“新基建”的推进，数据中心建设进程不断加速，总体能源需求将进一步增加，相应能耗问题得到高度关注。

我国数据中心的基建项目多以产业园的形式落地，如张北云计算产业园、南通国际数据中心产业园、乌兰察布大数据中心等，产业园建设模式为园区能源互联网（PEI）提供了应用条件。PEI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，以能源需求优化为目标，结合互联网技术与通信技术，实现区域内“源-网-荷-储-充”的整体协调。建设数据中心的园区能源互联网（PEI-DC），利用PEI的“源-网-荷-储-充”协调技术来优化园区的能源结构与能流分配；同时结合数据中心在数据搜索、挖掘方面的能力，刻画能源用户的用能画像，深入挖掘负荷侧潜力。两者技术的结合将显著提升产业园区整体的能源利用效率，实现1+1>2的效果。

目前PEI与数据中心的研究较为分散，分别关注PEI的优化规划与运行[1]、数据中心负载调度[2]及其各自系统的单独设计，少有将两者特性相结合的研究；PEI-DC的发展模式也缺乏现成经验与方向指导。基于此，本文着重讨论PEI-DC在规划建设与运行调控方面的关键技术，对其建设、商业

与运营模式进行论证，展望PEI-DC的未来发展重点并提出对策与建议。

### 二、数据中心园区能源互联网发展需求分析

《2019—2020年中国IDC产业发展研究报告》显示，2019年中国IDC业务市场规模达到1562.5亿元，同比增长27.2%；预计2022年市场规模将超过3200亿元。随着市场规模的扩大，IDC相关的能耗也在不断上升。2017年全国数据中心耗电量为 $1.2 \times 10^8 \sim 1.3 \times 10^8$  MWh，约是2009年的3.5倍；2020年预计达到 $2.5 \times 10^8$  MWh。总体能耗的上升意味着数据中心的节能降耗成为当前工作的重要方向之一。

工业和信息化部、国家能源局在《关于加强绿色数据中心建设的指导意见》中对数据中心的能耗利用效率（PUE）提出了明确要求：到2022年，我国数据中心的平均能耗基本达到国际先进水平，新建大型、超大型数据中心的PUE值低于1.4，高能耗老旧设备基本淘汰；鼓励包括液冷在内的绿色技术产品创新推广，推进余热回收等节能技术；加强能源的综合利用，合理利用清洁能源。

目前，我国数据中心的PUE值大部分在1.5到1.8之间，距国际先进水平仍有一段距离；对供能稳定性的高需求限制了消纳清洁能源的效率，计算机设备产生的大量热能由冷却系统带出后并未高效利用。提升数据中心消纳清洁能源的能力、充分利用冷却系统回收的余热，是解决我国数据中心能耗问题的关键。

PEI技术的应用将成为解决数据中心能耗问题的有效对策之一。利用PEI源荷协同管理的优势，在消纳清洁能源的同时保证数据中心供能的稳定可靠；基于PEI冷、热、电、气多种能源综合利用的特点，充分回收数据中心冷却系统中的余热；通过建设PEI-DC模式，高效协调园区内“源-网-荷-储-充”各个环节，实现数据中心整体能源利用效率的提升。当前PEI与数据中心的研究未能充分融合，一定程度上制约了PEI-DC的发展。PEI与数据中心技术融合的关键因素可分为PEI-DC的建设与运行两大块，细分为设备规划、直流配电、多能流调度、余热回收、负荷管理、储能调度等。

### 三、园区能源互联网发展现状

#### (一) 国外发展现状

在 2008 年率先提出 PEI 概念后, 美国学者主要关注相关系统的架构设计。北卡罗来纳大学研究团队在未来可再生能源传输和管理系统 (FREEDM) 项目中提出了能源路由器的概念, 构建了系统原型, 利用电力电子及通信技术实现区域内电力设备的控制与交互。加州大学伯克利分校研究团队则关注信息与电能传输协议的相互结合, 以分布式控制方式灵活使用电量和电价信息。普渡大学研究团队进一步关注储能系统在能源互联网中的作用。在用户侧, 美国 Opower 公司通过智能电表及智能电网技术实现了能源网与信息网的融合, 通过云平台上的大数据计算与挖掘, 整合分析用户的能耗数据, 建立家庭能耗档案, 并向用户提供个性化的用能和节能建议。

欧洲同样在 PEI 方向上积极展开实践。德国 eTelligence 项目关注港口风能利用, 通过分布式清洁能源、储能与热电联产的结合对区域内能效提升进行了探索。英国曼彻斯特市示范工程关注区域内的供暖问题, 开发综合能源电-热-气-水系统与用户交互平台, 通过冷热电三联供与需求响应技术, 实现了能源梯级高效利用。欧盟 E-DeMa 项目突出区域内多主体交互, 通过智能能源路由器整合用户、发电商、售电商、设备运营商, 在统一系统内进行电能和备用容量的交易。

日本较多关注电能的集中调度。通过电力路由器的形式对区域内的电力进行统一管理调度, 将相应的“IP 地址”分配给发电机、电源转换器、风力发电场、太阳能电池以及其他电网基础结构, 由电力路最终由器完成网中的能源分配。

#### (二) 国内发展现状

我国 PEI 方面的实践相对较晚, 但同样对 PEI 的基本架构、规划与运行展开了探索。为落实《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》, 2017 年 7 月国家能源局启动了“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的申报工作。首批公布了 55 个“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目, 包括北京延庆能源互联网综合示范区、

能源互联网试点示范园区等, 标志着我国 PEI 进入实际工程示范阶段。2018 年 12 月, 国家能源局发布了《关于发展“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目验收工作的通知》, 要求在 2019 年 4 月底前完成验收工作。

我国 PEI 朝着多能互补的方向发展, 目前多以电力网和天然气网为核心, 对园区内的电、气、冷、热等多种能源进行统筹调度, 并通过热电联产、冷热电三联供等技术实现能源的梯级高效利用; 在此基础上, 进一步考虑分布式新能源、储能以及需求侧响应在规划及运行中的影响与作用。与欧洲、日本不同, 我国幅员辽阔, 地区之间的自然资源与社会发展情况差异明显; 应结合各地区实际情况, 构建物理模型与信息结构深度融合的、多种能源高效利用、多元负荷主体深度参与的 PEI, 同时充分激发需求侧市场潜力。

### 四、数据中心园区能源互联网关键技术分析

#### (一) 规划与建设技术集群

##### 1. PEI-DC 设备规划技术

该领域的研究目前多为在不同指标的约束下, 通过数学解析计算或者建模优化求解的方法, 完成园区内多种能源设备的配置, 使园区设备配置方案具有更为优良的经济性、环保性与可靠性。

##### (1) 经验测算规划方法

规划人员根据工程经验和各类设计原则, 如以热定电、以电定热、按面积配置、按比例配置等, 对区域内的能源设备进行规划。文献[3]对冷热电三联供系统进行设计, 以屋顶面积为原则确定光伏配置容量, 以平均热负荷、平均冷负荷、50% 的电负荷的需求确定设备容量。文献[4]以满足负荷需求为原则, 对某车站综合体的冷热电负荷进行预测, 并对比了基于以热定电、以电定热的两种配置原则的不同方案。经验测算方法计算流程直观, 过程简洁, 但对于规划方案的经济性、环保性指标考虑不严格, 仅适用于 PEI-DC 内小范围的局部能源设备配置, 而用于整体规划则存在过于简化、对多种能源设备交互运行考虑不足的问题。

##### (2) 建模规划方法

对规划目标整体建立数学模型, 基于不同规划

目的构建目标函数，通过求解目标函数来实现方案在经济性、环保性与可靠性层面的最优配置以及多个指标之间的相互平衡。相较于经验测算方法，通过求解模型进行设备规划通常能够寻得不同指标下的最优配置，但考验建模的精确程度。更精确的建模将增加模型的复杂程度，增加求解难度。除规划指标外，不确定性作为多时间尺度规划的重要考虑因素也受到更多的关注。通过基于最劣条件的区间优化 [5]、基于场景的随机规划技术 [6]，实现规划方案在不同时间尺度上对于不确定性的适应能力。

上述规划方法研究虽然缺少对数据中心的用能和发展特征的考量，但为 PEI-DC 模式的建设提供了较为完整的技术基础。通常数据中心的规划至少需要考虑满足未来 10~15 年的需求变化，而以互联网为主的业务结构使其很难直接采用传统方法预估长期业务需求，这对 PEI-DC 的设备规划方案提出了时间尺度方面的挑战。数据中心需求变动大的特点也考验了规划方案的扩展性。规划应充分考虑能源政策、区域特征以及供需特性等信息，结合大数据、云计算等信息技术，准确刻画区域未来发展图景，保障实施效果。

### 2. PEI-DC 直流配电技术

近年来，直流配电系统（DCS）因输送容量更大、供电质量更优、易于接纳分布式能源、可控性更高 [7] 等优势而受到关注。数据中心的大部分电子元件都由直流电源驱动，同时考虑直流配电系统在面向分布式电源、储能、充电站桩、柔性负荷等方面的应用具有先天优势 [8]，研究 PEI-DC 的直流配电技术将有助于园区内新能源、储能的广泛接入，支持实现负荷侧的智能化调控。作为基于电压源换流器提供直流电力的智能化配电系统，DCS 虽然具有供电质量高、适合互动化接入优势，但也应关注其可靠性、稳定性与经济性问题。目前 DCS 研究较多关注控制与稳定、故障识别与保护、拓补与组网等技术。上述研究均聚焦于 DCS 的单独运行环境，而对多种能源相互耦合的 PEI-DC 运行环境考虑较少。

相较于交流配电系统，在 PEI-DC 中组建 DCS，减少了各类能源设备接入配电系统所经历的变换步骤，在提高效率 and 功率密度的同时降低了成本 [9]。DCS 的直流配电母线不存在相位和频率同步的问

题，支持了园区内源、荷、储、充各个环节设备的即插即用，简化了控制难度，由此提高了可靠性。PEI-DC 中的 DCS 应充分利用园区物理网与信息网紧密结合的优势，深入研究实时信息采集传输技术与海量数据快速处理技术，在 DCS 的控制稳定、运行管理与故障保护等环节投入使用，提升 DCS 的灵活性与可靠性。

### 3. 数据中心余热回收技术

冷却系统的能耗约占数据中心总能耗的 30%~40%，有效利用冷却系统带出的大量机房热量具有重要意义。建设 PEI-DC 余热回收系统，与 PEI-DC 多能流调度技术结合，充分利用数据中心回收的余热，将有效提升园区的能源利用效率，进一步降低 DC 的 PUE 值。文献 [10] 以数据中心作为节点建立区域供热模型，分析验证了余热回收的节能意义。文献 [11] 将数据中心在区域供热系统中考虑为热源，分析在节能降耗、经济运行方面的收益。文献 [12] 提出基于热虹吸 / 蒸汽压缩循环复合制冷技术的热回收方案，利用逐时稳态模型分析供暖效果。

目前的数据中心热回收系统研究大多立足于制冷学科领域，较为复杂且较难与电力领域模型结合，距离与 PEI-DC 的规划与运行模型相结合仍有一定距离。应从电力工程角度出发，精简热回收系统的数学模型，提取模型中有关系统成本、能耗及回收效率的关键数据，构建适用于 PEI-DC 框架的热回收系统模型。

## （二）运行与调控技术集群

### 1. PEI-DC 多能流调度技术

PEI-DC 作为含冷、热、电、气等多种能源与众多能源设备的系统，对其进行科学高效的调度是实现园区内“源-网-荷-储-充”协调的基础与关键。多能流调度已有不少研究，大都以经济性、环保性、可靠性、能源利用率为指标，寻求多种类型能源设备的最优调度方法 [13]，并探讨设备种类、能源价格、用户舒适度和不同调控手段对调度结果的影响。同时，PEI-DC 作为含有多种形式能源的系统，其不确定性复杂程度远超所包含的单一系统，可能分布于能源生产、传输、转换、消费等多个环节，因此研究多能流调度中有关不确定

性处理的技术也是重点之一。目前相关研究主要通过区间优化 [14]、基于场景的随机优化 [15]、鲁棒优化的各种改进形式 [16] 来提高系统适应不确定性的能力,但未在调度过程中考虑数据中心的能源需求特性。

多能流调度技术是实现 PEI-DC 余热回收、负荷管理及储能调度的基础技术框架。研究 PEI-DC 的科学高效调度方法,充分考虑当前互联网环境下数据中心的数据处理业务需求,通过转换模型将其业务特性与能源需求特性相关联,实现数据中心与园区整体设备的稳定、环保、高效运行。

## 2. PEI-DC 负荷管理技术

作为不间断运行的高能耗设备,数据中心的能源需求具有较大的波动性,满载与空载能耗差可以达到 100%。对供能稳定性的需求制约了园区对具有不确定性的新能源的消纳,由此增加了备用冗余设备。通过数据中心负荷的优化管理,降低能源需求峰谷差,消纳可再生能源,提升数据中心的经济性与环保性。文献 [17] 通过智能算法分配数据中心工作负载,通过负载集中优化服务器启停,可降低超过 6.1% 的能耗。以此为基础,文献 [18] 在考虑实时电价的基础上,通过时间尺度上的负载转移来降低数据中心购能成本。文献 [19] 在实时电价的基础上进一步考虑可再生能源的接入,通过调度策略匹配数据中心负载与可再生能源。

从 PEI-DC 整体出发,若只考虑数据中心的负载调控能力,将极大限制了园区运行优化的潜力。应同时考虑园区内可能存在的其他种类能源负荷(如工业、商业、居民、电动汽车等)参与负荷调控。例如,基于调度中心的集中式激励型需求侧响应和基于能源价格的需求侧响应,并考虑不确定性的影响,可保证 PEI-DC 多能流调度的经济与平稳,增强调控能力。通过与数据中心负载管理技术相结合,同时参与园区负荷管理,两者互补将很大程度提升园区负荷调度的潜力,提升消纳清洁能源的能力与供能可靠性,在故障时提供容量支援,降低数据中心备用容量需求并提升经济性。

## 3. 计及储能的 PEI-DC 调度技术

储能作为 PEI-DC 中的重要能源设备之一,在能源的优化调度中可发挥关键作用。通过电能、天然气、氢气、蓄冷、蓄热等多种储能设备的单一配

置或混合配置,来强化 PEI-DC 在消纳清洁能源、削峰填谷方面的能力,提升系统运行的经济性与环保性。利用储能的备用技术提高系统稳定性,并平衡储能调度的稳定性与经济性。文献 [20] 基于带有中间缓冲环节的可再生能源发电技术(P2G),提出一种氢能-天然气混合储能系统方案,在不同水平风电渗透率的场景中证明了经济性与环保性。文献 [21] 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,在备用容量最小的前提下显著提升系统对于故障的适应性。文献 [22] 在多长时间尺度下考虑多源储能的调度,通过滚动控制域内购能、处罚成本与功率调整量最小,在保证系统经济性的情况下降低不确定性对系统运行的影响。

PEI-DC 负荷管理技术应用于优化调度,同样能起到提升经济效益、提供备用容量、提升系统稳定性的作用。相较于储能,PEI-DC 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。结合储能的充能/供能功率大小确定、响应快速的特点,可进一步减少数据中心中的备用,降低设备投资。结合数据中心供能稳定性需求高,备用容量大的特点,完善适应于 PEI-DC 的储能优化调度技术。

## 五、数据中心园区能源互联网的发展模式

### (一) PEI-DC 建设模式

建设 PEI-DC,应当融合 PEI 在多能源互联互通和数据中心在数据整合运算方面的优势,实现园区整体在物理层面与信息层面的连接。通过能源转换设备将园区内电力、天然气、供热、供冷网络相互耦合,利用 PEI 多能耦合调度技术实现不同类型能源之间的梯级利用及优势互补;经能源网络在物理层面与数据中心连接,实现数据中心的高效供能。通过园区内广泛分布的智能传感器,收集众多能源设备与能源用户的海量数据,经园区通信网络统一于数据中心,实现整个园区在信息层面的连接。

PEI-DC 是园区范围能源生产、转换、储存、消费等环节有机协调,冷、热、电、气等多种能源连接交互,信息网与能源网紧密连接的系统(见图 1)。

相较于普通数据中心产业园，PEI-DC 具有鲜明特征。

(1) 分布式新能源大量接入。多种能源耦合互补的供能形式显著提升了 PEI-DC 消纳新能源的能力，大量分布式新能源的接入将有效提升数据中心供能的环保性。

(2) 智能用电终端广泛存在。物理层与信息层的紧密结合让园区内各个环节得以更频繁地交互，传感设备与数据中心的高效信息流将有助于智能用电终端充分发挥其负荷调控的潜力。

(3) 高效可靠供能。PEI-DC 内存在多种能源的储能设备，在园区发生故障时能快速通过储能调度技术提供备用容量，为数据中心提供稳定可靠的供能。

(4) 数据驱动的园区管理。智能传感器收集的园区海量信息汇集于数据中心，通过大数据挖掘技术，实现园区内基于数据驱动的源荷预测、设备监测与负荷侧管理。

依据 PEI-DC 的建设规划，完成园区内设备与网架的高效部署；结合 PEI-DC 的运行调控技术，进行园区内“源-网-荷-储-充”的统一协调；平衡园区运行的经济性、可靠性与环保性，实现 PEI-DC 的高效绿色运行。

## (二) PEI-DC 商业与运营模式

结合数据中心的数据挖掘与数据处理功能，

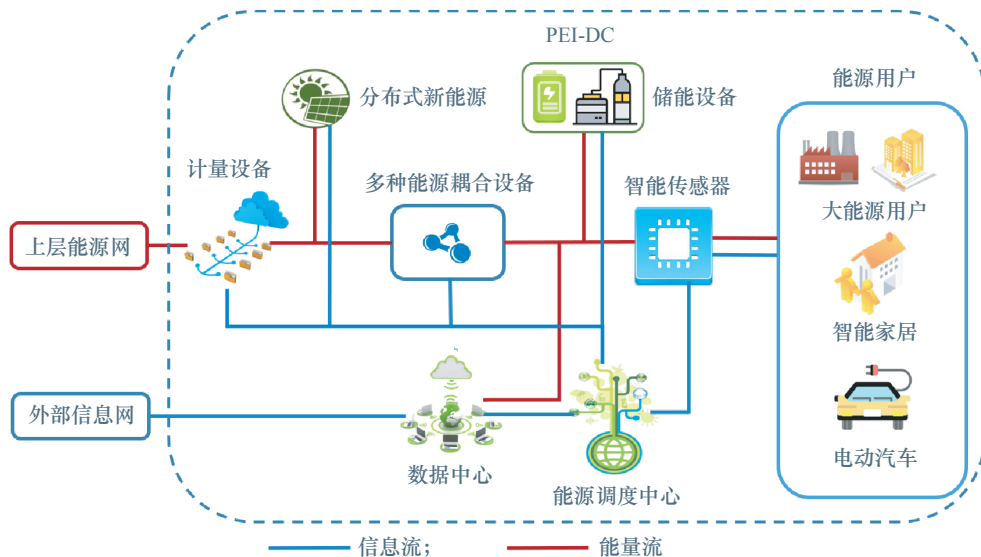
PEI-DC 运营可以实现园区与用户间能量流与信息流的互联互通，充分利用可再生能源，提高能源使用效率，向用户提供个性化服务，开创新的商业模式。对商业运营模式的探索能够帮助 PEI-DC 实现资源优化配置，凸显竞争优势。

### 1. 大数据支撑下的清洁供能服务

大量分布式清洁能源接入园区，在带来清洁供能的同时，其高波动性与不确定性也制约了清洁能源的可靠消纳，必须寻求合适的方式进行快速精确的出力预测。PEI-DC 广泛分布的智能量测设备，收集海量数据为大数据技术应用提供了基础。结合数据分析和天气建模技术，可以进行混合可再生能源预测，实现海量数据量下的快速评估。大量交互的用户用能数据信息可用于各种能源的消费预测，根据用户特性制定适当的激励机制，促进新能源消纳，优化园区用能整体清洁性。在此基础上，对有特殊用能需求的用户，深度挖掘其用能数据，刻画用户用能画像，进行源荷匹配，为用户提供更加稳定可靠的清洁供能服务。

### 2. 基于大数据分析的高可靠性供能服务

部分 PEI-DC 的能源用户对供能可靠性有着更高要求，为这类用户提供高可靠性的能源将是 PEI-DC 的服务方向之一。利用园区运行过程中收集的海量数据，通过大数据分析方法和 AI 技术，及时掌握运行中异常问题和潜在风险，实时把控园区运行状态，规避园区运行存在的风险。利用大数据技术开



展用能宏观变化趋势和局部用能精细化预测,提高用能预测精准度,更准确地对能源生产与用能进行协同调度,提高园区运行整体稳定性。与用户签订可靠性协议,面向用户用能需求推出大数据分析增值服务;在园区多能流调度中结合分析结果,利用 PEI-DC 储能调度及负荷管理手段来满足客户供能特异性需求,实施精准可靠供能。

### 3. 5G 和物联网共同助力下的智能化服务

数据中心的 PEI-DC 建设模式使得数据中心在选址方面具有更大的自由度,不再局限于单独建在为其提供充足电力能源的发电厂附近,或在冷却需求小并因此额外能源需求低的气候环境中,而是更加靠近用户侧。这为园区内部及其周边地区的智能化服务推进提供了有利条件。通过 5G 技术实现园区及其周边一定范围内设备到数据中心的高效率交互,区域内稳定且低于 1 ms 的访问延迟使汽车自动驾驶、虚拟现实或增强现实系统在保证发挥效率的同时,得以省去本地的数据存储,并转而依赖于单位成本更低、数据存储和计算能力更强的数据中心。与物联网技术结合,实现园区内多种终端连接到云,通过 5G 网络提供稳定高效的连接,PEI-DC 将提供多样化的智能化增值服务。

## 六、数据中心园区能源互联网的未来发展重点

### (一) 数据驱动的园区能源互联网运营模型与方法

PEI-DC 广泛分布的智能量测设备收集了大量信息,包括园区气象、负荷、交通、能源网架与能源设备的实时与历史数据,基于数据驱动的相关技术成为有效利用这些数据以更好支持 PEI-DC 运营的关键。在数据驱动下的新能源出力预测、短期负荷预测、电动汽车充电需求预测、热电耦合系统潮流求解方向已有一些研究,但研究内容相对独立和分散。PEI-DC 作为一个紧密耦合的系统,从能源生产到消费的各个环节相互关联、相互影响,从单一角度切入研究的技术若直接应用,将缺失必要的整体效应。PEI-DC 的信息层与物理层紧密联结,为园区数据驱动的运营提供了基础条件。未来应从 PEI-DC 整体角度出发,研究数据驱动相关技术在“源-网-荷-储-充”各个环节的复合应用,充分利用园区内数据中心的海量数据整合、运算、发布能力,通过 5G、物联网等技术实现数据中心到

边缘设备的低延迟、高频率交互,推动数据驱动下 PEI-DC 的高效运营。

### (二) 考虑数据中心负荷空间特性的多园区能源互联网协同调控

随着数字化进程的加快,在国家“新基建”有关政策的推动下,数据中心产业园项目将不断建设落地,逐步形成多个产业园区在能源、信息系统方面紧密互联的局面。在我国电力体制改革和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。在开放的能源市场下,区域内多个 PEI-DC 决策主体间以能源价格为导向,根据自身利益最大化进行合作或博弈协同,势必对区域整体运行的稳定性与经济性构成挑战。目前已有基于能源价格的区域内多园区主体的优化调度技术研究,但缺少对数据中心负荷时空特性的考量。上述研究中的园区负荷都具有本地性,根据能源价格的引导只能在时间维度上进行平移或者削减。区别于此,数据中心负荷可以根据区域能源价格的不同,通过互联网等信息网络,将数据运算业务向运算成本较低的数据中心转移,完成空间维度上的负荷转移。因此,在多 PEI-DC 的调控中,应进一步考虑数据中心负荷的时空双重特性,与其他园区负荷的调节能力相结合来平衡区域内负荷在时间与空间上的分布,最终实现区域整体的高效运行。

## 七、数据中心园区能源互联网的发展建议

(1) 技术层面。优先攻关 PEI 与数据中心间的技术壁垒。数据中心冷却系统研究的模型并未很好地与电力领域适配,PEI 的规划与调度研究中也鲜有对数据中心负荷特性的考量。对两者的模型进行适应性修改,或通过接口设计使其相互结合,建立统一完善的 PEI-DC 规划/运行模型是当前技术研究的关键。

(2) 实践层面。我国不同地区在自然资源、社会发展和负荷种类、水平等方面存在明显差异,PEI-DC 的建设不能采用有固定标准的模式,而是要注重与地区实际情况的结合。优选适宜 PEI-DC 发展的区域作为试点,因地制宜地开展 PEI-DC 的实践工作,积累 PEI-DC 的建设与运营经验;跟随

“新基建”的浪潮，探寻 PEI-DC 与 5G、大数据、物联网等发展热点的相互结合。

(3) 政策层面。PEI-DC 相较于传统电力系统，其初期建设投入相对较高，可出台相关财政激励、税收减免等政策来推动 PEI-DC 的投资与建设；完善监管体系，保证发展的科学性与公平性，建立与之配套的能源市场机制。在健全的市场机制下，PEI-DC 中各个主体进行互动与交易，充分发挥 PEI-DC 在负荷调控、源荷协调与多能流调度方面的应用潜力。

参考文献

[1] Cao Y J, Li Q, Tan Y, 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] Basmadjian R, Botero J F, Giuliani G, et al. Making data centers fit for demand response: Introducing GreenSDA and GreenSLA contracts [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3453–3464.

[3] 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(硕士学位论文), 2017.  
Cheng J. The design and research of comprehensive energy system based on the CCHP system [D]. Beijing: North China Electric Power University(Master's thesis), 2017.

[4] 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): 22–27.  
Liu G K, Shen G M, Xu X H, et al. Design study on natural gas combined cooling, heating and power system for a station complex [J]. *Gas & Heat*, 2018, 38(8): 22–27.

[5] 仇知, 王蓓蓓, 贲树俊, 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 Z, Wang B B, Ben S J, 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.

[6] 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 J, Yong J, Huan J J, 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.

[7] 姚钢, 茆中栋, 殷志柱, 等. 楼宇直流配电系统关键技术研究综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 156–170.  
Yao G, Mao Z D, Yin Z Z, et al. Key technologies of building DC power distribution system: An overview [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 156–170.

[8] 周京华, 吴杰伟, 陈亚爱, 等. 张北阿里云数据中心柔性直流输电系统 [J]. *电气应用*, 2019, 38(1): 54–58.  
Zhou J H, Wu J W, Chen Y A, et al. Zhangbei Alicloud data center flexible DC transmission and distribution system [J].

*Electrotechnical Application*, 2019, 38(1): 54–58.

[9] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 39–49.  
Zhang Y J, Liu Z W, Song W W, et al. Networking technology and its application of DC distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 39–49.

[10] Woodruff J Z, Brenner P, Buccellato A P C, et al. Environmentally opportunistic computing: A distributed waste heat reutilization approach to energy efficient buildings and data centers [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 69: 41–50.

[11] Davies G F, Maidment G G, Tozer R M. Using data centers for combined heating and cooling: An investigation for London [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 296–304.

[12] Zhang P L, Wang B L, Wu W, et al. Heat recovery from internet data centers for space heating based on an integrated air conditioner with thermosyphon [J]. *Renewable Energy*, 2015, 80: 396–406.

[13] 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 X M, Zhang Y J, Xiao Y, et al. A two-stage dispatch model of park energy Internet with P2G devices considering start-up state of devices [J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(10): 62–70.

[14] 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 M K, Wang Y, Tang W, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(12): 240–247.

[15] 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.

[16] 高晓松, 李更丰, 肖遥, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度 [J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2245–2254.  
Gao X S, Li G F, Xiao Y, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2245–2254.

[17] Frederic B, Martin D, Jorg A, et al. Power model design for ICT systems—A generic approach [J]. *Computer Communications*, 2014, 50(1): 77–85.

[18] Dan X, Xin L, Bin F. Efficient server provisioning and offloading policies for Internet datacenters with dynamic load demand [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, 64(3): 682–697.

[19] Lei H T, Zhang T, Liu Y J, et al. SGEES: Smart green energy-efficient scheduling strategy with dynamic electricity price for data center [J]. *The Journal of Systems and Software*, 2015, 108: 23–38.

[20] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能的电-气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 J C, Zhou C Y, Gao H J, 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.



- [21] 练依情, 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 Y Q, Guo Z G, Ma X Y, et al. Resilience scheduling of integrated electricity and gas community system considering hot reservation [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(11): 115-121.
- [22] 何畅, 程杉, 徐建宇, 等. 基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调度 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 77-84, 97.  
He C, Cheng S, Xu J Y, et al. Coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering multi-time scale and hybrid energy storage system [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(2): 77-84, 97.