

# 能源大数据技术的应用与发展

蔡泽祥<sup>1</sup>, 李立涅<sup>1,2</sup>, 刘平<sup>1</sup>, 徐敏<sup>2</sup>, 陈泽兴<sup>1</sup>, 张勇军<sup>1</sup>, 韩永霞<sup>1</sup>, 许爱东<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

**摘要:** 能源大数据技术作为“互联网+”智慧能源的重要组成部分, 对推动我国能源革命、促进能源转型以及刺激能源行业创新发展具有重大作用。本文以“互联网+”智慧能源为背景, 阐述了能源大数据技术的结构形态与关键特征; 立足于大数据在我国新时代下能源行业发展的重要支撑意义, 探讨了能源大数据技术的主要应用领域, 重点讨论了目前实现能源大数据的主要制约因素; 最后提出了几点发展对策, 力求助力我国能源大数据的建设与完善, 推动“互联网+”智慧能源的深度发展。

**关键词:** 能源大数据; 互联网+; 智慧能源; 信息通信设施; 能源产业

**中图分类号:** TM71 **文献标识码:** A

## Application and Development of Energy Big Data

Cai Zexiang<sup>1</sup>, Li Licheng<sup>1,2</sup>, Liu Ping<sup>1</sup>, Xu Min<sup>2</sup>, Chen Zexing<sup>1</sup>,  
Zhang Yongjun<sup>1</sup>, Han Yongxia<sup>1</sup>, Xu Aidong<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Energy big data, as a significant part of “Internet Plus” smart energy, plays a critical role in promoting the energy revolution of China, facilitating the country’s energy structure transformation, and stimulating innovative development of energy industries. In the context of “Internet Plus” smart energy, the basic framework and the key features of energy big data are discussed initially in this paper, followed by a discussion on the major applications of energy big data in energy industries. This paper also reveals some dominant obstacles to energy big data development based on the status quo of energy big data in China. Finally, several suggestions are proposed for energy big data development to overcome these obstacles, with the intent of advancing the construction of energy big data and application of “Internet Plus” smart energy in China.

**Keywords:** energy big data; Internet Plus; smart energy; information and communication infrastructure; energy industries

### 一、前言

在全球迫切需要实现能源转型的发展潮流下, “互联网+”智慧能源已成为广受能源领域关注的热点,

能源网与互联网的深度融合是解决当前能源问题, 重塑全球能源格局的重要变革力量 [1]。能源大数据融合了海量能源数据与大数据技术 [2], 是构建“互联网+”智慧能源的重要手段。它集成多

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-03-26

通讯作者: 蔡泽祥, 华南理工大学, 教授、博士生导师, 主要从事能源互联网规划与运行等方向的研究; E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

种能源（电、煤、石油、天然气、供冷、供热等）的生产、传输、存储、消费、交易等数据于一体，是政府实现能源监管、社会共享能源信息资源、促进能源体制市场化改革的基本载体 [3,4]。同时，能源大数据以数据开放共享为核心理念，是应用互联网机制与技术改造传统能源系统的最佳切入点，是推进能源系统智能化转型升级的有效手段。进一步地，能源大数据是打破行业壁垒，促进各种能源系统融合的助推剂，将催生一批智慧能源新兴业态，亦是实现能源行业转型升级、打造新的经济增长点的关键技术 [5~7]。

为此，本文从能源大数据技术的基本内涵出发，阐述了能源大数据的基本架构及典型特征，总结了国内外大数据在能源领域的应用现状，并探讨了目前我国能源大数据建设中所存在的问题。立足现存问题，对我国下一步能源大数据产业的布局提出了若干发展建议，以支撑“互联网+”智慧能源战略发展。

## 二、能源大数据技术的基本内涵

大数据是以整个数据集合为研究对象的一项综合技术，是传感技术、信息通信技术、计算机技术、数据分析技术与专业领域技术的结合，是对传统的数据挖掘、数据分析技术的继承和发展 [8~10]。随着我国“互联网+”在能源行业的深入发展，所衍生的“互联网+”智慧能源融合互联网的思维和技术，改造传统能源的生产、传输、消费、转换、交易等全产业链，依托能源大数据技术，形成能源与

信息高度融合、互联互通、透明开放、互惠共享的新型能源体系。面向“互联网+”智慧能源的能源大数据基本架构由应用层、平台层、数据层以及物理层组成，如图1所示。

能源大数据的物理层包括了能源生产、能源传输、能源消费全环节以及每一环节的各类能源装备。通过装设在能源网络和能源装备的传感器装置和能源表计获取系统运行信息及设备健康状态信息，并将数据信息交由智能运营维护与态势感知系统实现数据可视化展示、状态监测、智能预警和故障定位等功能。信息通信与智能控制系统则负责能源系统各环节、各设备间的通信以及控制。所产生的海量数据均与气象环境等外部系统数据一同存储在能源大数据的专用数据库中，以进一步加工并用于能效情况评价、风险辨识评估以及能源经济利用分析等功能中。基于能源大数据技术可实现能源生产侧的可再生能源发电功率的精准预测并协同电-气-冷-热的多样化能源优化配置；在能源传输侧实现智能化的能源网络在线运营维护，有效监控能源系统的运行状态，自动辨识故障位置；为能源消费侧的用户提供能效分析与能效提升服务，并可整合能源消费侧的各类负荷资源，实现需求侧响应，充分提高能源利用效益。

本文以表1所示的用电大数据为例分析能源大数据的主要特征。能源大数据一般从多个数据源采集数据信息，如用电大数据的数据来源形式包括用户层面的企业报表以及设备层面的电能表计乃至系统层面的各类控制与运营维护系统的数据信息。与

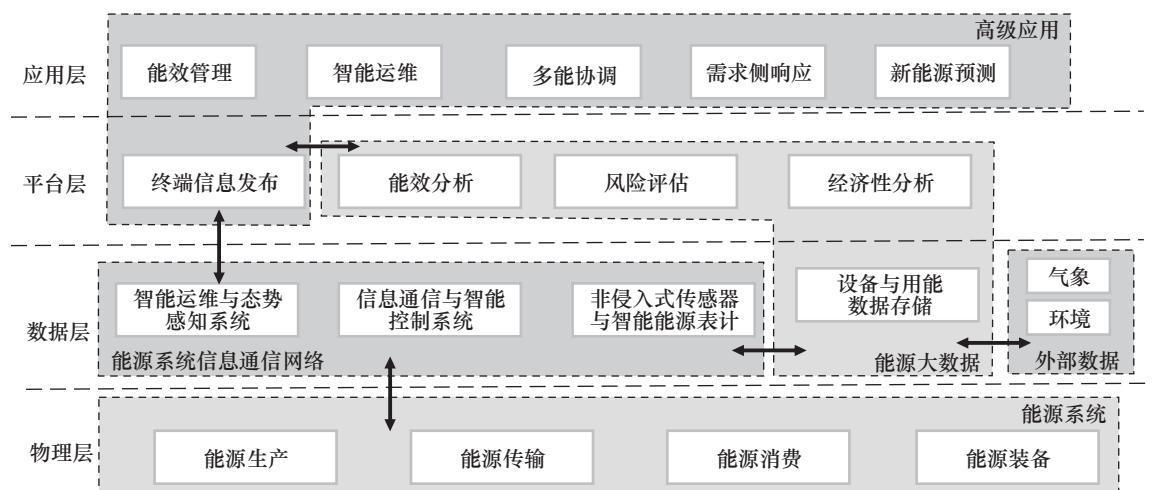


图1 能源大数据基本架构

表 1 用电大数据主要来源形式

数据来源	数据量级	平均采集成本	覆盖程度	数据时空颗粒度	直接用途	共享程度
企业能源报表	千字节 (kB) 级	无直接成本	规模以上企业	以企业为单位的月度或年度统计	政府统计	宏观信息公开
电能计量	太字节 (TB) 级	0.2~0.5 万元 / 数据源点	全范围覆盖	时间: 月度; 空间: 专用及公用变压器	供电公司计费	保密不公开
负荷控制系统	拍字节 (PB) 级	>1 万元 / 数据源点	专用及公用变压器: 发达地区基本 100% 覆盖; 其他地区程度不同	时间: 15 min; 空间: 专用及公用变压器	供电公司大负荷管控	保密不公开
运维监控系统、能效管理系统、售电服务系统	艾字节 (EB) 级	0.2~0.5 万元 / 数据源点	覆盖低, 由第三方运营维护、能源服务 (售电) 公司或企业自主安装	时间: 1~5 min; 空间: 分支线路、生产线、工艺流程, 程度不一	企业级电气设备运营维护、能效管理、售电服务	数据分散在企业或第三方能源服务公司, 集中度较低

传统能源系统的结构化量测数据相比, 每类数据源的数据采集所覆盖的范围大小不一, 数据信息聚焦的时空尺度有别, 在数据多样性方面呈现出明显的多源异构特征 [11]。由于大数据技术在能源全环节传感信息采集装置与能源设备中的海量应用, 使得能源大数据的量级达 TB 至 PB 级甚至 EB 级以上; 另一方面, 能源大数据强调数据采集的时效性与全面性, 所获得的数据采集频率在分钟级以内, 数据增长速度快。此外, 为了更好地应用于“互联网+”智慧能源系统中, 数据不再仅局限于过去的统计分析与周期报表制作环节, 而是被进一步加工、分析与利用, 并在用户用能特性与潜力的挖掘、源-荷特性的预测分析、能源市场交易以及其他增值服务等方面得到充分应用。

### 三、能源大数据技术的应用领域

随着互联网技术与互联网思维逐步与能源系统实现融合, 能源行业开始意识到能源大数据在能源行业全环节的巨大应用潜力, 新时代对促进可再生能源的发展、激发能源行业的跨界融合活力与创新动力具有重大的意义。能源大数据技术有利于政府实现能源监管、社会共享能源信息资源, 是推进能源市场化改革的基本载体, 也是贯彻落实国家“互联网+”智慧能源发展战略、推进能源系统智能化升级的重要手段, 同时在为助力跨能源系统融合, 提升能源产业创新支撑能力, 催生智慧能源新业态与新经济增长点等方面发挥积极的作用。

能源大数据的应用领域主要体现在以下几个方面:

#### 1. 能源规划与能源政策领域

能源大数据在政府决策领域的应用主要体现在

能源规划与能源政策制定两个方面。在能源规划方面, 政府可通过采集区域内企业与居民的用电、天然气、供冷、供热等各类用能数据, 利用大数据技术获取和分析用能用户的能效管理水平信息与用能行为信息, 为能源网络的规划与能源站的选址布点提供技术支撑。此外, 基于用能数据、地理信息以及气象数据可分析区域内的基本能源结构与能源资源禀赋, 为实现能源的可持续开发与利用提供指导方向。在能源政策的制定方面, 政府可利用大数据分析区域内用户的用能水平和用能特性, 定位本地企业的能耗问题, 研究产业布局结构的合理性, 为制定经济发展政策提供更为科学化的依据; 另一方面, 依托能源大数据对能源资源以及用能负荷的信息挖掘与提炼, 为政府制定新能源与电动汽车补贴方案、建立电价激励机制等国家和地方政策提供依据, 也为政府优化城市规划、发展智慧城市、引导新能源汽车有序发展提供重要参考。

#### 2. 能源生产领域

在能源生产领域, 大数据技术的应用目前主要集中在可再生能源发电精准预测、提升可再生能源消纳能力等方面。由于可再生能源具有天然的间歇性与随机性, 需要合理进行储能等灵活性资源配置规划并依赖可靠、可信的功率预测信息安排电源的运行方式, 以充分降低可再生电源对电网的冲击影响, 减少弃风弃光现象, 并保证供电可靠性。目前, 国内远景能源科技有限公司以实现风电与光伏的智慧化能源生产为目标, 融合物联网、大数据以及机器学习技术打造的 EnOSTM 平台每天处理将近 TB 级的数据量, 在可再生能源功率预测水平及控制精度等方面领先业内同行。此外, 国外学者利用大数据对气象统计、地理图像等信息研究风场选址以及

提升设备运行寿命的自动发电控制等方面进行了深入的研究 [12,13]。随着互联网技术在能源生产领域的不断融合,可以通过互联网整合区域内所有风场功率预测的可用数据,打破单一风电场孤立预测的传统模式,有利于实现预测信息的开放交互,进一步提升可再生能源预测的服务质量 [14]。

### 3. 能源消费领域

随着能源消费侧的可再生能源渗透比例不断提高以及微电网系统的逐渐成熟,能源用户从传统消费者的角色向产销者的角色过渡。有效整合能源消费侧可再生能源发电资源、充分利用电动汽车等灵活负荷的可控特性以及参与电力市场的互动交易并实现利润最大化,是目前大数据技术在能源消费领域的热点研究问题 [10]。对此国内外已对能源消费终端的大数据技术实际应用开展了有益的探索。美国的 C3 Energy 和 Opower 公司运用大数据技术开发了分析引擎平台和用能服务平台,为用户提供用能服务,为实现需求侧响应提供重要支撑 [15]。德国的 E-Energy 项目为促进可再生能源预测、能源服务商业模式的开发以及能源交易等提出了基于大数据技术的有效解决方案 [16,17]。我国“全国智慧能源公共服务平台”于 2015 年 2 月启动,目前已有 14 个省市单位签约构建智慧能源地方分平台。该平台主要提供能源数据采集和分析功能,通过云平台建立实时设备管理数据平台,打造新的销售模式,从而获得高性价比的产品和解决方案,目标是实现降低用能成本,提高能源利用效率,打破政府和金融机构各自封闭的信息孤岛,掌握真实透明数据,实行有效的监管和调控。

### 4. 智慧能源新业态

随着能源大数据技术在能源系统的深度扩展,将在能源网络的监控与运维、能源市场化交易等方面催生一批崭新的智慧能源服务新业态。在能源系统的运维方面,基于广域量测数据的态势感知技术已应用于智能电网的输配电站的在线运营维护中,实现实时事件预警、故障定位、振荡检测等功能 [18,19]。此外,风电、光伏等可再生能源电站硬件繁杂、选址分散,需借助大数据技术根据机组回传数据分析监测各零件的磨损、疲劳情况,据此在线预测和判定设备的运行状态,有助于简化大规模监测系统的部署,及早防范潜在的故障因素 [20]。

展望未来,能源系统融合必将扩大设备规模与能源网络的复杂程度,而且随着电力市场的逐步放开完善,将在同一区域内涌现多家售电主体。这将导致运营区域和电力资产分散,配备专业运维队伍缺乏经济性,因此传统的集中式运营维护模式难以适应能源系统的发展趋势。通过引入互联网共享理念,利用互联网与大数据技术实现分布式运营维护,依据运营维护需求与地理信息匹配专业运营维护商将是未来能源大数据所衍生的新业态模式。

另一个值得关注的是能源大数据技术对能源交易市场建设与完善的重要推动作用。目前,国内外的能源大数据在能源交易方面的实际应用仍处于起步阶段。英国国家电网在美国的纽约布法罗医学院校区建立了微型光伏售电交易市场试点,运用大数据技术对该区域内的光伏、储能与用户负荷实现优化匹配,并提供发电资源的定价服务 [21]。随着能源大数据技术在能源生产、传输、消费各环节的深入发展与逐渐成熟,可为能源行业提供开放、共享的能源信息平台,推进能源自主灵活交易,使得能源价格信息能够直接反应供需关系,引导资源进行优化配置,促进公平、公开、共享的能源市场环境的形成。此外,通过能源大数据技术可有效引导各类高效能源技术根据需求和技术特点优化组合,形成各类能源交易与增值服务等综合能源服务新模式。

## 四、我国能源大数据技术现状分析

目前,随着新型传感器、新的传输机制(如多址技术、扩频技术等)、光纤传输技术、数据预处理技术等的发展,信息系统通信质量在不断地提升,基于能源数据分析处理的能源系统决策在不断地推进能源系统优化,在能源生产、传输、消费等环节已得到初步的应用和实践。但由于在信息管理机制、信息基础设施建设、信息安全等方面仍面临瓶颈,能源大数据的建设与应用程度较低,成为制约能源系统“互联网+”升级的瓶颈。目前能源大数据利用现状所存在的主要问题可概括为以下几点。

### 1. 能源系统普遍存在信息孤岛

海量能源数据的获取是建设能源大数据的基础,但能源领域普遍存在的信息孤岛问题却成为推进能源数据资源整合的一个重要制约因素。

一方面，在电力、煤炭、石油、天然气、供冷/热等能源企业信息化的进程中，由于缺乏有效的统一管理机制，造成能源企业存在多套独立的能源管理系统，通过各自的传感器可以采集单独系统的数据。但由于各系统架构、协议等不一致，各自采集的数据无法共享，制约了能源大数据进一步地分析与挖掘。另一方面，传统电力及其他能源系统长期保持着各自规划、独立运行、条块分割的局面，跨系统间的行业壁垒严重，封闭了不同能源系统之间的信息互通，使得信息孤岛问题进一步突出，制约了能源大数据的发展。

### 2. 支持能源大数据的基础设施存在短板

大数据需要从底层芯片到基础软件再到应用分析软件等信息产业全产业链的支撑，在这一系列基础设施建设上，我国能源信息基础设施仍存在短板。

一方面，无论是在传感技术、新型计算平台、分布式计算架构方面，还是大数据处理、分析和呈现方面，我国能源信息技术与国外均存在较大差距，难以适应电力行业乃至能源行业的多源、多态及异构数据的广域采集、高效存储和快速处理。以表1的智能电网用电数据为例，其来源包括了企业统计、量测表计、供电公司以及第三方能源公司，从数据量级、覆盖范围、数据颗粒度以及可获得性等方面比较均有较大差异。

另一方面，能源信息数据开发应用意识不强，一体化系统中采集了大量的能源数据，但将现有数据转化为资源优势，用于提高能源系统的优化运行水平，仍有待加强。如表1的用电数据中供电公司数据获取量大、集中程度高，但仅用于供电公司业务范围，数据价值潜力仍亟待充分挖掘。

### 3. 能源信息安全问题突出

能源系统的开放、兼容和互联必然伴随着风险，目前整个能源系统的安全形势仍然严峻，特别是随着互联网技术在能源系统的应用，开放互联的网络和信息与物理组件的交互使得能源系统面临着巨大的安全挑战[22,23]。能源大数据是建立在能源数据公开、共享的基础之上，因此，能源大数据的建设与应用需加强能源信息安全防御能力。另一方面，能源大数据技术将用户大量用能信息进行集聚，很可能造成隐私泄露。在能源大数据建设中，协调共享与安全是必须首先解决的重大课题。

## 五、我国能源大数据产业发展建议

1. 推动能源系统与大数据技术融合，使大数据成为能源系统智慧化升级的支撑

由硬件资源、基础软件、网络通信、数据集成、计算支撑、应用支撑、安全管控等环节推动能源与大数据的融合。采用统一能源信息采集、集成、存储标准，解决多源数据异构所带来的信息孤岛问题。加强广域多时间尺度的能源数据及相关领域数据的采集、传输和存储，以及从这些大量多源异构数据中快速提炼出深层知识并发挥其应用价值，同时加强可视化、人机交互技术的应用，实现能源大数据的易用性。此外，还需加强能源信息安全建设，落实信息安全技术防护和管理措施，切实保障能源信息安全。

2. 完善基础设施建设，补齐多能源物理互联和信息互联的基础设施短板

加强多能源网络供给侧结构性改革：补齐多能源物理互联和信息互联的基础设施短板，推进电、气、热等能源网络及其信息架构基础设施的协调建设。完善能源大数据基础信息建设，推动透明电网/能源网发展，重点攻关基于能源大数据的智能决策，推进能源生产、传输、消费全过程信息透明及智慧化，实现能源系统高比例可再生能源的消纳及终端能效提升。

3. 深化能源体制改革，消除不同能源行业之间的信息壁垒，实现信息共享

进一步放开能源用户侧、配售侧、需求侧市场：配电、售电由增量市场扩大到存量市场；油气配售市场允许民营和外资资本进入；通过用户侧的市场机制，催生出一批能源金融、第三方综合能源服务等新兴业态，倒逼能源供给侧结构性改革，推进能源生产方式和能源利用方式的智能化变革，提升全社会综合能源效率。在市场化改革下，消除不同能源行业之间的壁垒，真正推动能源大数据建设。

4. 完善能源大数据产业顶层设计，培育智慧能源产业新业态

通过政策导向、资金扶持、平台建设、市场设计，完善市场法律法规，形成长效机制：加快制定并完善能源产业市场法律法制，试点能源产业市场负面清单制度。构建能源生产、存储、传输、交易、消费、增值服务等全产业链，完善能源产业基础架

构, 形成国家级、区域级、用户级等不同应用范围的能源大数据平台, 利用其公开共享的数据资源, 培育发展智慧能源新业态, 带动相关产业升级, 促进智慧能源产业形成新的经济增长点。

## 六、结语

能源大数据的建立对贯彻我国“互联网+”智慧能源发展战略, 加快多能系统深度融合, 促进能源市场化改革具有重大意义。本文通过调研我国能源大数据的发展现状, 分析认为存在以下三个主要问题:

(1) 由于各能源系统间存在的行业壁垒导致信息交流渠道缺失, 无法实现跨能源系统的信息互联互通;

(2) 能源系统具有高度的特殊性与复杂性, 目前大数据的基础设施与基本技术仍难以适应其应用需求;

(3) 能源系统的安全运行关乎国计民生, 实现能源大数据的数据与信息安全仍是亟待解决的难题。

为此, 本文针对上述三个问题提出了促进我国能源大数据产业发展的四条建议:

(1) 在信息与物理的层面上, 应全面考虑能源系统的运行特点与数据特征, 实现大数据技术与能源系统的融合;

(2) 在基础设施层面上, 以建设透明电网、透明能源网为目标, 推动能源信息架构基础设施的建设与完善;

(3) 在能源体制层面上, 切实推动能源市场化改革, 以打破能源行业壁垒为契机, 推动多种能源系统信息的互联互通;

(4) 在产业顶层设计层面上, 以政策法规为引导, 培育新兴能源产业生态, 促进能源大数据的发展与成熟。

### 参考文献

[1] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.  
Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.

[2] Jiang H, Wang K, Wang Y, et al. Energy big data: A survey [J]. IEEE Access, 2016 (4): 3844-3861.

[3] 刘敦楠, 唐天琦, 赵佳伟, 等. 能源大数据信息服务定价及其在电力市场中的应用[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 52-59.  
Liu D N, Tang T Q, Zhao J W, et al. Big energy data information service pricing and its application in electricity market [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 52-59.

[4] 黄小庆, 陈颀, 田世明, 等. 电动汽车充电站规划、运行中的大数据集成应用[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 762-767.  
Huang X Q, Chen J, Tian S M, et al. Big data integration for optimal planning and operation of electric vehicle charging stations [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 762-767.

[5] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.  
Zhang Y J, Chen Z X, Cai Z X, et al. New generation of cyber-energy system: Energy Internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.

[6] 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 S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.

[7] 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 Q X, Liu D N, Lin J, et al. Business models and market mechanisms of energy Internet (I) [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056.

[8] Naimi A I, Westreich D J. Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think [J]. Mathematics & Computer Education, 2013, 47(17): 181-183.

[9] McAfee A, Brynjolfsson E, Davenport T H, et al. Big data: The management revolution [J]. Harvard Business Review, 2012, 90(10): 60-68.

[10] Zhou K, Fu C, Yang S. Big data driven smart energy management: From big data to big insights [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016 (56): 215-225.

[11] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.  
Zhang D X, Miao X, Liu L P, et al. Research on development strategy for smart grid big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.

[12] Billinton R, Gao Y. Multistate wind energy conversion system models for adequacy assessment of generating systems incorporating wind energy [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(1): 163-170.

[13] Kaldellis J. Optimum autonomous wind-power system sizing for remote consumers, using long-term wind speed data [J]. Applied Energy, 2002, 71(3): 215-233.

[14] 鲁宗相, 徐曼, 乔颖, 等. 风电功率预测的新型互联网运营模式设计[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 125-131.  
Lu Z X, Xu M, Qiao Y, et al. New Internet based operation pattern design of wind power forecasting system [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 125-131.

[15] 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.  
Liu S C, Zhang D X, Zhu Z Y, et al. A view on big data in energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 14-21.

- [16] B.A.U.M. Consult Gmbh. Smart Energy made in Germany [R]. Munich: B.A.U.M. Consult Gmbh, 2012, 17–33.
- [17] 王喜文, 王叶子. 德国信息化能源(E-Energy) 促进计划 [J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(4): 75–76.  
Wang X W, Wang Y Z. Introduction of German smart grid “E-Energy” project promotion [J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(4): 75–76.
- [18] Liu Y, Zhan L, Zhang Y, et al. Wide-area measurement system development at the distribution level: An FNET/GridEye example [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(2): 721–731.
- [19] Zhou D, Guo J, Zhang Y, et al. Distributed data analytics platform for wide-area synchrophasor measurement systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2397–2405.
- [20] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503–511.
- Peng X S, Deng D Y, Cheng S J, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503–511.
- [21] Magavern S. Greening the buffalo niagara medical campus [R]. New York: The Open Buffalo Innovation Lab, 2015.
- [22] Becker T, Curry E, Jentzsch A, et al. New horizons for a data-driven economy: Roadmaps and action plans for technology, businesses, policy, and society [M]. London: Springer International Publishing, 2016.
- [23] 李存斌, 李小鹏, 田世明, 等. 能源互联网电力信息深度融合风险传递: 挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 17–25.  
Li C B, Li X P, Tian S M, et al. Challenges and prospects of risk transmission in deep fusion of electric power and information for energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 17–25.