

# 能源互联网大数据分析技术综述

曹军威<sup>1</sup>, 袁仲达<sup>1</sup>, 明阳阳<sup>1</sup>, 张华赢<sup>2</sup>

(1. 清华大学信息技术研究院, 北京 100084; 2. 深圳供电局有限公司, 深圳 518020)

**摘要:** 大数据技术具有数据容量大、数据类型繁多、商业价值高、处理速度快的特点。能源互联网是信息通信与能源电力结合发展的高级阶段, 以逐步实现信息通信基础设施与能源电力基础设施的一体化作为特征。在能源互联网中不仅信息的种类和数量巨大, 而且对信息的实时性要求也越来越高, 因此大数据分析技术在能源互联网中具有广泛的应用前景。在大数据处理平台和大数据分析算法研究现状两方面综述了大数据分析技术, 列举了大数据分析在能源互联网的典型应用场景和研究课题。

**关键词:** 能源互联网; 大数据分析; 数据挖掘; 深度学习; 负荷云库; 态势感知

## Survey of Big Data Analysis Technology for Energy Internet

CAO Junwei<sup>1</sup>, YUAN Zhongda<sup>1</sup>, MING Yangyang<sup>1</sup>, ZHANG Huaying<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shenzhen Power Supply Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518020, China)

**Abstract:** The features of big data technology are big volume, numerous data types, high business value and fast handling speed. Energy Internet is the advanced stage of the combined development of information communication and energy electric technologies, and its main feature is the gradual integration of the two technologies infrastructures. For energy internet, there are not only numerous information quantities and information categories, but also higher real-time requirements of information. So it is obvious that big data analysis technology has a broad application prospect in Energy Internet. This article makes an overview on big data analysis technology in the big data processing platform and the current research situation of related algorithms, and lists the typical application scenes and research projects in Energy Internet.

**Key words:** Energy Internet; big data analysis; data mining; deep learning; power load cloud; situation awareness

## 0 引言

电能具有清洁性、安全性、高转换效率以及通过电网可以远距离传输等优点, 电网已经成为全球重要的能源系统<sup>[1]</sup>。目前电能主要依靠化石能源生产, 通过大电网传输, 满足生产和生活的需要。

迫于化石能源枯竭和环境保护的压力, 可再生能源的开发正在展开。可再生能源包括风能、

太阳能、潮汐能等各种自然能源, 其分布广泛, 具有可再生性, 并且不会对自然环境造成破坏, 但大多数具有断续性和不稳定性, 将可再生能源产生的电能大规模地接入传统主干电网时, 这种不稳定性会对电网带来冲击<sup>[2-3]</sup>。

在此背景下, 基于信息互联网概念和理论提出了能源互联网<sup>[4]</sup>。能源互联网以大电网为“主干网”, 以微网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”, 通过开放对等的信息-能源一体化架构实现能源(电能)的双向按需传输和动态平衡使用, 是一个信息与能源相融合的“广域网”。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472200, 61233016); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB228206)。

Foundation item: Supported by The National Natural Science Foundation of China (61472200, 61233016); The National Basic Research Program (973 Program) (2013CB228206).

能源互联网借鉴互联网理念自底向上构建能源基础设施，通过微网等类似能量自治单元的开放对等互联和信息能量融合分享，增加分布式可再生能源的灵活接入和就地消纳<sup>[4][2]</sup>。能源互联网相对于大电网起到相辅相成的作用，符合电网发展分布与集中相结合的大趋势<sup>[5]</sup>。

信息通信与能源电力结合发展分为三个阶段。第一个阶段为数字化、信息化阶段，信息通信为能源电力业务提供服务，优化能源电力系统的管理，提高能源电力行业的效率。第二个阶段为智能化阶段，信息通信成为能源电力基础设施不可或缺的组成部分，逐步实现信息流与能量流的紧密结合，这一阶段以智能电网的建设为特征<sup>[6]</sup>。第三个阶段为信息与能源融合阶段<sup>0</sup>，表现为逐步实现信息通信基础设施与能源电力基础设施的一体化，即能源互联网阶段<sup>[8-9]</sup>。

能源互联网开放、对等、互联、分享的基本特征决定了其对能量和信息的实时交换要求更高<sup>[10]</sup>，尤其是分散式能量交换的运行、管理和调度，必须得到实时数据采集、分析和大规模处理的支持，离不开大数据分析技术的应用。

本文介绍能源互联网与电力大数据之间的相互关系，大数据分析相关的典型技术，以及能源互联网大数据分析的相关应用。

## 1 能源互联网与大数据

能源互联网的发展与大数据密不可分。能源互联网通过信息通信对整个网络的设备和设施进行及时监控，同时对历史和实时数据进行充分挖掘以提升能源互联网的运行管理和性能优化。能源互联网将面临海量数据采集、处理和存储的技术要求，必将步入大数据时代。

### 1.1 大数据技术的特点

大数据技术以“4V”为其主要特点，即数据容量大 (Volume)、数据类型繁多 (Variety)、商业价值高 (Value)、处理速度快 (Velocity)。此外，大数

据还具有价值密度低的特点，即其价值密度远远低于传统关系型数据库中的已有数据<sup>[11]</sup>。

### 1.2 大数据分析过程

大数据的分析处理过程如图 1 所示，主要分为大数据采集、大数据导入/预处理、大数据统计/分析、大数据挖掘等主要步骤。

#### 1.2.1 大数据采集

大数据的采集离不开因特网和物联网技术，主要技术包括标识、传感和数据集中等。

标识技术包括 RFID、条形码、二维码、生物特征识别 (虹膜、指纹、语音) 等，其中 RFID (射频识别) 能够在无人参与的情况下进行一定距离内的设备身份识别，可以广泛应用到电力系统中。

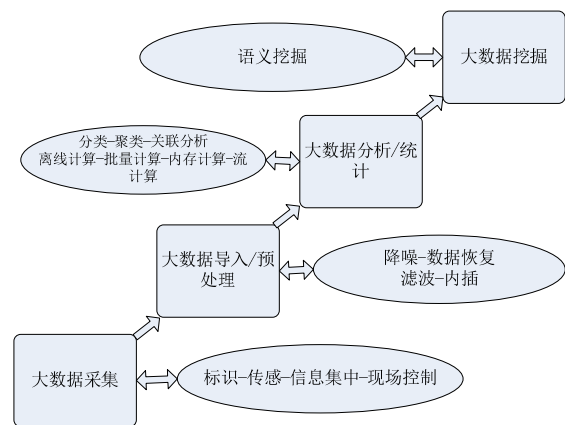


图 1 大数据分析过程

Fig. 1 Big data analysis steps

传感功能一般使用嵌入式传感器，可以形成传感器网络，对影响或反映电网运行状态的各种指标和数据进行采集。采集类型包括状态量、电气量或量测量等，采集结果可以用于 SCADA、WAMS 或 CAC/CAG 等监测系统中。

为了使处理尽量在本地进行，同时减少通信带宽消耗，本地集中处理是一种有效的技术。集中处理可以减少信息冗余，提高网络的用户容纳能力和带宽利用效率。

#### 1.2.2 大数据导入/预处理

为了实现大数据分析, 需要将采集到的数据导入到内存或数据库中, 其中涉及到格式和标准的统一、非结构化数据的存储和建模等。

数据导入还需要进行预处理。受物理环境、天气的影响以及监控设备的老化或故障等原因, 采集数据中不可避免地存在噪声或错误的信息。同时, 恶劣的通信环境也将导致数据的错漏和丢失。因此需要对相关采集数据进行降噪并恢复丢失数据, 这一过程又称为数据清洗。

降噪主要通过平滑滤波。对平稳系统, 高频部分很可能对应着噪声分量, 对高频部分进行处理可以有效地减少噪声。同时, 平滑滤波也可以作为恢复丢失数据的一种手段。另外, 通过内插技术, 可以有效地恢复丢失的数据。

滤波的技术有很多种, 包括维纳滤波, 卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波和粒子或粒子群滤波等, 分别针对平稳系统、线性或类似线性系统和非平稳非线性系统<sup>[12]</sup>。系统处理能力越大, 滤波估计效果越好, 但计算越复杂。

对于内插, 可以分为线性内插、抛物线内插、双线性内插和其他函数内插等, 均基于数据间的相关性假设实现。

### 1.2.3 大数据统计/分析

大数据统计和分析的具体技术包括分类、聚类、关联等, 按照处理的时间特性可以分为离线计算、批量计算、内存计算和流计算等。

在数据分析中, 经常需要对数据进行分类。大数据分类所采用的算法包括临近算法<sup>[14]-0</sup>、SVM 支持向量机<sup>0-[17]</sup>、Boost 树分类<sup>[18]</sup>、贝叶斯分类<sup>[19]-0</sup>、神经网络<sup>0-0</sup>、随机森林分类等<sup>[23]-0</sup>, 分类算法中可以融合模糊理论以提高分类性能。

聚类可以理解为无监督的分类, 主要使用 k-Means 等算法。

关联分析是数据分析的主要方法之一, 主要基于支持度和置信度挖掘对象之间的关联关系, 基本

算法包括 Apriori<sup>0</sup> 和 FP-Growth<sup>0</sup> 等算法。

为了适应大数据的特点, Mahout 使用并行计算实现数据挖掘算法<sup>0</sup>, 大大减少了计算时延。

### 1.2.4 大数据挖掘

大数据分析结果被用于数据挖掘。因为前面的分析仅以数据为中心进行处理, 得到的结果不易被人所理解且不一定匹配研究目的, 可能会得到无用甚至表面上相反的结果。因此需要人的参与, 以数据挖掘目的为指导, 对结果进行过滤和提纯, 将结果转化为人所能理解的语义形式, 最终实现数据挖掘的目的。

### 1.3 电力系统大数据

电力系统的大数据产生于发电、输电、变电、配电、用电和调度等各个环节。电力大数据研究的核心是解决电力数据源分布广泛, 采集频率高, 数据分析量大且处理时延和传输质量(延迟及丢包等)要求高的问题。

在电力大数据的科学研究和工程应用方面, 美国和欧洲一直走在国际前列, 前期主要以智能电表的大规模安装和部署为特征。相关项目包括 UCLA 洛杉矶电力地图、美国 C3 能源分析引擎平台的电力用户分析工具、法国电力公司基于大数据的用电采集应用系统、德国 E.ON 大数据智能用电研发中心、丹麦维斯塔斯风力发电等。通过与大数据技术的结合, 电力系统的性能得到显著提升<sup>[33]</sup>。

电力大数据在我国起步较晚但发展迅速。自 2013 年开始, 我国电力企业着眼于用电与能效、电力信息与通信、政府决策支持等电力需求侧领域, 开展了大数据应用关键技术研究。国家科技部 863 计划 2014 年就电力大数据开展了研究立项。国家电网公司 2015 年初发布了《国家电网公司大数据应用指导意见》, 并启动了大数据研究与应用工作, 到目前为止, 提出了大数据应用的 17 个领域, 统一组织开发并在 10 家单位部署大数据平台, 安排 10 家单位进行试点。南方电网公司广东、云南、贵州等省

公司都开展了电力大数据相关研究。深圳供电局基于大数据分析进行电能质量综合评估,具有一定的特色<sup>[34]</sup>。

#### 1.4 能源互联网大数据

能源互联网可以实现分布式可再生能源的大规模接入,具有微网集群间或微网和主干网间的电力双向自由共享,用户按需响应,以及利用大规模储能设施实现削峰填谷等功能。系统具有很大的计算复杂度和较严格的处理传输时延,以及海量的数据存储需求。同时,能源互联网由于其开放、对等、互联、分享等特征决定了能源互联网大数据分析有其自身的特点和要求。

首先,能源互联网的能源和信息交换是以开放平台和架构为基础的,任何节点(无论是电源、电网还是用户)都可以随时加入和离开,这对于大数据管理的标准化和安全性方面的要求都会比较高。

其次,能源互联网节点间是对等互联进行能源和信息交换的,相当于一方面要完成传统能量管理系统的功能,同时还要保证系统的分散协同。例如一个区域能源互联网就要具有独立运营实体和能量管理,保证其运行的稳定性、电能质量、以及与用户的互动等,都对数据的采集、通信和处理提出了更高的要求。

最后,能源互联网要支持灵活的能源和信息分享,尤其是新能源的接入、分散式能量管理和与用户负荷互动的加强,对数据处理的实时性提出了更高的要求。能源互联网是未来实现电力市场和实时电价的基础,因此大数据处理的实时性要支持从底层的能量交换控制、上层的能量路由与管理,乃至新的商业模式和市场机制等等,大数据采集、分析和处理的速度要求更高。

## 2 能源互联网大数据分析技术

能源互联网大数据分析技术主要包括大数据处理平台与大数据分析算法两个方面。

### 2.1 大数据处理平台

#### 2.1.1 云计算平台

大数据系统需要非常大的数据处理、传输和存储能力,目前云计算平台是最符合要求的计算基础设施。云平台实现了计算资源和物理资源的虚拟化,通过资源池对处理能力进行快速动态分配和调用,具有一定的可伸缩性,能够最大限度地利用已有计算能力,降低运行成本,节省用户开支。同时,云平台还具有一定的安全性,可以保证用户数据不被窃取。大数据与云平台的结合,将成为能源互联网的基本性能支撑。

#### 2.1.2 分布/并行计算

对于大数据挖掘,其数据在几十TB以上,计算能力要求巨大,单台计算机难以胜任,促使人们研究分布式并行计算方法,其中最广泛应用的分布式计算框架为Hadoop的Map/Reduce。通过并行方法,目前许多单机难以完成的任务能够在可接受的时间内完成。

#### 2.1.3 流数据处理

在因特网中,许多任务会不断产生新数据,并且需要进行连续不断的处理,传统的数据处理框架无法胜任。由此,流计算的概念被提了出来。

流计算一般具有以下特点:数据实时到达但无法保证顺序,数据只需进行一次性处理,随到随处理,数据使用后无需或只需要部分存储。著名的流计算框架包括Yahoo! S4<sup>0</sup>, Facebook Data Free-way and Puma<sup>[36]</sup>, Twitter Storm<sup>[37]</sup>等。

#### 2.1.4 内存计算

为了提高数据的处理速度,有人提出将数据全部驻留在内存中运行,即CPU直接从内存读取数据而非硬盘。因为内存的数据读写速度远大于硬盘,有利于与CPU交互,计算性能会有较大提高。通过内存计算和流式处理的结合,可以大大提高实时系统的性能。

### 2.1.5 数据可视化技术

可视化是利用计算机图形学和图像处理技术, 将数据转换成图形或图像在屏幕上显示出来并进行交互处理的理论、方法和技术。其涉及到计算机图形学、图像处理、计算机视觉、计算机辅助设计等多个领域, 成为研究数据表示、数据处理、决策分析等一系列问题的综合技术<sup>[38]</sup>。

例如, 对于以电网为主的区域能源互联网, 通过基于 GIS 的三维显示图, 可以直观地观察电流、电压、有功、无功的大小、分布和流动情况, 从而有助于观察者进行系统稳态、暂态判断和整体运行态势感知。

## 2.2 大数据分析算法

### 2.2.1 分布式数据挖掘技术

分布式数据挖掘与并行化密切相关。大数据挖掘算法大多采用并行化思想。

#### 1) 关联分析与 FP-growth 算法

关联分析是挖掘数据库中两个或多个变量之间存在的关系, 该问题由 Agrawal 等于 1993 年首先提出。经典的关联算法为 Apriori 算法, 该算法需要对频繁项集进行迭代生成和扫描。

针对 Apriori 算法的固有缺陷, 有学者提出了不产生候选挖掘频繁项集的方法: FP-growth 算法<sup>[39]</sup>。通过建立 FP-tree, 该算法解决了 Apriori 算法中的长频繁项搜索子项数量巨大的问题。实验表明, FP-growth 对不同长度的规则都有很好的适应性, 同时在效率上较之 Apriori 算法有巨大的提高。

FP-growth 的并行化, 主要研究基于 Map/Reduce 的 FP-growth 算法<sup>[42]</sup>。理论上, 通过对 FP-Tree 不断的递归挖掘就可以得到所有的完备频繁模式 (Frequent Patterns)。但是在目前海量数据的现状下, FP-Tree 已经大到无法驻留在计算机的内存中, 因此并行化是必然的选择。

#### 2) 分布式聚类算法

为了发现设备故障和状态异常, 可以对状态数

据进行聚类, 将正常状态和故障状态区分出来。通过聚类, 可以将数据划分为不同的簇, 其簇间差异较大, 而簇内差异较小。

聚类以样本间的相似度为基础, 可以通过不同的距离计算方式达到不同的分类效果, 如曼哈顿距离、欧氏距离、汉明距离或夹角余弦等。

在能源互联网中数据采集量巨大, 聚类需要分布式运行, 整个聚类任务被当作一个 Hadoop 任务来并行运行, 通过将分布式计算与迭代计算相结合, 大大减少了计算时间。

#### 3) 分布式分类算法

在形成具体的分类标准或准则后, 可以采用分类算法进行分类。分类包括训练和分类两个过程, 并可以不断循环实现增量学习。与聚类相比, 分类具有更明确的目标。

面对能源互联网海量数据, 分类算法同样需要并行化实现, 如 Mahout 相关分类算法。当训练样本的数量相对较小时, 与 Mahout 分类算法相比, 传统数据挖掘方法的性能会较好。但随着样本数量增加, 传统不可扩展的分类算法所需要的处理时间快速增加, 此时 Mahout 的可伸缩和并行算法的优势就变得明显, 如图 2 所示。

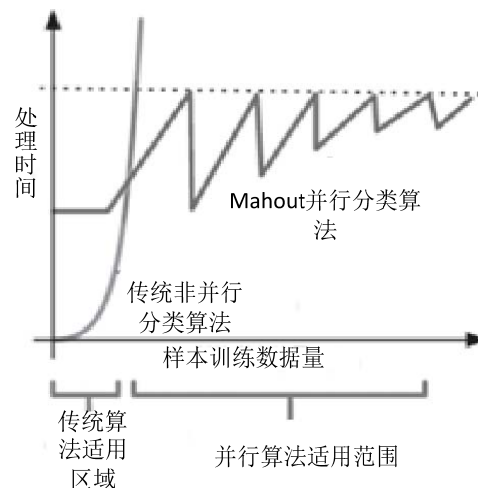


图 2 使用 Mahout 分类和传统分类算法的处理时间比较  
Fig. 2 Comparison of treatment time between traditional classification algorithm and Mahout classification

### 2.2.2 深度学习的方法



深度学习本质上是一个层数更多的人工神经网络,是对普通人工神经网络的推广和提升。它通过模拟人脑的结构来实现智能判断和决策。文献[0]证实了人类神经系统和大脑的工作其实是不断将低级抽象传导为高级抽象的过程。高层特征是低层特征的组合,越到高层特征就越抽象。同时,很多训练任务的特征具有天然的层次结构。想要从原始输入直接跨越到高层特征无疑是困难的,需要通过有效的特征提取,一步步地将基本元素抽象成更高级的特征。以图像识别为例,图像的原始输入是像素,相邻像素组成线条,多个线条组成纹理,进一步形成图案,图案构成了物体的局部,直至整个物体的样子。

深度神经网络(DNN)模型复杂,训练数据多,计算量大。一方面,DNN需要模拟人脑的计算能力,而人脑包含100多亿个神经细胞,这要求DNN中神经元多,神经元间的连接数量也相当惊人。这其中有大量需要计算的参数。在语音识别和图像识别应用中,神经元达数百万个,参数数千万,模型复杂导致计算量大。另一方面,为了避免过拟合,DNN需要大量数据才能训练出高准确率模型。以语音识别为例,目前业界通常使用样本量达数十亿,进行一次训练通常需要几天时间。因此深度学习需要大数据的支持。

为了减少训练时间,当前深度学习的加速主要有GPU加速、数据并行和计算并行等三种技术<sup>[45]</sup>。

深度学习的最新应用主要集中在语音识别(尤其是自然复杂环境下的语音识别)、手写体字符识别、人脸识别、图像识别和检索、自然语言处理和检索等多个领域<sup>[46]</sup>,但应用于电网中还鲜有提出。而电网中已有运用神经网络进行机器智能学习(如故障定位)的先例,作为更能模拟人类智能的深度学习,随着技术的进一步完善,在电网中将会有广泛的应用。

### 2.2.3 超大规模神经网络

随着研究人员对大脑智能的研究和模拟的不断深入,以及计算机性能的提高,人们开始建立和研究超大规模神经网络。在超大规模神经网络中,神经网络的节点数和相关参数可以达到百万甚至上亿的数量级。基于如此高的性能参数,人造神经网络可以无监督地实现对动态非线性复杂系统的有效模拟,特别是以数理形式模拟生物脑的运作,指导机械学习人类的思考模式,使其具有分辨事物(语言、物品等)和智能决策的能力。超大规模神经网络训练时需要的样本数据巨大,属于大数据中的一种新兴技术。

神经网络概念虽然早已提出并进行了几十年的研究,但其性能并不理想,原因在于巨大的计算量使得人工神经网络只能包含少许隐层,从而限制了其性能。而借助先进的计算机技术,大规模神经网络突破了这一限制。有研究表明,在可获得足够训练数据的条件下,神经网络规模越大,结果的精确性越高。基于深度学习和超大规模神经网络以及大数据的结合,机器学习的性能将得到极大的提升。

目前对超大规模神经网络的研究尚处于起步阶段,偏重于基本理论研究<sup>[49]</sup>。预计应用方向包括智能决策、语音识别和图像辨识等。由于现代电力网络的高复杂性,特别是能源互联网,其运行决策需要智能化、实时化的操作,所需操作数据量巨大,单靠人工无法完成,而普通的机器学习算法也难以胜任。在此情况下,利用计算机实现对人脑的模拟是一种可行途径,这确立了超大规模神经网络技术在电力分析系统中的地位。超大规模神经网络的研究成果预计会有效应用于能源互联网中,对在线实时电网运行与调度的提升和改进产生重大、积极的影响。

能源互联网需要进行海量数据处理,必然要应用大数据分析处理技术,而且只有大数据分析处理的并行化结构才能保证相关结果的实时性,实现对系统及时、有效控制的目的。

## 3 能源互联网大数据分析应用

文献[52]总结了智能电网大数据应用的重要领域, 对于能源互联网也应该加以梳理。

能源互联网侧重分布式能源和可再生能源的接入和互联, 大数据分析在能源互联网中的应用包括负荷建模、负荷预测、状态评估、电能质量监测与控制、需求侧管理与响应、分布式能源接入、多能调度规划、自动故障定位、系统安全与态势感知等。

### 3.1 负荷建模

作为电力大数据和云平台的结合, 负荷云库概念被提了出来。负荷云库主要利用云平台存储的能源互联网负荷相关数据进行大数据分析, 以辅助实现能源互联网相关应用。

例如, 对于负荷建模, 所考虑的数据越全面, 采样频率越高, 数据质量越好, 负荷参数估计的精确度和鲁棒性也会越好, 其大数据应用性能将会得到明显提升。而根据负荷云库的设计, 可以提供经过预处理的, 与能源互联网范围内负荷有关, 覆盖各个方面和技术细节的海量数据, 从而将显著提高负荷建模的性能, 进而提高电力系统的整体性能。

负荷建模是能源互联网大数据分析的主要应用, 其结果可以用于负荷预测、电力调度、故障定位和实时仿真。负荷建模决定了能源互联网大数据分析的整体性能, 具有非常重要的地位。

传统电网中, 负荷辨识是一个难以解决的问题。由于缺乏整体全面的监测数据, 导致只能以保守度换取大的可靠度, 不仅造成设备的冗余, 系统的运行效率也受影响。

到了能源互联网阶段, 采用先进的信息通信技术, 系统可以采集到覆盖整个系统的全面海量数据, 在大数据分析技术的支撑下, 电力负荷的精确辨识将成为可能。

负荷建模的具体技术包括综合统计法、总体测辨法和故障仿真法, 国内对以上三类方法均有研究。华北电力大学主要研究总体测辨法<sup>0</sup>。河海大学则提出基于日负荷曲线, 将统计综合法与总体测辨法相结合的电力负荷综合建模思路<sup>0</sup>。中国电科院采

用统计综合法进行了基于负荷调研的分类与建模工作<sup>0</sup>。用统计综合法得到的负荷模型物理概念清晰, 易于理解, 但其核心建立在“统计资料齐全, 负荷特性精确”的基础之上, 其实现难度大且无法考虑负荷的时变特性。总体测辨法避免了大量的统计工作, 有可能得到随时间变化的在线实时负荷特性, 其最大的困难在于装置的有效安装和参数的时变性。故障仿真法的优点是参数确定过程与程序选择参数的计算过程一致, 而且在某些故障下能够获得重现, 但试凑的方法限制了其性能。文献[60]指出, 总体测辨法适合于微观定量, 统计综合法适合于中观定性, 故障仿真法适合于宏观校验。

### 3.2 负荷预测

能源互联网的正常运行和调度离不开负荷预测。为了实现负荷预测, 除了利用大量在线数据, 还需要海量的历史同期数据和天气环境数据, 大数据技术支持必不可少。

负荷预测可以用于各种情况。针对云平台中主机负荷短时波动的特点, 文献<sup>0</sup>利用贝叶斯模型进行长间隔的均值负荷预测, 取得了很好的效果。在网格环境中, 文献[62]提出了基于数据聚集的自适应长期负荷预测模型, 性能超过了以前使用的均方误差算法。作为自动发电控制的一部分, 文献[63]等提出了基于神经网络的超短期负荷预测, 实现了实时发电控制。

对于传统的负荷预测, 由于数据的不充分和分析能力受限, 难以得到十分有用的结果, 能源互联网的出现改变了这一局面。通过大数据采集和高性能分析技术, 精确负荷预测将成为可能。未来的负荷预测将向着适应各种时间维度和空间复杂度, 预测结果更加精确、更加及时有效的方向发展。

### 3.3 状态评估

状态评估主要对状态进行分类以确定系统所处的状态。如基于电压的稳定性评估, 决定系统是否处于失稳状态。根据电力系统所处的状态, 可以制定相应的操作决策。由于对每个监测点都需要进行

相应的时间序列分析,同时需要考虑节点间的位置关系,节点多、采集频率高,计算任务重,需要大数据分析技术的支持。

关于电力系统的状态评估多与电能质量、故障恢复和安全性有关。文献[64]将状态评估作为重要组成部分,对智能分布电网的自愈控制技术系统进行了研究。文献[65]使用大数据分析技术,基于贝叶斯分类,进行了电能暂态质量评估。文献[66]根据组件重要性和操作状态,对电力系统安全进行了风险评估。

将状态评估应用于大的电力网络,需要进一步提升其计算效率和分类准确性。随着能源互联网性能要求的提高,需要扩大状态评估的范围,考虑节点间的关系,达到对网络整体性能的了解,实现全局状态评估。

### 3.4 电能质量监测与控制

电能质量包括输变电网络的各种电气特征,如有功、无功、压降、谐波和频率波动等。电能质量决定了电网的性能和用户的用能体验,是用户和电网运营商的主要交互信息之一,将最终决定双方的收益,因此不可忽视。随着分布式电源越来越多地接入配电网,用户对电能质量的要求越来越高。对于能源互联网,为了解决传统电网的计算精度不足等问题,一个基本的前提就是提高采集点的数量和采集数据的频率,尤其对于电压暂降等暂态问题的分析,其规模将达到大数据实现的程度。因此,该功能同样需要大数据分析。

电能质量是电力系统的一个重要指标。文献[67]基于分散度方法,提出了一种区域性电网电能质量的广泛估计模型。文献[68]基于时频分析理论,对功率质量监控进行了算法研究,能够精确定位暂态信号每个频率成分出现的时间。文献[69]对风力电厂的电能质量进行了研究,同时讨论了谐波造成的电压、电流失真。

### 3.5 需求侧管理与响应

随着的能源互联网的发展,用户既是消费者,

又是生产者。通过电力网络通信技术,用户能够与发电方进行交互,协商决定电能的使用。同时,用户间也可以进行能源共享,供需关系变得复杂化。因此,需求侧管理在能源互联网中变得更加重要。需求侧管理需要利用海量的实时和历史数据实现负荷预测相关功能。网络越大,数据量越大,大数据分析工具将是重要手段。

需求侧管理主要是为了节省能源或保证供电的持续性和平稳性。文献[70]根据电器使用模式,使用自适应能源节省策略,实现了一个以用户为中心的灵活能量管理系统。文献[71]根据不同的因素加权,设计了智能的需求侧管理系统。文献[72]使用微存储和需求侧管理相关技术,建立了光伏发电网络。

需求侧管理与响应将向着更加智能化、自动化和个性化的方向发展。除了需求侧管理之外,还存在能源互联网区域间的协调管理问题。

### 3.6 分布式能源接入

分布式能源的大规模接入是能源互联网的基本特征之一,体现了能源互联网的优越性和先进性,同时也将影响网络的稳定性。随着能源互联网的发展,分布式能源的接入规模将越来越大,所采集的能源设备状态数据和电力相关数据也随之增加,需要使用大数据分析技术对其进行分析预测和有效调度。

对于能源互联网,分布式能源接入主要通过微网实现。文献[73]针对拥有分布式可再生能源的微网,研究了以最小开销为目标的能源调度制定模型。文献[74]针对分布式能源,使用智能微网将其与主干网相隔离,并最大化分布式能源的使用。文献[75]讨论了在中国发展智能电网所遇到的新挑战,其中包括大规模可再生能源的接入。

分布式能源接入将向着更大规模接入和更有效本地消纳、更高传输效率与共享、多能互补等方向发展。

### 3.7 多能调度规划



分布式能源的接入提高了电力网络的经济性和灵活性, 但各种分布式能源的生产特性互不相同, 且有一定的互补性, 统一调度与规划才能同时提高系统的经济性和稳定性。因此多能调度与规划是必要的。随着调度规划所需的数据量不断扩展, 且性能要求不断提高, 大数据分析将是有效的技术。

目前, 能源互联网的多能调度与互补是研究的热点。文献[76]基于仿真, 对建筑物的多种能源形式进行管理和调度, 性能得到提升。文献[77]通过最低开销优化模型, 在不同的操作模式下, 建立了风-光-氢混合能源生产系统的规划策略, 提高了可靠性和灵活性。针对多时间尺度和使用冷—热—电多种能源类型的微网, 有学者提出了相应调度解决方案, 实现了微网的可控性<sup>[78]</sup>。

### 3.8 自动故障定位

借助于大数据分析技术(如关联方法)与传统故障定位技术相结合, 有可能提高定位精度和速度。配电网中的故障定位主要使用矩阵方法<sup>[79]</sup>, 该方法原理简单, 但对于错误数据比较敏感。此外, 还有人工神经网络<sup>0</sup>、遗传算法<sup>[86]</sup>和蚁群算法<sup>[87]</sup>。

能源互联网中的故障定位将向着**适应复杂拓扑结构、多电源、源—网—荷协同**, 进一步提高定位精度和减少定位时延的方向发展。

### 3.9 系统安全

系统安全贯穿于整个电力网络。例如为了进行农村地区的电网安全评估, 文献[88]提出了相关系统指标和方法。基于估值模型, 文献[89]对电网的安全和效率之间的动态关系进行了研究。根据智能电网中工业控制系统和信息技术系统各自的安全需求, 文献[90]提出了不同的安全管理方法。

系统安全将向着集中控制与分散协作相结合, 整体控制与局部控制并重的方向发展。对于能源互联网, 信息系统与控制系统将紧密耦合, 对系统安全的要求更高, 目前专门针对能源互联网的安全研究还很少。

### 3.10 态势感知

态势感知用于电力系统并不少见, 文献[91]基于知识发现, 提出了网络安全态势感知的整体框架。文献[92]提出若干方法用于增强电力系统控制中心的态势感知功能。采用可视化方法可以增强操作人员对大规模的电力系统的态势感知<sup>[93]</sup>。目前, 基于配电网的态势感知仍处于研究阶段, 其计算量较大, 花费时间较长, 感知效果并不理想。

对于能源互联网态势感知同样是不可或缺的, 它可以对网络运行状况及发展趋势进行实时感知和预判, 从而提前做出决策, 进行有效控制, 实现系统即测、即判、即控的目标。随着监测节点的增加, 态势感知所需分析的数据组合将呈爆炸性的增长, 对大数据分析技术的使用成为必然。

以上列举的应用相互之间有一定的依赖和支撑关系, 它们共同构成了能源互联网大数据分析系统的应用场景。此外, 实际上能源互联网的实现还涉及设备管理、能量交易、运营管理、服务政府等其他方面的应用, 也都需要大数据技术的支撑, 这同智能电网相关方面的需求类似<sup>[52]</sup>。

## 4 结论

本文从技术和应用的角度对能源互联网的大数据分析技术进行了综合阐述, 得出如下结论:

- 1) 大数据分析技术是能源互联网不可或缺的基本技术;
- 2) 大数据分析技术多数仍处于研究或初步应用阶段, 本身还存在一定的缺点, 如数据收集和处理的工作很大, 分析计算比较复杂, 未经实地验证等。因此, 大数据分析技术还有很大的改进和研究空间。
- 3) 大数据分析技术需要充分利用其数据容量大、数据类型繁多、商业价值高、处理速度快的特点和优势, 发展成为一个具有实时性或准实时性的智能分析工具。

## 参考文献

- [1] 曹军威, 孙嘉平. 能源互联网与能源系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

- [2] 黄维芳, 李钦豪, 文安, 等. 风电场低电压穿越对零序电流保护的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 91-94.  
HUANG Weifang, LI Qin hao, WEN An, et al. Influence of low voltage ride-through of wind farm on zero-sequence current protection [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 91-94.
- [3] 金小明, 陈皓勇, 禰培正, 等. 考虑间歇性新能源的电源-负荷协同调度模型与策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 1-7.  
JIN Xiaoming, CHEN Haoyong, XUAN Peizheng, et al. Model and strategy of power-load coordinated dispatch considering intermittent renewable energy [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 1-7.
- [4] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(6): 714-727.  
CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. Energy Internet and Energy Router [J]. Science China: Information Sciences 2014, 44(6): 714-727.
- [5] 韩英铎, 余贻鑫, 黄其励, 等. 能源互联网[C]// 中国战略性新兴产业发展报告 2015, 中国工程院, 2015: 183-203.
- [6] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.  
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grid [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.
- [7] LEE E. Computing foundations and practice for cyber-physical systems: A preliminary report [R]. University of California at Berkeley, 2007.
- [8] CAO Junwei, YANG Mingbo. Energy Internet -- Towards smart grid 2.0 [C]. Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2013.
- [9] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.  
CAO Junwei, YANG Mingbo, ZHANG Dehua, et al. Energy Internet: an infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10.
- [10] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.  
WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Information technology for energy internet: A survey [J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [11] 陈冠诚. 大数据的价值密度[R/OL]. www.tuicool.com, 2014-05.
- [12] 杨文, 侍洪波, 汪小帆. 卡尔曼一致滤波算法综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 481-488.  
YANG Wen, SHI Hongbo, WANG Xiaofan. A survey of consensus based Kalman filtering algorithm [J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 481-488.
- [13] 崔晓杰. 维纳滤波的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [14] 刘应东, 牛惠民. 基于k-最近邻图的小样本KNN分类算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(9): 198-200.  
LIU Yingdong, NIU Huimin. KNN Classification algorithm based on k-Nearest Neighbor Graph for small sample [J]. Computer Engineering, 2011, 37(9): 198-200.
- [15] 潘丽芳, 杨炳儒. 基于簇的K最近邻(KNN)分类算法研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(18): 4260-4262.  
PAN Lifang, YANG Bingru. Study on KNN arithmetic based on cluster [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(18): 4260-4262.
- [16] 范昕炜. 支持向量机算法的研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [17] 江亮. SVM 算法研究及其在交流控制系统中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [18] boost 机器学习. [EB/OL]. (2012-12-17) [2015-09-05]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-571755-643502.html>.
- [19] 卢锦玲, 朱永利, 赵洪山, 等. 提升型贝叶斯分类器在电力系统暂态稳定评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 177-182.  
LU Jinling, ZHU Yongli, ZHAO Hongshan, et al. Power system transient stability assessment based on boosting Bayesian Classifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society. 2009, 24(5): 177-182.
- [20] 曹京津, 秦立军. 改进贝叶斯分类器在电力系统负荷预测中的应用[J]. 科技创新与生产力, 2014, 244: 108-110, 112.  
CAO Jingjin, QIN Lijun. Application of modified Bayes classifier in load forecasting of power system [J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2014, 244: 108-110, 112.
- [21] 张雨浓, 陈俊维, 刘锦荣, 等. 基于权值与结构确定法的单极Sigmoid神经网络分类器[J]. 计算机应用, 2013, 33(3): 766-770, 809.  
ZHANG Yunong, CHEN Junwei, LIU Jinrong, et al. Unipolar sigmoid neural network classifier based on weights and structure determination method [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(3): 766-770, 809.
- [22] 柴绍斌. 基于神经网络的数据分类研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [23] 王爱平, 万国伟, 程志全, 等. 支持在线学习的增量式极端随机森林分类器[J]. 软件学报, 2011, 22(9): 2059-2074.  
WANG Aiping, WAN Guowei, CHEN Zhiquan, et al. Incremental learning extremely random forest classifier for online learning [J]. Journal of Software, 2011, 22(9): 2059-2074.
- [24] 张华伟, 王明文, 甘丽新. 基于随机森林的文本分类模型研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2006, 41(3): 139-143.  
ZHANG Huawei, WANG Mingwen, GAN Lixin. Automatic text classification model based on random forest [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2006, 41(3): 139-143.
- [25] 赵洪英, 蔡乐才, 李先杰. 关联规则挖掘的Apriori算法综述[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2011, 24(1): 66-70.  
ZHAO Hongying, CAI Lecai, LI Xianjie. Overview of association rules apriori mining algorithm [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2011, 24(1): 66-70.
- [26] 张圣. 一种基于云计算的关联规则 Apriori 算法[J]. 通信技术, 2011, 44(6): 141-143.  
ZHANG Sheng. An apriori-based algorithm of association rules based on cloud computing [J]. Communications Technology, 2011, 44(6): 141-143.
- [27] 杨云, 罗艳霞. FP-Growth 算法的改进[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(7): 1506-1509.  
YANG Yun, LUO Yanxia. Improved algorithm based on FP-Growth [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(7): 1506-1509.
- [28] 陈兴蜀, 张帅, 董浩, 等. 基于布尔矩阵和 MapReduce 的 FP-Growth 算法[J]. 广州: 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 135-141.  
CHEN Xingshu, ZHANG Shuai, TONG Hao, et al. FP-Growth algorithm based on boolean matrix and map reduce [J]. Guangzhou: Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(1): 135-141.

- [29] 杨勇, 王伟. 一种基于 MapReduce 的并行 FP-growth 算法[J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2013, 25(5): 651-657, 670.  
YANG Yong, WANG Wei. A parallel FP-growth algorithm based on Mapreduce [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2013, 25(5): 651-657, 670.
- [30] 余辉. 基于 Mahout 的聚类算法的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.
- [31] 赵华著. 分布式环境下的文本聚类研究与实现[J]. 现代图书情报技术, 2015, 254: 82-88.  
ZHAO Huaming. Research and Implementation of textual clustering in distributed environment [J]. New Technology of Library and Information Service, 2015, 254: 82-88.
- [32] Mahout [EB/OL]. (2014-08-06)[2015-09-05]. <http://mahout.apache.org/>.
- [33] 电力需求侧大数据在各国的不同应用及瓶颈 [EB/OL]. (2014-12-08) [2015-09-05]. <http://smartgrids.ofweek.com/2014-12/ART-290017-8420-28910545.html>.
- [34] 张华赢, 朱正国, 姚森敬, 等. 基于大数据分析的暂态电能质量综合评估方法[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 80-86.  
ZHANG Huaying, ZHU Zhenguo, YAO Senjin, et al. Comprehensive evaluation method of transient power quality based on big data analysis [J]. Southern Power System Technology 2015, 9(6): 80-86.
- [35] S4: Distributed stream computing platform [DB/OL]. (2012-12-28) [2015-09-05]. <http://www.open-open.com/doc/view/f2f7469648184341bb16f4f1b303a9a4>.
- [36] Puma [DB/OL]. (2012-12-28) [2015-09-05]. <http://www.facebook.com/Puma>.
- [37] Twitter Storm [DB/OL]. (2012-12-28) [2015-09-05]. <https://github.com/nathanmarz/storm>.
- [38] 可视化[DB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/69230.htm>.
- [39] 刘喜苹. 基于 Fp-growth 算法的关联规则挖掘算法研究和应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [40] 丹追兵. FP-Growth 算法 [R/OL]. (2011-12-30)[2015-09-05] <http://blog.sina.com.cn/danzhuibing.2011>.
- [41] FP-Growth 算法及演示程序 [R/OL]. (2013-9-12)[2015-09-05] <http://www.cnblogs.com/guozk/p/3316790.html>.
- [42] XIA Dawen, ZHOU Yanhui, RONG Zhuobo, et al. IPFP: An improved parallel FP-Growth algorithm for frequent itemsets mining [C]// Proceedings 59th ISI World Statistics Congress, 25-30 August 2013, Hong Kong (Session CPS026), 2013: 4034-4039.
- [43] 吕雪骥, 李龙澍. FP-Growth 算法 MapReduce 化研究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(11): 123-126, 130.  
LÜ Xueju, LI Longshu. Research on improved FP-growth algorithm with MapReduce [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(11): 123-126, 130.
- [44] HUBEL D H, TORSTEN N W. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex [J]. The Journal of physiology, 1962, 160 (1): 106-154.
- [45] LE Q V. Building high-level features using large scale unsupervised learning [C]. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on, IEEE, 2013.
- [46] CHEN Yushi, LIN Zhouhan, ZHAO Xing, et al. Deep learning-based classification of hyperspectral data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(6): 2094-2107.
- [47] MAO Z J, LAWHERN V, MERINO L M, et al. Classification of non-time-locked rapid serial visual presentation events for brain-computer interaction using deep learning [C]// Signal and Information Processing (ChinaSIP), 2014 IEEE China Summit & International Conference on, 2014: 520-524.
- [48] LIANG Dong, WENG Kanjian, WANG Can, et al. A 3D object recognition and pose estimation system using deep learning method [C]// 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 2014: 401-404.
- [49] LI Kai, XU Zhonghua, WANG Baoqin. Research of intelligent decision support system based on neural networks [C]// Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing 2008, WGEC '08, 2008: 124-127.
- [50] SURI M, BICHLER O, QUERLIOZ D, et al. Phase change memory as synapse for ultra-dense neuromorphic systems: Application to complex visual pattern extraction [C]// Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International, 2011: 4.4.1-4.4.4.
- [51] ABERDEEN D, BAXTER J, EDWARDS R. 92  $\epsilon$  /MFlops/s, ultra-large-scale neural-network training on a PIII cluster [C]// Supercomputing, ACM/IEEE 2000 Conference, 2000: total pages: 9.
- [52] 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 Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [53] 贺仁睦, 魏孝铭. 电力负荷特性实测建模的外推和内插[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 151-154.  
HE Renmu, WEI Xiaoming. Power system dynamic load modeling based on the measurements in the field [J]. Chinese Society For Electrical Engineering, 1996, 16 (3): 151-154.
- [54] 杨华春, 贺仁睦, 王鹏, 等. 基于聚合理论的大区电网负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 49-52.  
YANG Huachun, HE Renmu, WANG Peng, et al. Load-modeling in large-scale grid based on the aggregation theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 49-52.
- [55] 马进, 贺仁睦. 综合负荷模型参数的简化辨识策略[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 28-34.  
MA Jin, HE Renmu. Simplified identification strategy for composite load model parameters [J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 28-34.
- [56] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19):1-7.  
JU Ping. Theory and practice of load modeling in power systems [J]. Automation Of Electric Power Systems, 1999, 23 (19):1-7.
- [57] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64-68.  
JU Ping, JIN Yan, WU Feng, et al. Studies on classification and synthesis of composite dynamic loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (1): 64-68.
- [58] 汤涌, 张东霞, 张红斌, 等. 东北电网大扰动试验仿真计算中的综合负荷模型及其拟合参数[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 75-78.  
TANG Yong, ZHANG Dongxia, ZHANG Hongbin, et al. Synthesis load model and its fitting parameters in simulation of large disturbance test carried out in Northeast China Power Grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 75-78.
- [59] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [60] 鞠平, 戴琦, 黄永皓, 等. 我国电力负荷建模工作的若干建议[J].

- 电力系统自动化 2004, 28(16): 8-12.
- JU Ping, DAI Qi, HUANG Yonghao, et al. Many Suggestions for our country's electric loading modeling work [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 8-12.
- [61] SHENG D, KONDO, D, CIRNE W. Host load prediction in a Google compute cloud with a Bayesian model [C]// High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), 2012 International Conference for, 2012: 1-11.
- [62] DONG Fang, LUO Junzhou, ZHANG Jinhui, et al. Data Aggregation based Adaptive Long term load Prediction mechanism in Grid environment [C]// Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2010 14th International Conference on, 2010: 402-407.
- [63] CHEN D G, YORK M. Neural network based very short term load prediction [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, T&D. IEEE/PES, 2008: 1-9.
- [64] JIA Dongli, MENG Xiaoli, SONG Xiaoahui. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid [C]// Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, 2011: 26-30.
- [65] HUANG Zhiwei, GAO Tian, ZHANG Huaying, et al. Transient power quality assessment based on big data analysis [C]// Electricity Distribution (CICED), 2014 China International Conference on, 2014: 1308-1312.
- [66] LIU Peiqing, LI Huaqiang, YANG Du, et al. Risk assessment of power system security based on component importance and operation state [C]// Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on, 2014: 318-323.
- [67] YANG Liu, LIU Yang, LIAO Yijian, et al. Comprehensive evaluation of regional power grid power quality based on stepwise scatter degree method [C]// Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011: 1-5.
- [68] LI Yamei, FU Hua, YANG Huiyu. Algorithm research for power quality monitoring based on time-frequency analysis theory [C]// Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese, 2010: 2873-2877.
- [69] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, CHACON J, et al. Power quality aspects in a wind power plant [C]// Power Engineering Society General Meeting, 2006 IEEE, 2006 (11): 1-8.
- [70] JEON B, KANG B, PARK S. Modeling of electronic appliance usage pattern and implementation of user centric flexible energy management system applying adaptive energy saving policy [C]// Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), 2012 IEEE International Conference on, 2012: 1-4.
- [71] CHEN Xiangting, ZHOU Yuhui, DUAN Wei, et al. Design of intelligent Demand Side Management system respond to varieties of factors [C]// Electricity Distribution (CICED), 2010 China International, 2010: 1-5.
- [72] VALLVE X, GRILLOT A, GUAL S, et al. Micro storage and demand side management in distributed PV grid-connected installations [C]// 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007: 1-6.
- [73] YE Qing, MA Taotao, GU Yujun, et al. Research on dispatch scheduling model of micro-grid with distributed energy [C]// Electricity Distribution (CICED), 2012 China International Conference on, 2012: 1-5.
- [74] GUJAR M, DATTA A, MOHANTY P. Smart mini grid: An innovative distributed generation based energy system [C]// Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2013 IEEE, 2013: 1-5.
- [75] ZHANG Ruihua, DU Yumei, LIU Yuhng. New challenges to power system planning and operation of smart grid development in China [C]// Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on, 2010: 1-8.
- [76] JIA Qingshan, SHEN Jianxiang, XU Zhanbo, et al. Simulation-based policy improvement for power management in buildings [C]// 2011 8th Asian Control Conference (ASCC), 2011: 944-949.
- [77] CHEN Liyuan, LIU Yun. Scheduling strategy of hybrid Wind-Photovoltaic-Hydro power generation system [C]// Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), International Conference on, 2012: 1-6.
- [78] BAO Zhejing, ZHOU Qin, YANG Zhihui, et al. A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 99: 1-10.
- [79] 蒋秀洁, 熊信银, 吴耀武, 等. 改进矩阵算法及其在配电网故障定位中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 60-63.
- JIANG Xiujie, XIONG Xinyin, WU Yaowu, et al. Improved matrix algorithm and its application in fault location of distribution network [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 60-63.
- [80] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
- LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [81] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 45-46, 49.
- WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-46, 49.
- [82] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68.
- LUO Mei, YANG Honggeng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [83] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.
- MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix based fault location algorithm for complex distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [84] MOSAVI M R, TABATABAEI A. Wavelet and neural network-based fault location in power systems using statistical analysis of traveling wave [J]. Electrical Engineering, 2014, 39: 6207-6214.
- [85] ASLAN Y. An alternative approach to fault location on power distribution feeders with embedded remote-end power generation using artificial neural networks [J]. Electrical Engineering, 2012, 94: 125-134.
- [86] 郭举修. 配电网故障定位与隔离问题的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2004.
- [87] 易礼宏. 基于蚁群算法的配电网故障定位研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- [88] ZHANG Jianhua, ZHANG Guohua, DUAN Manyin, et al. Indices system and methods for urban power grid security assessment [C]// Power and Energy Engineering Conference, 2009, APPEEC 2009, Asia-Pacific, 2009: 1-5.
- [89] LONG Wangcheng, HAN Feng, LI Hui, et al. The force-dynamic relation study between security and efficiency of power grid based on the evaluation model [C]// Power System Technology (POWER-

- CON), 2014 International Conference on, 2014: 251-256.
- [90] RAY P D ,HARNOOR R ,HENTEA M. Smart power grid security: A unified risk management approach [C]//Security Technology (ICCST), 2010 IEEE International Carnahan Conference on, 2010: 276-285.
- [91] FANG Lan ,WANG Chunlei ,MA Guoqing. A framework for network security situation awareness based on knowledge discovery [C]//Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on, 2010, 1: 226 -231.
- [92] PANTELI M , KIRSCHEN D S , CROSSLEY PA , et al. Enhancing situation awareness in power system control centers [C]// Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2013 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on, 2013: 254-261.
- [93] WANG X ,CASTELLI G ,CHIU B C ,et al. Comprehensive situation awareness in a very large power grid control center [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 2012: 1-6.
- [94] WANG J , HU Y , JOHNSON A , et al. System requirements of visualization platform for Wide Area Situation Awareness System [C]// Power and Energy Society General Meeting ,2010 IEEE ,2010: 1-5.

---

收稿日期: 2015-09-28

作者简介:

曹军威 (1973), 男, 研究员, 博士, 从事分布式计算与网络、智能电网、能源互联网方面的研究, jcao@tsinghua.edu.cn;

袁仲达 (1976), 男, 博士, 从事软件工程、嵌入式系统和能源互联网研究;

明阳阳 (1981), 男, 博士, 从事通信和网络体系架构、能源互联网方面的研究。