

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.08.005

大数据背景下智能配电网运营管理方法研究

Study on smart distribution network operation and management methods in the context of big data

李炜^{1a}, 严川^{1b}, 盛庆博^{1a}, 王建平², 王晓东^{1a}, 谭嘉^{3*}

LI Wei^{1a}, YAN Chuan^{1b}, SHENG Qingbo^{1a}, WANG Jianping², WANG Xiaodong^{1a}, TAN Jia^{3*}

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 a. 技术检测中心; b. 经营管理部, 山东 东营 257062;

2. 中国石油化工股份有限公司石化盈科公司, 上海 200127;

3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310007)

(1.a. Technical Testing Center; b. Business Management Department, SINOPEC Shengli Oilfield Company,

Dongying 257062, China; 2. Petrochemical Industry Yingke Company, SINOPEC, Shanghai 200127, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

摘要:智能配电网外延发展,具有分布式电源大量接入、支持用户需求互动等新特征,运营管理变得更为复杂。大数据技术蓬勃发展,对提高智能配电网运营管理水平提供了重要的技术支持。论述了大数据技术在智能配电网中的应用价值,从数据预处理、配电网网损管理、配电网状态估计、配电网健康度评估等4个方面着手,系统分析了大数据技术在智能配电网运营管理中的潜在应用场景,指出了大数据背景下智能配电网网络安全问题及其防护策略,结合实际应用中的问题给出了可行的研究方向,为构建基于大数据技术的智能配电网运营管理体系提供了一种思路。

关键词:大数据;智能配电网;运营管理;健康度评估;网络安全;物联网

中图分类号:TM 72

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)08-0033-08

Abstract: Smart distribution network has developed new characteristics during its extension, such as a large quantity of distributed power supplies and supports for users demand interaction. Thus, the operation and management of smart distribution network is more complex. Big data technology is booming and provides technical support for improving the operation and management level. The application value of big data technology in smart distribution network is described. Then, four potential application scenarios of big data in smart distribution network, data preprocessing, transmission loss management, state estimation and health evaluation, are systematically analyzed. The network security problems and the corresponding protection measures of smart distribution network in the context of big data are expounded. Combining the problems in practical cases with feasible research areas provides an idea for building a smart distribution network operation management system based on big data technology.

Keywords: big data; smart distribution network; operation and management; health evaluation; network security; IoT

0 引言

随着先进通信技术和控制技术快速发展、传感器和智能测量设备大量应用,传统配电网正向智能配电网转型过渡^[1]。与此同时,智能配电网外延发展,其具有分布式电源和电动汽车等柔性负荷大量接入、支持电能供需双方互动等新特征^[2],使智能配电网的运营管理变得更为复杂。物联网技术的快速发展,使智能配电网中电力能源的生产、传输、存

储、消耗等各环节产生海量数据,表现出多元异构、增长迅速、规模巨大、易于变化等大数据典型特征^[3]。考虑到大数据是赋予智慧属性的关键要素,把深度挖掘大数据价值的新型配电网称为“智能配电网”,旨在强调大数据背景下配电网运营管理将呈现智能化特征。此外,在大数据背景下,越来越多研究者使用数据驱动方法和人工智能技术研究智能配电网,而这些研究的共同点是都需要大数据作为基础。因此,除了典型的大数据技术以外,把需要利用大数据的技术手段统称为大数据技术。通过采用大数据核心技术,例如机器学习、深度学

收稿日期:2021-03-02;修回日期:2021-05-28

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技项目(319020-7)

习、分布式存储、结构化查询语言(Structured Query Language, SQL)数据库、可视化技术等,对海量数据进行分析,挖掘数据背后潜在的智能配电网运行关键信息,对于提高智能配电网的运营管理水平有着极大的价值。

2012年以来,大数据一词受到人们越来越多的关注,大数据技术被广泛应用于互联网、金融、能源等领域。与此同时,在电力系统领域,我国学者也开展了一些大数据技术在配电网中的应用研究。文献[4]对配电网故障定位、负荷管理、配电设备故障识别等大数据应用场景进行了分析,通过大数据分析可以提高故障定位的速度,保障配电网的供电可靠性。文献[5]应用大数据技术进行空间负荷预测、变电站预选址和网架结构模式选择,在此基础上,提出了规划方案,实现了配电网精准规划。文献[6]在等距K-means分类的基础上,结合Apriori算法,挖掘配电网线路故障特征规律,大大缩小了配电网线路巡检范围。文献[7]应用大数据方法之一的随机矩阵理论对配电网进行实时故障检测并进行故障空间定位,避免了传统模型、参数不准确带来的问题。针对配电网拓扑异常造成台区线损异常的情况,文献[8]通过大数据挖掘技术,多维度实时分析10 kV配电线路拓扑异常情况,减少了配电网中高损、负损线路,大大提升了线损异常的排查效率。文献[9]设计了一种集多元异构数据的相关性分析、考虑区域、时间和气象因素等配电网多维度的故障风险预测,以及基于复杂网络理论的薄弱环节扫描辨识功能为一体的配电网运行分析系统,该系统有利于相关部门开展配电网的运维检修工作。文献[10]采集调度、生产、营销等各系统的大量数据,通过各类大数据模型分析与计算,查找线损真实原因,提高了配电网线损精细化管理水平。文献[11]提出一种基于转移潮流算法的状态估计智能分析技术,并基于电力大数据实现数据采集与监视控制(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统错误数据的精确定位,有助于人工发现并解决故障。

综上所述,考虑到大数据技术对提高智能配电网运营管理水平具有重要作用,本文从数据预处理、智能配电网网损管理、状态估计、智能配电网健康度评估以及大数据背景下的网络安全防护等方面着手,分析大数据技术在智能配电网运营管理上的潜在应用场景。

1 大数据技术在智能配电网中的价值

目前,大数据技术正受到人们越来越多的关

注,各国政府、企业等机构都开始意识到数据将成为未来最珍贵的资源,但这也依赖于大数据分析能力。随着信息技术的快速发展,对数据获取、存储、分析等技术提出了新的要求,因此诸如分布式存储、分布式计算、流计算、内存数据库、PB级行式/列式数据仓库、数据挖掘与分析等大数据技术迅速发展^[12]。

随着人们对大数据技术的愈发重视,大数据技术在各个行业都有所发展。在医疗行业,由于计算机存储性能大幅提高,在医疗诊治过程中产生的海量数据才得以保存。医疗数据系统将患者就诊记录上传至云端,不仅医生可随时查看患者的病历,而且患者在诊治过程产生的全部数据可用于临床试验研究,从而推动医疗行业的科研发展^[13]。在金融行业,通过对民众在社交平台发表的言论进行大数据分析,可以提前判断市场走势;还可以通过大数据分析,有效预防金融犯罪和诈骗,使银行和客户的利益得到保障^[14]。在互联网行业,短视频平台和购物软件通过运用大数据技术和算法推荐技术,自动推荐给用户浏览过的相关视频或商品^[15],这些个性化的精准推送使用户获取信息更加方便。

越来越多的实践证明,应用大数据技术可以大幅提升各个行业的效益,电网领域也不例外。国家电网有限公司正在构建公司级大数据平台,旨在通过应用大数据技术,挖掘跨专业、跨部门的数据潜在价值,促进公司业务创新发展^[16]。2019年,中国南方电网公司提出数字化转型,旨在以云计算、大数据、物联网、区块链等新一代数字技术为驱动力,深度融合数字技术和企业业务,建立数字化管理运维平台,实现企业向智能电网运营商转型。

目前,智能配电网还存在运营管理体系不完善、海量数据价值有待挖掘分析等特点,主要表现在以下几个方面。

(1)由于电气元件的灵活连接和可再生能源的不稳定发电,智能配电网的拓扑结构和线损都发生频繁且显著的变化,而传统的诸如等效电阻法、等效直流(RMS)电流法、最大电流法等计算线损的方法因此受到挑战,亟待通过大数据技术的方法探索实测数据和线损分布的映射关系。

(2)配电网运行状态的估计可以提高整个智能配电网的供电质量和供电可靠性,具有重要的科学研究价值。如今,智能配电网正在产生大量的多结构化和非结构化数据,长期以来这些数据并没有得到深度挖掘和分析。如何挖掘这些数据背后的价值,如何用大数据描述量大面广、复杂多变的智能配电网实时运行状态,有待进一步研究。

2 大数据技术在智能电网中的应用路径

2.1 数据预处理

配电网中常常由于数据量测装置故障、人工手动记录失误等原因,产生大量异常数据、不完整数据和重复数据等。由于数据规模大,这些质量差的异常数据和不完整数据会影响后续的数据挖掘和分析^[17]。因此,数据清洗是大数据技术应用的一个重要环节。目前,修复异常数据和填充不完整数据的常用方法有插值模型、均值替代模型和回归模型等^[18]。但现阶段传统的数据预处理方法未考虑数据之间的时空相关性,使用这些方法清洗得到的数据并不完全可靠。而如今随着大数据技术的蓬勃发展,新的配电网数据清洗技术也逐渐涌现并达到较好的清洗效果。

近年来,作为深度生成模型之一的生成对抗网络(GAN)被广泛应用于各个领域^[19]。由于GAN可以学习历史数据的变化规律而其他方法难以显示建模数据之间的时空相关性,因此GAN提供了一种有效的异常数据修复、不完整数据填充和数据增强的方法,如图1所示。GAN由2个神经网络组成,分别是生成器和判别器。历史的高质量数据样本作为训练集的真实样本,生成器将低维空间的噪声向量 z 映射到高维空间。通过训练生成器学习真实样本的数据分布并生成新数据来欺骗判别器;而判别器的输入同时来自真实样本和生成样本,其试图区分输入数据是真实数据还是生成数据。经过2个神经网络的对抗博弈,在训练结束后,生成器可生成符合实际分布的数据。因此,在清洗智能电网数据过程中,提取出生成器生成样本的数据,替换或填补到异常数据或缺失数据的对应位置即可。另外,针对智能电网数据类别不平衡的问题,应用GAN也可以生成无穷个少数类样本,从而平衡多数类样本和少数类样本的数量,提高后续模型的性能^[20]。

2.2 深度学习技术辅助智能配电网网损管理

为了最大程度减少线损引起的不必要经济损失并降低安全风险,应制定有效的智能配电网网损管理策略,其中,要充分考虑线损产生的原因并能准确计算线损。由于电气元件的灵活连接和通信错误等原因,智能配电网拓扑信息常常来不及更新或信息不够准确,为了实现线损计算和智能配电网网损管理,首先要进行拓扑辨识^[21]。

2.2.1 智能配电网拓扑辨识

通常智能配电网节点数量众多,枚举节点之间的拓扑关系需要大量计算,时间成本较高。若将拓

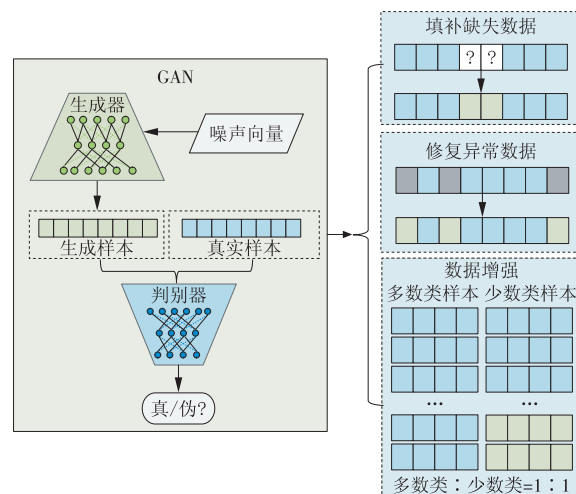


图1 基于GAN的智能配电网数据预处理

Fig. 1 GAN-based data preprocessing in smart distribution network

扑辨识问题当作概率推断问题处理,则可以采用大数据技术之一的深度神经网络来完成。拓扑辨识中用到的数据大多是电气测量数据,例如有功/无功功率注入、电压幅值、相角等^[22]。智能配电网拓扑辨识过程如图2所示,输入数据为经过预处理的电气测量数据,神经网络的输入层先对潮流方程进行回归,确定分布式电源、变压器、储能装置和负载等数量,通过隐藏层的神经网络逐步推断线路和负载之间的相位连接,即确定智能配电网拓扑特征。最后,用矩阵形式展示智能配电网拓扑结构,矩阵中每个元素表示相应2个电气元件的距离。

2.2.2 智能配电网网损管理

基于深度神经网络的拓扑辨识是线损计算的基础,而基于线损计算结果可进一步通过深度学习方法给出优化线路开关、电容器数量和位置等设置,最大程度地减少智能配电网网损,从而实现智能配电网网损管理,其中网损管理框架如图3所示。

拓扑辨识结果与智能配电网电气测量数据作为深度学习模型的输入,该模型获取了智能配电网拓扑和线损的映射关系,最终模型输出每条线路的线损和线路开关、电容器数量和位置等可控元件的优化设置。

总之,虽然智能配电网中潮流分配始终在变化,但可再生能源发电和负荷功耗以周期性模式运行,因此历史数据中通常存在时间相关性,这使得用深度学习模型构造输入与输出映射关系更加容易,是实现智能配电网拓扑实时辨识、线损计算和网损管理决策的有力武器。另外,图3中的深度学习模型可采用长短期记忆神经网络(LSTM),它在处理时序数据问题上有着独特的优势,可避免梯度消失或梯度爆炸等问题^[23]。

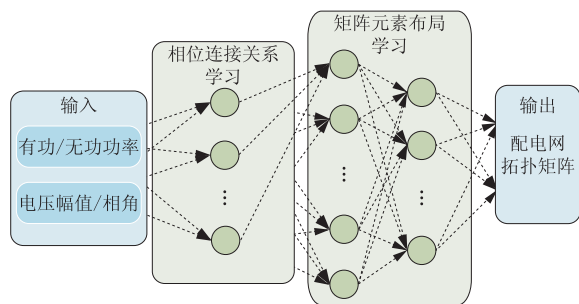


图2 智能配电网拓扑辨识过程

Fig. 2 Identification process of smart distribution network topology

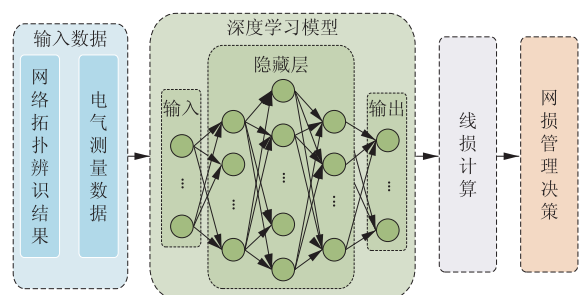


图3 网损管理框架

Fig. 3 Transmission loss management framework

与传统的循环神经网络相比,LSTM网络加入了输入门、遗忘门和输出门,该结构可根据不同的数据特征在不同程度上记忆和遗忘输入数据。选择与输出结果更相关的输入变量,可以得到更好的网络输出结果,因此在所提出的模型中,将三相有功/无功功率、电压幅值、相角、功率因数等电气测量数据作为LSTM输入特征。

2.3 基于数据挖掘技术的智能配电网状态估计

配电网状态估计是根据配电网各种量测信息对运行状态量进行估计,如今已成为电力系统必不可少的重要部分。可以说,状态估计方法很大程度上依赖于配电网结构参数,而实际智能配电网应用时,使用的都是静态电网参数。当网络拓扑变化时,静态电网参数会与实际情况存在偏差,从而影响状态估计的结果^[24]。因此,研究动态电网参数的求解方法对于状态估计具有重要意义。近年来,国内外对动态参数修正研究主要集中在利用相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)量测的电压相量、电流相量等数据进行错误参数的辨识与修正。但由于PMU布点不足,量测范围无法覆盖全网,导致动态参数的修正无法覆盖全网^[25]。因此,可考虑采用数据挖掘技术,分析PMU实时量测数据与配电网拓扑、电网参数之间的关系,从而对整个智能配电网拓扑及参数进行辨识与修正。

2.4 基于关联规则挖掘的智能配电网健康度评估

近年来,国内外开展了许多关于配电网健康度

的研究,旨在通过掌握配电网和配电设备健康状态,帮助配电网运营管理人员进行辅助决策^[26]。如今智能配电网设备数量繁多,量测信息数据量大,亟待研究一种有效的技术手段对智能配电网关键信息进行深度挖掘,从而综合评价智能配电网健康度,并找出影响智能配电网运行的主要因素,为运营管理人员制定优化运行决策提供参考依据。

基于关联规则挖掘技术的智能配电网健康度评估流程如图4所示。关联规则挖掘技术是数据挖掘的一个重要分支,在该关联规则中,需给定2个阈值,最小支持度和最小置信度^[27-29]。支持度与置信度均大于阈值的规则称为“强规则”,通过挖掘出“关键特征量-智能配电网运行健康度”的强规则,就可以得到影响智能配电网健康状态的关键特征量。

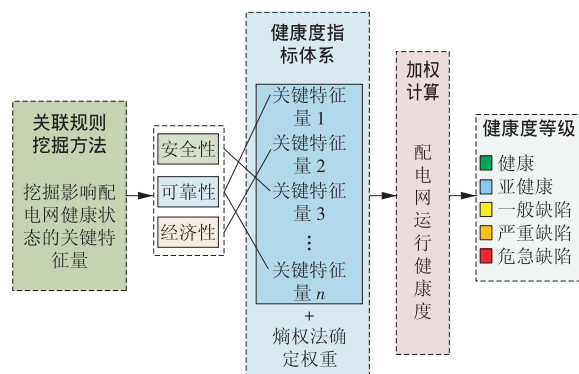


图4 智能配电网健康度评估流程

Fig. 4 Process of smart distribution network health evaluation

基于图4的流程,首先采用关联规则挖掘方法,如Apriori算法,从智能配电网多源异构数据中挖掘影响智能配电网健康状态的关键特征量集,以减少输入的维度,提高健康度评估的准确度。同时,为了全面评估复杂的智能配电网系统,综合考虑安全、可靠、经济3个维度,以所属关键特征量作为二级指标构建智能配电网健康度评估指标体系。接着,基于熵权法确定各个关键特征量的权重,将关键特征量集作为健康度评估模型的输入并加权计算,即可得智能配电网运行健康度。根据目前的研究情况,将智能配电网健康状态划分为健康、亚健康、一般缺陷、严重缺陷和危急缺陷5个等级^[30]。

此外,通过实时监测智能配电网及其设备健康状态,监测对象是所有配电设备的集合,可作出时间和空间双维度的智能配电网健康度画像。画像可以直观展示智能配电网过去、现在及未来的健康度变化情况和趋势,基于健康度画像辅助智能配电网运营管理人员制定运维策略。

3 大数据应用背景的智能配电网安全防护

3.1 智能配电网网络攻击分类

事实上,大数据技术的网络安全是必须关注且具有挑战性的问题。理想的具有安全防护的大数据系统应具有机密性(Confidentiality)、完整性(Integrity)和可用性(Availability),这些性质统称为CIA^[31],CIA的详细解释如下。

机密性(C):是否能够保障模型参数和数据集的隐私性。针对机密性的攻击目标通常是截获大数据系统的敏感数据,例如根据智能配电网终端的负荷数据获取当地生产、消费水平等。

完整性(I):大数据模型的工作过程是否受到干扰。针对完整性的攻击目标很多,例如设计噪声破坏了正常的数据样本,攻击者更改模型参数等。

可用性(A):大数据模型是否正常运行且运行稳定。攻击可用性的目标通常是破坏模型的有效性,例如在面队对抗性样本时,模型输出有误等。

以破坏CIA的目标作为分类依据,将网络安全攻击分为隐私攻击和投毒攻击^[32]。其中隐私攻击是以破坏机密性为目标,数据和模型受到隐私威胁。例如,智能配电网中大数据种类繁多,其中包含SCADA系统量测的人员数据、物料信息、工艺数据、环境数据、设备数据等多种电力系统生产数据,这些数据在大数据模型广泛使用的同时会带来很多隐私威胁。在智能配电网终端,负荷数据包含大量用户的信息,比如用户用电习惯、生活习惯甚至经济状况等,攻击者盗取这些私人信息,从而严重威胁用户的个人隐私。除了常见的对数据隐私攻击外,还包括对模型参数、模型结构、模型本身等关于大数据模型的隐私攻击^[33-35]。

通常,一个大数据模型是通过花费大量时间和金钱来训练得到的,攻击者通过模型攻击就轻易获取了参数、结构等信息,不仅造成了财力物力的损失,也让攻击者更加方便地实施投毒攻击和对抗攻击。

投毒攻击的目标有2个,分别是破坏完整性和可用性^[36]。破坏完整性目标也称为“后门”攻击,即通过注入恶意数据,为攻击者争取一个“后门”,使系统无法分辨病毒完成攻击。破坏可用性目标是通过增加不良数据或修改数据来替换原始数据,使模型精确度降低。

随着网络技术的发展,涌现了许多破坏力较强的新计算机病毒。病毒不仅可以复制数据、破坏数据,导致采用大数据技术挖掘分析了错误的特征,影响对智能配电网的网损管理、状态估计、运行状

态等一系列评估结果,可能会导致错误的管理决策;攻击力较强的病毒还可以迷惑系统,插入某些非正常数据完成任何攻击,这种攻击甚至可以控制大数据系统,后果非常严重。由此可见,网络攻击造成了大数据技术中数据与模型的破坏,降低了大数据技术应用的有效性。

3.2 智能配电网网络安全防护策略

针对智能配电网网络安全防御问题,应针对攻击类型,采取相应的应对网络安全手段。首先,为了避免隐私威胁,可以采用同态加密技术、安全多方计算技术和差分隐私技术^[37-39]。这3种隐私保护技术各有适用场景,同态加密技术具有计算开销大、计算效率低、实用性不高等特点,适合集中式学习、外包计算等场景;安全多方计算技术是一种不依赖于单个机构或个人的密文计算技术,适用于数据协同统计、保护隐私的数据统计等场景;差分隐私技术具有计算开销小、计算效率高、实用性不高等特点,适合模型参数保护、大数据收集等场景。其次,针对投毒攻击,应有效应用防火墙、入侵检测技术、杀毒软件等手段抵御外来不良攻击。

4 结束语

本文对大数据背景下智能配电网的运营管理方式进行了系统性的分析,研究了以下几个方面的智能配电网大数据技术。

(1)数据预处理技术。针对数据规模庞大的智能配电网,应用生成对抗网络可有效实现异常数据修复、缺失数据填充和数据增强等功能,解决传统数据清洗技术未考虑数据之间的时空相关性问题。

(2)网损管理。使用深度神经网络实现智能配电网拓扑实时辨识,进而准确计算线损。基于线损计算结果,通过长短期记忆神经网络分析与计算,得到配电网线路开关、电容器数量和位置等可控元件的优化设置,从而提高智能配电网网损精细化管理水平。

(3)状态估计。通过采用数据挖掘技术对智能配电网动态结构及参数进行辨识,有效提升状态估计准确度。

(4)健康度评估。利用关联规则分析挖掘智能配电网健康度与量测数据的潜在关系,有利于全面评估智能配电网健康运行状态。

大数据技术在智能配电网的应用具有广阔前景,但也存在网络安全隐患等问题,未来可加大开展大数据可视化技术、智能配电网故障辨识、智能配电网风险预警及防护策略等方面的研究。

参考文献:

- [1] 刘灏, 毕天姝, 徐全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 23-29.
LIU Hao, BI Tianshu, XU Quan, et al. High precision synchronous phasor measurement technique scheme and prospect of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 23-29.
- [2] 祖国强, 肖峻, 穆云飞, 等. 计及分布式电源与需求响应的智能配电系统安全域[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 100-107.
ZU Guoqiang, XIAO Jun, MU Yunfei, et al. Security region for smart distribution system considering distributed generator and demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 100-107.
- [3] 崔艳妍, 王军, 苏剑, 等. 配电网运营大数据挖掘与分析[J]. 供用电, 2017, 34(6): 20-26.
CUI Yanyan, WANG Jun, SU Jian, et al. Big data mining and analysis of distribution network operation [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(6): 20-26.
- [4] 赵海波. 电力行业大数据研究综述[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 62-72.
ZHAO HaiBo. A survey of big data research in power industry [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 62-72.
- [5] 李宁, 薛少华, 马向林, 等. 基于大数据技术的配电网规划[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 80-86.
LI Ning, XUE Shaohua, MA Xianglin, et al. Distribution network planning method based on big data technologies [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 80-86.
- [6] 方鑫, 殷俊, 蒋苏, 等. 基于等距 K-means 和 Apriori 算法的配电网故障规律挖掘方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 99-104.
FANG Xin, YIN Jun, JIANG Su, et al. Data mining algorithm for fault rules of distribution network based on combination of isometric K-means and Apriori algorithm [J]. Intelligent Power, 2020, 48(10): 99-104.
- [7] 郑康霖, 耿增玮, 王红霞, 等. 基于同步量测大数据的配网单相接地故障检测及定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 50-56.
ZHENG Kanglin, GENG Zengwei, WANG Hongxia, et al. Single-phase grounding fault detection and localization based on big data from synchronized phasor measurement [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 50-56.
- [8] 李正光, 钱锋强, 刘艾旺, 等. 基于多维特征量融合的配电网拓扑异常溯源与应用模型研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(7): 71-79.
LI Zhengguang, QIAN Fengqiang, LIU Aiwang, et al. An anomaly tracing and application model of distribution network topology based on multi-dimensional feature fusion [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(7): 71-79.
- [9] 张稳, 盛万兴, 杜松怀, 等. 基于海量数据的配电网运行分析系统架构与技术实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 147-153.
ZHANG Wen, SHENG Wanxing, DU Songhuai, et al. Architecture and technology implementation of massive data based distribution network operation analysis system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 147-153.
- [10] 徐飞, 孙明柱, 凌松, 等. 基于电力大数据的配电网同期线损管理[J]. 安徽电力, 2019, 36(1): 43-46.
XU Fei, SUN Mingzhu, LING Song, et al. Synchronous line loss management of distribution network based on power big data [J]. Anhui Electric Power, 2019, 36(1): 43-46.
- [11] 句荣滨, 王巍, 孙畅岑, 等. 基于电力调度大数据的状态估计智能分析技术[J]. 东北电力技术, 2020, 41(3): 1-4.
JU Rongbin, WANG Wei, SUN Changcen, et al. Smart analysis technology of state estimation based on electric power big data [J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(3): 1-4.
- [12] 赵会群, 吴凯锋. 一种大数据估价算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(9): 110-116.
ZHAO Huiqun, WU Kaifeng. Big data valuation algorithm [J]. Computer Science, 2020, 47(9): 110-116.
- [13] 徐艳萍. 试谈大数据技术在医疗信息化中的应用[J]. 信息记录材料, 2020, 21(12): 167-168.
XU Yanping. The application of big data technique in medical informatization [J]. Information Recording Material, 2020, 21(12): 167-168.
- [14] 孙自强, 于龙. 公安大数据时代金融犯罪预警防控研究[J]. 中国防伪报道, 2020(12): 82-89.
SUN Ziqiang, YU Long. Research on early warning and prevention of financial crimes in the era of big data of public security [J]. China Anti-Counterfeiting Report, 2020(12): 82-89.
- [15] 陆泽辉. 移动电子商务环境下基于数据分析的商品推荐算法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [16] 汪峰. 泛在电力物联网与大数据应用[J]. 中国电力企业管理, 2019(28): 58-59.
WANG Feng. Ubiquitous power internet of things and big data application [J]. China Power Enterprise Management, 2019(28): 58-59.
- [17] 朱有产, 梁玮轩, 王英姿. 基于时间序列的配电网数据清理和融合方法研究[J/OL]. 电网技术: 1-8 [2021-05-26]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0886>.
ZHU Youchan, LIANG Weixuan, WANG Yingzi. Research

- on data cleaning and fusion in distribution power grid based on time series technology [J/OL]. Power System Technology: 1-8 [2021-05-26]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0886>.
- [18] 雷峰津, 房俊. 基于相关分析的电网电能质量缺失数据填充方法[J]. 北方工业大学学报, 2020, 32(5): 77-82.
LEI Fengjin, FANG Jun. Imputation method for the missing data of power quality in power grid based on correlation analysis [J]. Journal of North China University of Industry, 2020, 32(5): 77-82.
- [19] 王守相, 陈海文, 潘志新, 等. 采用改进生成式对抗网络的电力系统量测缺失数据重建方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 56-64.
WANG Shouxiang, CHEN Haiwen, PAN Zhixin, et al. A reconstruction method for missing data in power system measurement using an improved GAN [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 56-64.
- [20] 刘云鹏, 许自强, 和家慧, 等. 基于条件式 Wasserstein 生成对抗网络的电力变压器故障样本增强技术[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1505-1513.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, HE Jiahui, et al. Data augmentation method for power transformer fault diagnosis based on conditional Wasserstein generative adversarial network [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1505-1513.
- [21] 孙峰, 钱啸, 吕勤, 等. 多系统融合的线损大数据挖掘与应用[J]. 浙江电力, 2019, 38(1): 111-116.
SUN Feng, QIAN Xiao, LYU Qin, et al. Mining and application of line loss big data with multisystem fusion [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(1): 111-116.
- [22] 杨志淳, 沈煜, 杨帆, 等. 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 5-11.
YANG Zhichun, SHEN Yu, YANG Fan, et al. Topology identification method of low voltage distribution network based on data association analysis [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 5-11.
- [23] 李彦君, 裴玮, 肖浩, 等. 基于深度学习的微网需求响应特性封装与配电网优化运行[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 157-165.
LI Yanjun, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Deep learning based micro grid demand response feature encapsulation and distribution network optimization operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 157-165.
- [24] 刘喆林, 王成山, 李鹏, 等. 多源量测数据融合的配电网状态估计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2605-2615.
LIU Zhelin, WANG Chengshan, LI Peng, et al. State estimation of distribution networks based on multi-source measurement data and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2605-2615.
- [25] 高正男. 多信息源数据融合的电网运行状态估计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [26] 王雅琪, 陈堂贤, 王俊, 等. 含分布式电源的配电网健康评价研究[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(8): 36-41.
WANG Yaqi, CHEN Tangxian, WANG Jun, et al. Research on health evaluation of distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(8): 36-41.
- [27] 周炳华, 王洋, 李峰, 等. 城市能源互联网视角下的主动配电网规划设计与策略研究[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 59-65.
ZHOU Binghua, WANG Yang, LI Feng, et al. Research on active distribution network planning and design strategy from the perspective of urban energy internet [J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 59-65.
- [28] 胡丽娟, 刁赢龙, 刘科研, 等. 基于大数据技术的配电网运行可靠性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 265-271.
HU Lijuan, DIAO Yinglong, LIU Keyan, et al. Operation reliability analysis of distribution network based on big data technology [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 265-271.
- [29] 姚海燕, 吴金荣, 徐辉, 等. 语义物联视角下的电力设计公司数据管理研究[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 38-44.
YAO Haiyan, WU Jinrong, XU Hui, et al. Research on data management of power design companies from the perspective of semantic interconnection [J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 38-44.
- [30] 马钊, 周莉梅, 袁海文, 等. 现代配电网健康指数理论及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 130-140.
MA Zhao, ZHOU Limei, YUAN Haiwen, et al. Health index methodology of modern distribution network and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 130-140.
- [31] 魏立斐, 陈聪聪, 张蕾, 等. 机器学习的安全问题及隐私保护[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(10): 2066-2085.
WEI Lifei, CHEN Congcong, ZHANG Lei, et al. Security issue and privacy preserving in machine learning [J]. Computer Research and Development, 2020, 57(10): 2066-2085.
- [32] 陈锐. 基于大数据的计算机网络安全研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(24): 124-125.
CHEN Rui. Research of computer network security based on big data [J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(24): 124-125.
- [33] 张徐亮, 万里冰, 钱伟中, 等. 基于区块链的电力大数据安全保障体系[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 68-74.
ZHANG Xuliang, WAN Libing, QIAN Weizhong, et al. Security assurance system for electric power big data based on blockchain technology [J]. Huadian Technology, 2020,

- 42(8): 68-74.
- [34]任奎,孟泉润,闫守琨,等.人工智能模型数据泄露的攻击与防御研究综述[J].网络与信息安全学报,2021,7(1):1-10.
- REN Kui, MENG Quanrun, YAN Shoukun, et al. Survey of artificial intelligence data security and privacy protection [J]. Journal of Network and Information Security, 2021, 7(1): 1-10.
- [35]鄢晶,高天露,张俊,等.边云链协同技术在能源互联网数据管理中的应用及展望[J].华电技术,2020,42(8):41-47.
- YAN Jing, GAO Tianlu, ZHANG Jun, et al. Application and prospect of edge-cloud-chain collaboration technologies for energy internet data management [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 41-47.
- [36]李盼.针对机器学习算法的投毒及其防御技术研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [37]何伟超.基于同态加密隐私保护的机器学习关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [38]李启飞.面向隐私保护的多方联合学习方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [39]谢荣,温蜜.基于差分隐私的敏感数据挖掘技术研究[J].上海电力大学学报,2020,36(4):401-407.

XIE Rong, WEN Mi. Research on sensitive data mining technology based on differential privacy [J]. Journal of Shanghai Power University, 2020, 36(4): 401-407.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

李炜(1981—),男,内蒙古乌兰察布人,高级工程师,工学硕士,从事油田节能技术研究方面的工作(E-mail: liwei027.slyt@sinopec.com)。

严川(1972—),男,山东东营人,高级工程师,从事油田电力管理的研究工作(E-mail: yanchuan.slyt@sinopec.com)。

盛庆博(1985—),男,河南台前人,高级工程师,工学硕士,从事油田节能监测研究方面的工作(E-mail: shengqingbo.slyt@sinopec.com)。

王建平(1976—),男,上海人,高级工程师,工学硕士,从事油田信息技术的研究工作(E-mail: johnson.wang@pcitc.com)。

王晓东(1983—),男,山东龙口人,高级工程师,工学硕士,从事油田节能技术研究方面的工作(E-mail: wangxiaodong.slyt@sinopec.com)。

谭嘉*(1997—),女,四川达州人,在读硕士研究生,从事电力系统自动化等研究方面的工作(E-mail: tan_jiaa@163.com)。