

低压台区透明化技术综述

张勇军¹, 秦绍基¹, 孙健², 史训涛^{1,2}, 刘通², 雷一勇³, 阳浩³

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 3. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 低压台区透明化对全面提升低压配电系统的服务质量、管理水平和消纳能力具有重要意义, 是“双碳”战略下构建新型低压配电网的必由之路。首先阐述了低压台区透明化的核心内涵和发展现状。其次, 梳理了目前国内外在低压台区透明化领域的相关研究, 进而在感知、计量、通信、平台和安全 5 个方面提出了低压台区透明化的关键任务, 并阐述了各关键任务的主要内容。然后指出现阶段需要重点关注的低压台区透明化关键技术及其未来发展方向。最后, 对低压台区透明化技术进行展望。

关键词: 低压台区; 透明配电网; 新能源; 电碳计量体系

Review of Transparent Technology of Low-Voltage Substation Area

ZHANG Yongjun¹, QIN Shaoji¹, SUN Jian², SHI Xuntao^{1,2}, LIU Tong², LEI Yiyong³, YANG Hao³

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The transparency of low-voltage substation areas is of great significance for comprehensively improving the service quality, management level, and consumption capacity of low-voltage distribution systems, and is the only way to build a new type of low-voltage distribution network under the "dual carbon" strategy. Firstly, the core connotation and current development status of transparency in low-voltage substations are elaborated. Secondly, relevant research on the transparency of low-voltage substations at home and abroad has been reviewed. Furthermore, the key tasks of low-voltage substation transparency are proposed in five aspects: perception, measurement, communication, platform, and security, and the main contents of each key task are elaborated. Then the key technologies and future development directions of low-voltage substation transparency that need to be focused on at this stage are pointed out. Finally, transparency technology in low-voltage substation areas are prospected.

Key words: low-voltage substation area; transparent distribution network; new energy; electric carbon measurement system

0 引言

为了保障我国能源转型的质量, 实现“碳达峰”与“碳中和”的“双碳”目标, 建设新型电力系统是当前电力行业的关键任务^[1]。大量可再生能源的接入对低压配电网带来显著影响。为了有效应对低压配电网运行控制所面临的新挑战, 构建基于台区透明

化的新型低压配电系统显得尤为关键和重要^[2]。

低压台区是配电网直面用户供电的基本单元, 主要由配变、配电装置、配电线路以及用户组成^[3]。据统计, 全国低压公变台区约 600 万台, 低压用户约 6 亿户。台区覆盖配电房和箱变等多种场景, 供用电环境复杂、设备点多面广。然而目前低压台区普遍存在信息缺失、信息不准确和信息管理混乱等问题^[4], 其可观可测性不足, 主动发现并处理故障及隐患的能力较弱。因缺乏高效的监测与管理手段, 目前多采取‘抢修代替维护’的方式, 运维工作较为被动。客户服务仍局限于应对客户投诉后的被动响应。缺乏智能化的技术手段以适应用户端

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177085); 中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20232458)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177085); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZBKJXM20232458).

新能源蓬勃发展的运行管理需求。

低压台区透明化是指将通信技术结合到电网应用中,基于物联网技术实时采集和分析台区中并网设备及重要节点的运行数据,并反映到配电网可视化平台,实现全面感知、全状态可见和全态势预测的一种透明化电网模式^[3,5]。台区透明化能强化台区的信息化管理和数字化运维水平,是低压智能配电网的发展方向,是透明电网^[5-7]发展的最大技术障碍和瓶颈。

随着国内外对台区透明化研究的深入,文献[8]基于电力物联网技术体系详细分析了低压台区透明化关键技术,强调基于智能电表和电力物联网的拓扑识别数字化作为台区透明化建设的基础手段^[9-10]。此外,非电气量的监控也被认为是透明化技术的基础支撑^[11-14]。类似地,煤矿透明化工作面技术^[1]和农村配电网台区节能关键技术^[2]的研究,虽然涉及不同领域,但都展示了透明化技术在提高效率和监控方面的广泛应用。但目前仍旧停留在透明感知的初步阶段,加上对全域透明化涉及到高投资的顾虑,如何系统化进行透明化建设还有待进一步深入。

针对低压台区透明化问题,本文首先梳理国内外相关技术研究成果,随后提出并分析5个关键任务,再基于这些研究成果,深入剖析各任务对应的关键技术,最后展望低压透明台区的实现。

1 低压台区透明化的研究梳理

针对台区透明化的研究,国内外的文献主要在感知、计量、通信和应用4个方面展开。

1.1 感知技术

针对透明电网的感知技术,可以划分为电气设备状态感知和用户用电数据感知。需要实时监测的电气设备主要是配电变压器与配电线路,需要感知的用户用电数据包括负荷、电压和电流等。

1.1.1 配电变压器实时状态感知技术

为了监测变压器运行状况,传统常用的技术是气相色谱法或基于电化学方法的气体传感器技术。文献[11]则利用超声波信号对变压器内部进行局部放电的监测和定位。文献[12]针对故障下氢气是溶解气体成分中变化最明显的特点,使用氢气和乙炔气体传感器构建变压器的高效实时监测系统。还有研究关注光学传感技术在变压器实时感知领域的应

用,采用光纤光栅传感器构建了变压器的多参量智能感知系统^[13],取得了良好效果。多类型传感技术的融合应用,正成为推动变压器实时感知技术发展的新趋势。如文献[14]将光学传感技术与化学传感技术结合起来使用,实现了较高准确性的实时监测效果。

1.1.2 配电线路实时感知技术

针对配电线路的实时感知主要是线路故障的监测,以此实现故障位置的迅速定位,提高线路故障排除工作的水平。

现有的配电线路实时感知技术主要分为主动感知技术与被动感知技术,前者需要外加信号实现故障监测定位,后者通过自身电气量(包括暂态量方法和工频量方法)信息实现故障监测定位。

基于暂态量方法对中性点经消弧线圈接地方式下的故障快速监测定位具有良好效果^[15],可以利用多判据融合的方法提高准确性。而基于工频量的方法由于易受系统运行方式影响,因此某些情况无法求出有效解^[16]。

文献[17-18]分析了以信号注入为主的主动感知技术,该方法对于单相接地故障的监测效果很好,其通过发信装置输入特征电流信号,信号外流直至经过接地点进入大地,此时利用收信装置检测回路上是否存在注入电流信号即可实现故障选线。

智能化视频监控技术亦逐步融入配电线路监测领域。然而,鉴于台区线路繁多且错综复杂,为每条线路配备多功能传感方案无疑需承担高昂的投资成本。为了完善全域传感网络,本文需要深入研究高效的传感覆盖配置方案,通过线路间的传感设备实现实时通信,将同类感知数据进行融合,同时利用不同类感知数据进行互补,从而构建出完整的区域线路感知数据信息,最终实现配电线路的全域透明感知。

1.1.3 用户负荷实时感知

非侵入式负荷监测(non intrusive load monitoring, NILM)^[19]技术因其无需额外安装传感设备的优点而得到了广泛关注。文献[20]采用装袋决策树模型提升了家用电器负荷分类的准确性,但该方法依赖于高采样率,导致实施成本上升。文献[21]则提出了一种基于加性因子隐马尔可夫模型的NILM方法,该方法在低采样率下仍能保持较高的识别准确率。近年来,深度学习的应用在NILM领域显示

出巨大的前景^[22]。文献[23]在NILM中利用了递归神经网络和去噪自动编码器,比传统机器学习方法具有更好效果。

然而,深度学习技术的应用需要大量历史数据作为支撑。考虑到低压配电网拥有海量的用户节点,若要对每个用户节点进行长期的用能数据采集,就需要配置大量的传感设备。因此,可以通过进一步完善全域传感网络,选取全域内的典型用户进行数据采集,并利用生成式模型构建出全用户数据集,从而为构建实时透明感知的NILM模型提供强有力的数据支撑。

1.1.4 电压电流信息实时感知

当前,国内外电能信息采集的主流方式划分为传统的接触式采集与新兴的非接触式采集两大类。

传统的电流互感器研究主要集中在电磁式电流互感器、穿芯式电流互感器以及电子式电流互感器3种,现有新型电流互感器的研究多数考虑了光学传感器的应用,全光纤的电流互感器能提升电流互感器的可靠性^[24],但是成本仍旧较高。

鉴于接触式电压感知技术受多种条件制约,非接触式技术逐渐崭露头角,成为研究的新趋势。文献[25]提出了利用电光效应进行测量的方案,但是操作流程较为复杂。因此还有待进一步深入研究。

1.2 计量体系

针对低压台区的计量体系的研究重点在于如何应对计量误差的问题以及提升电表状态评估性能。以往的计量算法研究主要针对稳态计量算法,包括全电能计量方式下的电能积分算法和谐波电能计量方式下的电参量分析算法。例如,在电力系统分析中,稳态计算方法如牛顿-拉夫逊算法和P-Q分解法被广泛应用于潮流计算,以确定电力网络的运行状态。此外,稳态法在工程和科学领域中被用于分析稳定的系统和过程,提供对系统行为的稳定性和长期性能的详细了解。然而,越来越多的可再生能源接入低压配电网,其带来的动态特性使得传统的稳态计量算法难以满足精度要求。

在此背景下,非稳态计量算法得到关注,诸如离散小波变换、稳态小波变换和小波包变换等许多时-频分析算法成了研究热点,但还需要从以下两个方面进一步提高准确性^[26]: 1) 寻找准确度更高的基波频率估计方法; 2) 为了适应非稳态电能计量算法的构建,需要进一步完善时-频分析策略。

此外,还有学者对计量装置的误差和状态评估进行了研究。文献[27]采用神经网络构建误差补偿模型,提高计量的准确性。文献[28]使用灰色理论构建了计量装置的状态评估模型,但是未能充分利用计量数据。文献[29]则基于机器学习方法充分利用大量数据,但训练模型所需条件较高。目前这些研究仅限于电计量领域,尚未将碳排放计量与电能计量相结合。而利用电碳耦合的特性,可以互补提升电计量与碳计量的准确性。因此,构建电碳计量体系对于台区实现计量透明化具有重大意义。

1.3 通信技术

目前已有的低压台区通信技术如电力载波通信、低功耗蓝牙和无线专网等技术已较为成熟。为满足台区的通信需求,高速电力线载波通信应运而生,在语音和数字通信上有较好的经济性和广泛性^[30-32]。目前的研究多数是基于已有电力载波通信系统的基础上从速度和可靠性等方面进行性能优化。

另外,5G技术以其高速率、低时延和大连接数的优势,在智能电网中展现了巨大的应用潜力。它不仅在实时数据采集和传输方面表现出色,满足了高带宽通信应用的需求,而且在智能电网的多个环节中发挥着关键作用。例如,5G技术可以用于配电设备铭牌信息的读取、配电台区中仪表信息的实时分析、配电房视频监控以及移动式现场施工作业的管控等^[33]。此外,5G技术在智能电网中的应用,如国网山东电力的省域5G电力专网建设,已经证明了其在提升电力系统运行安全性、降低故障率和提高运行效率方面的显著效果^[1]。这些应用不仅提高了电网的智能化水平,还为城市配电网带来了巨大的经济效益^[34]。总的来看,5G技术的研究应更加关注与现有数据传输方案的异构化融合。

由于台区接入设备类型不断增加,不同设备间可能存在通信壁垒。已有多数研究忽视了异质通信类型设备间的交互,为实现设备的协调运行与全域信息互通,构建适应不同通信技术异构化接入的多模通信系统具有重要意义。

1.4 透明化应用

台区透明化应用最终要服务于低压台区的管理者,以提升电网业务能力和发掘低压透明台区潜在的增量价值。当前,低压台区透明化应用的研究方

向与电力物联网在低压配电网中的探索相契合,主要聚焦于拓扑辨识、窃电监测及故障诊断三大核心应用领域。

1.4.1 拓扑辨识技术

智能化的拓扑识别方法越来越受到人们重视,是取代人工排查方法的主流趋势。已有的台区智能化拓扑辨识方法研究中,主要分为信号驱动方法^[35]与数据驱动方法^[36]两类。由于物理方法需要安装外置设备而成本较高且信号干扰会带来误差,数据驱动方法已经成为研究热点。但是随着新能源渗透率的提升,电力系统面临随机性和双向潮流问题的挑战。在此背景下,信号驱动类方法因其不依赖于复杂的潮流计算或状态估计,展现出在配电网优化运行中的良好性能,因此具有重要的研究价值。

已有数据驱动方法的数据特征工程正逐渐从普通的数学计算方法过渡到机器学习的聚类方法,进一步过渡到神经网络模型方法^[36]。但是神经网络的方法难以适应数据缺失的问题。文献[37]通过应用生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)训练用于拓扑识别的模型,采用半监督学习方法,有效降低了对大量标注数据的依赖,同时提高了模型的准确率和适应性。

为了适应渗透率提升带来的影响,将新型数据分析技术应用到数据驱动类方法中,同时选择在某些随机性表现较强的区域辅助信号驱动类方法,两者结合既充分利用台区数据减少外置设备的投入,又能够借助信号法减少数据的状态估计,以提升拓扑辨识的整体准确性和经济性,是一个值得研究方向。

1.4.2 窃电检测技术

传统窃电人工排查的方法效率低下且运营成本较高。低压台区透明化的建设使得台区的计量系统逐步完善,可以高效获取用户数据与计量数据,数据驱动型的带电检测方法成为主流趋势。

窃电检测方法分为无监督模型和有监督模型两类。两者都需要基于大量样本作为数据集训练模型,关键区别在于所使用的数据集是否带有标签。文献[38]属于无监督模型,其构建了宽带卷积神经网络模型,结合用电数据特征实行窃电监测。文献[39]认为以支持向量机为代表的有监督模型方法进行窃电检测能够提高准确率,但该方法还存在样本量差异、模型参数差异导致不同类型识别准确率差

距大的问题。为此文献[40]将支持向量机的核参数和惩罚参数设为变量构建优化问题,有效提升了精确性与泛用性。

随着台区感知系统和计量体系的完善,标签数据集的获取难度极大下降,有监督模型方法有望得到深入研究和广泛应用,且目前出现了与深度学习技术结合的趋势^[38]。

1.4.3 故障检测技术

台区故障检测方法通常包括矩阵类方法和智能优化类方法。矩阵类方法适用于数据信息准确且结构简单的台区,具有原理简单和运算速度快等特点,但容错能力较差。智能优化类方法通过迭代求解现实状态与期望状态差异最小的最优化问题来确定故障位置,对算力有较高要求。

随着台区透明化进程的推进,感知单元的广泛覆盖与计量体系的完善,从而使得研究者能够充分利用大量的台区实时运行数据来实施故障检测。随机矩阵理论因其能够高效分析高维数据集而受到了广泛的关注。文献[41]利用广域测量系统数据构建考虑平均谱半径指标的随机矩阵故障检测模型,能够精准地判断网络故障,并迅速定位到具体的故障区域。文献[42]通过边端分布式诊断与云端结合随机矩阵进行集中式分析,能够显著地降低模型对配电网物联信息的依赖程度,进而提升模型的鲁棒性和通用性。

由于配电网的可再生能源渗透率不断提高配电网运行的随机性增强,如何提高故障检测模型的鲁棒性,需要给予更多关注。

上述这些基于数据驱动的透明化应用技术需要定期更新数据集来更新模型,以此适应低压配电网系统的变化,保证模型的准确性。这些技术的发展和推广需要海量台区数据的支撑,而海量台区数据的调用流程繁琐以及管理混乱是目前的主要障碍,为此需要开发统合全台区数据管理的中心数据平台,为相应的透明化应用提供数据接口,以此提升数据管理水平以及简化数据申请流程。

另外随着边缘计算技术的发展,低压台区透明化应用将更加集中于用户侧进行,海量的台区数据和透明化应用分析结果引发了信息安全方面的挑战,加强台区的信息安全防护,是确保新型数据驱动技术应用免受网络黑客攻击威胁的关键。

2 低压台区透明化的关键任务

明确台区透明化中的具体工作内容与现阶段需要解决的问题,对于促进台区透明化建设具有重要意义。低压透明台区整体架构由感知层、下通信层、边缘层、上通信层、平台层和应用层组成,形成一个双向信息流动的结构,如图1所示。

图1中的透明台区控制中心会根据实际业务需求与当地系统运维计划配备所需的平台业务系统。低压台区透明化的本质是实现低压配电网的可观可测与态势预测^[5]。首先实现数据透明,如南方电网首个透明化示范台区^[43]所示,感知层获取台区运行数据,通过计量系统记录和归纳分类台区信息,将数据信息通过下通信层传输至边缘层,边缘层进行数据处理和分析后通过上通信层将这些信息传输到作为平台层的数字中心平台存储起来,实现数据的随时可观可测;然后是状态透明,基于数据透明,应用层进行拓扑辨识实现拓扑透明化,进行设备状态监测实现设备状态透明化,对运行数据进行分析监测台区电力系统运行状态实现系统状态透明化;最终是态势透明,应用层基于状态透明,利用大数据技术分析平台层的数据,对设备和系统未来运行

状态进行预测。

结合上述研究梳理可知,要实现数据透明,目前需要进一步优化传感网络的覆盖,提升电力设备与传感器的数字化融合水平;将碳计量引入低压配电网,构建电碳计量体系,实现电碳数据全透明感知。实现状态透明需打破异质设备数据交互壁垒,构建多模异构通信系统完善接口,并推广新型透明化应用,构建全系统中心数据平台,加强信息安全保护,确保数据稳定支撑。实现态势透明则需要基于上述数据透明与状态透明的结果进一步强化系统对源荷的未来预测。

2.1 完善全域传感网络

将大量的智能传感器布置在不同位置并通过同一通信系统互相协调工作,组成传感网络,可带来传感、互通和驱动的高性能^[10]。台区透明化旨在依托低压配电物联网,进一步完善并强化其感知能力,具体而言,即增强感知范围的覆盖广度与传感设备的持久工作能力,以构建一个覆盖全域的高效能传感网络。

目前我国低压台区传感网络存在区域覆盖率低、感知节点分布不均匀和区域设备冗余等问题,这些问题一直困扰着低压用电管理,并制约了新型

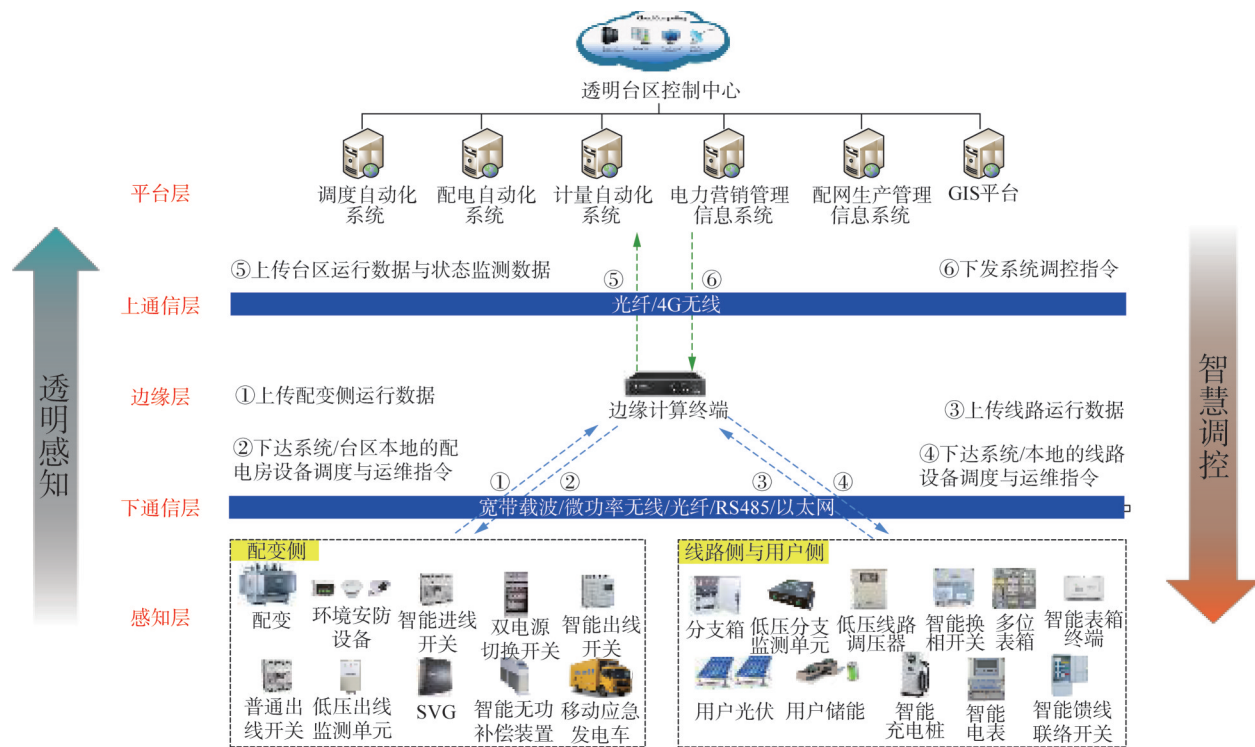


图1 低压透明台区信息流动模式

Fig. 1 Information flow mode in low-voltage transparent substation

电力系统用户侧数字化建设与发展。低压配电网节点众多,全部节点配置传感设备来提升感知覆盖范围将需要巨大的成本,而且将使得设备的维护和故障检修工作量大幅提升,为此,需要利用数字化电力设备技术将感知设备与电力设备集成,实现设备虚拟映射,提升电力设备的数字化水平,以此降低传感网络建设成本和提升设备感知深度。此外需要根据台区的网架结构,进行传感设备配置覆盖优化^[44]。但是,现有的覆盖优化方法依赖于具体的网络结构,需要在网络结构完全清晰的基础上开展。所以还需要研究不需要全部网络结构信息的传感网络节点覆盖优化方法,且要考虑网络结构信息不完全准确的情况。

低压台区传感网络的覆盖优化及应用需以明确的台区拓扑结构为基础,通过解析拓扑结构,探究各节点与支路间的关联,进而深入分析各测量点数据的内在联系,将点与线的感知拓展至全域感知,因此需要推广拓扑辨识自动化技术,实时反馈台区结构,为全域感知应用提供有效支撑。

另外,由于传感网络中有大量的传感单元需要供能,其整体的供能将给透明台区带来较大负担。鉴于压电能量收集器在湿度和磨损方面具有稳定性,并且能够提供相对较高的输出电压,因此能够满足大多数传感单元的自供电应用需求^[45]。摩擦电纳米发电机已被用于收集风能和其他摩擦产生能源,其成本低、效率高和制造工艺简单等特点使其成为一种极具应用价值的能量收集设备^[46]。

2.2 构建电碳计量体系

为助力“双碳”目标的推进,碳排放计量是一项相当重要的任务。统一和规范的碳计量体系对于引导企业发电和用户放电具有重要意义^[47]。

现在常用的碳计量方法主要还是基于源侧的平均碳排放因子法,该方法无法考虑电量交易行为中的碳排放责任转移且难以确保其计算精确性^[48]。

目前低压配电电力物联网的建设往往只考虑了电计量系统,无法满足上述碳排放计量的要求。使用碳流理论^[49]进行碳计量可以有效获取全网碳排放流数据,碳流透明可以提升用户的间接碳排放责任计算的准确性。碳流被构想为一种虚拟潮流,它明确了电网中每条支路电力潮流与碳排放之间的对应关系,通过台区各线路和节点的数据,本文可以计算出电力潮流,并据此推导出碳排放流。

为了确保碳计量的准确性,实现碳排放责任的公平分摊,需要做好两个方面:1)对电表的状态进行评估,深度学习技术在智能电表缺陷检测中的应用设计可以有效判断电表运行状态^[29],及时发现异常电表并进行处理。2)优化电计量方法^[26],机器学习算法在电力状态估计中的应用可以对电表的测量数据进行误差补偿^[27],降低用户用电数据测量误差带来的影响。

目前智能电表已广泛部署于低压台区,但碳表的研究还处于初级阶段。为推进低压台区透明化,需要开展碳计量核心器件和校准设备的研制^[47],深入发展智能碳排放计量技术,推动电碳计量全套装置系统落地,使各节点的电碳计量数据能被电网和用户实时查询,实现台区的电碳数据透明化。

2.3 建设多模通信系统

目前在低压台区中广泛应用的载波通信技术非常依赖线路的正常运行,在线路故障时容易造成信息漏报,导致数据缺失,影响台区运行。尽管目前蓝牙和RS485等通信技术也在低压台区得到使用,但这些不同类型的通信方法往往各自为营,缺乏协调互补的运行机制^[10]。而多模异构通信系统在低压台区中能够实现传感网络与智能装备集群间的互联互通,通过融合窄带载波与微功率无线技术,提升通信的可靠性和稳定性^[2-3]。

针对低压透明台区内的众多设备需根据其应用场景及功能需求,量身定制通信方法,对多种类型的通信协议建立统一的服务接口,使得不同类型通信方法传输间的内容得到统一解析,实现多类型通信技术的兼容。其次,利用统一服务接口实现对全局通信方案的协调控制,一旦某设备的主要通信手段发生故障,将立即启用其备用通信技术,以确保信息的及时报告,实现多通信方案的互补协调,有效提升台区信息互通互联的稳定性和可靠性。

另外,5G技术由于成本较高,目前尚难以在台区中大量应用。为此,可在关键区域使用5G通信,使其作为多模异构通信系统的组成部分,为整体通信系统提供有力支撑,不仅可以增强通信系统应对风险的能力,也有利于透明台区发展通信需求更高的新业务。

2.4 开发中心数据平台

为了处理海量数据和有序管理系统,需要一个具备数字化监控能力的平台,具有超高性能的计算

能力、完整的设备控制接口和对数据资源处理的云边协同机制^[5]，其整体架构如图2所示。

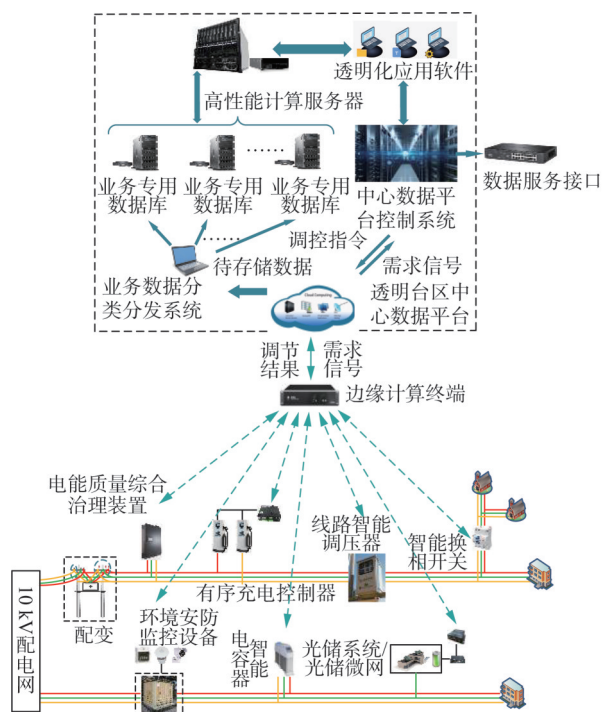


图2 低压透明台区中心平台

Fig. 2 Central platform of the low-voltage transparent platform area

透明台区将在电力物联网的基础上建设更多不同区域的传感网络，产生更多的数据，实现不同区域间的交互是台区全面透明化的一个重要体现，因此需要开发一个中心平台，将不同的透明台区协同管理。

为有效处理海量数据，需以智能设备为主的边缘侧与以数据服务器为主的云侧进行协调工作，既提升计算效率，也减轻了系统运行负担，为此，边缘计算技术已经广泛应用于低压配电网中^[10]。区域内的所有边缘计算系统可以看作一个数据计算平台，在完成计算任务后分别上传至云端数据平台，后者负责监测区域运行状况和梳理区域数据信息，利用这些区域信息完成台区的各种应用计算，并对边缘终端发布控制指令，边缘终端根据指令制定相应的台区控制方案，实现对端设备的控制。

中心数据平台作为对边缘计算端统一管理，需定期整合数据，对边缘计算端侧的计算模型进行评估与更新，以实现台区态势的透明感知。由于台区新能源渗透率不断提高，需要提升新能源预测的

准确性来应对态势透明感知方面的挑战。新型大数据技术在可再生能源预测中的应用，能够充分利用各类可观测数据，通过多源异构数据的汇聚与融合，以及数据预处理和特征工程，为态势感知提供坚实的数据平台保障。这些技术不仅契合了可再生能源预测的需求，还通过机器学习算法和数据挖掘技术，提高了预测的准确性和实时性，是值得深入研究和推广的关键技术。

此外，中心数据平台需要提供对外服务接口，实现数据透明化对电网业务的支撑，因此数据可视化是其基本要求。为了满足不同群体的需求，开发多种类型的数据可视化系统显得尤为重要。例如，对于电力用户使用考虑用户偏好的可视化系统，对于领域专家则使用领域知识指导的可视化系统等。

作为透明台区的核心枢纽，中心数据平台通过数据融合技术应对海量数据带来的存储和分析挑战。例如，国网上海市电力公司申请的“一种基于营配数据融合的台区画像精准刻画方法”专利^[50]展示了数据融合在电力行业中的应用，通过多源数据的整合实现对电力台区运行状态的全面把控和优化管理。类似地，煤矿井下多源异构数据融合的矿压智能监控方法，以及移动台定位和自动驾驶车辆中的数据融合技术，都强调了数据融合在提高管理效率和服务质量方面的重要性。因此，中心数据平台不仅需要开发设备监测与控制系统、计量查询系统、故障定位系统和源荷预测系统等软件，还要确保这些系统能够高效地处理和分析融合后的数据。

2.5 筑立信息安全屏障

数字化为低压配电网赋予了新的发展动力，同时也带来了许多网络信息安全问题，网络安全系统是用户用电安全的重要保障^[51]，构建多维立体的信息安全体系^[2]是台区透明化的关键任务之一。

透明台区需要考虑的安全体系防护内容包括设备层面、应用层面和管理层面。设备层面，需应用多种防火墙等安全技术以保障主机与终端的安全，并配置相应的安全监测系统，以便对设备安全问题做出迅速响应；应用层面，应结合身份验证技术实施数据分类授权，依据用户权限设定不同数据访问级别，并可采用加密技术对数据传输进行保护；管理层面，应强化数据流动的记录管理，清晰界定数据转移流程，并确保及时进行数据备份等工作。

在加强系统自身的安全防护外，对外界的网络

攻击等行为进行检测有利于提前预防网络信息安全问题。例如利用深度学习技术可以识别对物联网系统网络的攻击行为^[52]。

3 低压台区透明化的关键技术

通过前文对现有研究的梳理,以及对关键任务进行分析可知,为了更有效地降低感知成本并提升感知深度,提升电力设备的数字化水平及应用数字化电力设备技术显得尤为重要;为弥补当前计量体系的不足,助力“双碳”目标的推进,引入智能碳排放计量技术具有重要意义;为推进全域传感网络的完善以及透明化应用的深入发展,需要提供清晰的台区拓扑结构,拓扑辨识自动化技术是解决上述问题的关键;为应对高渗透率带来的影响,完善中心数据平台的功能开发,保障态势透明的准确性,需要对可再生能源预测技术进行深入研究;为充分发挥透明化的作用,协调和支撑上述各技术的应用,采用数字化画像技术是必需的。为此,本节将分析现阶段建设透明台区的关键技术。

3.1 数字化电力设备技术

在建设新型电力系统的趋势下,台区的可再生能源增加带来的系统波动和电能质量问题给电力设备的运行维护带来很大的挑战^[1]。

数字化电力设备技术在传统电力设备的基础上将全景感知和数据分析、人工智能等新兴IT技术集成于其中,生成高精度数字孪生实体,可以实现设备物理层和数字层的深度交互^[53]。

数字化电力设备技术的应用包括以下4个主要步骤:首先是设备的硬件拓展,将智能传感硬件、数据存储硬件、通信模块和计算硬件集成于低压台区中常用的重要电力设备;接着是设计计算应用,将分析感知数据的计算应用集成于电力设备中;然后是设计通信系统,开发基于多模异构通信系统下统一通信协议的通信系统;最后是在云服务器主机上开发对应的数字孪生系统。首先是设备的硬件拓展,将智能传感硬件、数据存储硬件、通信模块和计算硬件集成于低压台区中常用的重要电力设备,并确保不同硬件模块间能够协调运行;然后是设计计算应用,将分析感知数据的计算应用集成于电力设备中,使其除了自身电气功能外还具备了新的数据计算能力;接着是设计通信系统,根据设备用途与所处环境开发基于多模异构通信系统下统一通信

协议的通信系统,能够将数据实时准确地发送到其他设备与云服务器主机上;最后是在云服务器主机上开发对应的数字孪生系统,将设备上传信息进行可视化建模,在中心数据平台上构建设备和环境的虚拟物理模型。

数字化电力设备技术,作为边缘计算技术和数字孪生计算在电力设备上的拓展与融合,旨在通过增强电力设备在低压台区中的自我感知能力,实现对状态和环境信息的实时监控。这种技术的应用不仅能够节约额外安装传感设备的成本,还能使透明台区的传感网络更加精简和高效,从而达到节能减排的效果。

3.2 智能碳排放计量技术

通过碳排放引导用户节约用电是推进“双碳”目标以及促进我国节能减排的重要途径。然而,目前我国的碳排放责任分摊机制尚未健全,难以准确和公平地计量用户用电的碳排放。基于碳流理论的碳计量技术能够充分利用低压侧运行数据,提升碳计量的准确性和公平性,这对于实现碳排放责任的合理分摊至关重要。

文献[54]提出了一种基于碳流理论的碳表计量系统,该系统通过电力系统潮流计算应用于碳排放流迭代算法中,具有优良的收敛性和计算效率。这一方法不仅能够准确计算出用户的碳排放量,而且与文献[1]中提到的图模型优化研究相呼应,后者也强调了图数据库和图算法在电力系统碳流计算中的应用。此外,参考资料4中基于碳排放流理论的源荷双侧碳排放计量分摊方法,进一步强调了电力系统中碳排放责任分摊的重要性,与原文中提到的碳排放流迭代算法相辅相成。

在透明台区中使用源-网-荷协同碳流计算碳计量方法,主要在于以下4个步骤:1)在台区变压器出线侧安装变电站网侧碳表数据接收器,获取当前支路的碳流密度,据此根据出线有功功率计算当前线路碳排放流信息。2)在台区各分支线上安装网侧碳表,结合台区变压器发送来的碳流信息,基于台区实时潮流计算信息,计算当前支路的碳排放量,并与附加支路计算结果进行交互迭代,进一步提升计算的精确度。3)在低压台区的用户节点安装荷侧碳表,使用相连支路上安装的网侧碳表计算数据,结合用户用电量计算用户用电碳排放量,对该数据进行累计统计和实时更新,并及时上传信息至区域

数据平台。4)区域数据平台整合全部碳表数据,结合电力网络数据和电表计量数据对碳计量结果进一步计算验证。

在低压台区中引入电碳表和碳计量体系,结合新型动态电能计量技术^[26]和电能计量结果的误差补偿方法^[27],构建高精度电碳计量体系,是我国在低压配电网领域推进低碳转型的关键步骤。

3.3 拓扑辨识智能化技术

拓扑辨识工作是透明台区实现状态透明的重要内容,而且完善全域传感网络和构建电碳计量系统的工作都需要基于准确完整的台区拓扑数据。此外,自动拓扑辨识技术不仅有助于提升台区运维管理的效率,还能带动台区其他业务的协同发展^[35]。

信号驱动类方法虽识别范围有限,大面积推广需增设较多设备,但其识别结果高度准确;数据驱动类方法不仅需要获取大量历史数据,而且难以确保结果完全准确^[55]。为弥补两者的不足,可以考虑将两者结合起来使用,在结构较为复杂的关键区域使用信号驱动类方法,其他区域使用数据驱动类方法,并将两者的结果结合起来进行互相验证,能够实现自动拓扑辨识成本降低与准确率提高的效果。

对于信号驱动类方法,通过结合数字化电力设备技术将信号注入和信号发生设备集成于电力设备中,可以精简信号收发装置以及提高相关设备运维水平。对于数据驱动类方法,开发基于生成式神经网络的模型,可以减少对历史数据的依赖,是目前重要研究方向^[37]。

3.4 可再生能源预测技术

对可再生能源的高效精准预测有助于减轻其波动性带来的影响^[56]。通过将台区运行数据与天气数据结合,利用数据的特征工程构建模型对可再生能源未来出力进行预测,是实现低压台区态势透明感知的必需环节。

通常认为可再生能源预测技术本质上是时间序列模型的构建技术,物理建模过程复杂且参数难以准确估计,时间序列拟合法在面对非线性因素和高维特征时显得力不从心,随着以数据驱动为主的人工智能技术不断发展,越来越多的人工智能模型被应用到可再生能源预测中^[56],为进一步提升可再生能源预测技术的准确性提供了新思路。利用物理模型结果对数据驱动模型的结果进行评估,提升预测结果的可靠性,同时利用数据驱动模型结果对物理

模型进行参数更新,降低未来预测误差。

此外,还可以构建多时间尺度组合的可再生能源预测模型,利用不同时间尺度模型预测特性收缩误差范围,与中心平台调控结合,将可再生能源的消纳调度多时间尺度化,使得态势感知结果对低压台区调度控制指导更加精细,进一步提升台区应对风险变化的能力。

随着低压配电网的不断发展和更新,叠加天气动态变化对可再生能源出力预测的影响,开发具备在线学习功能的可再生能源预测技术,对于构建透明台区而言,具有至关重要的意义。

3.5 台区数字化画像技术

基于透明化技术的应用,大量的计量数据和智能终端、传感采集的数据,可以为台区的运行、运维、规划、建设提供更高效率的支撑手段。为此数字化画像技术变得十分重要,其具体功能架构示意图如图3所示。

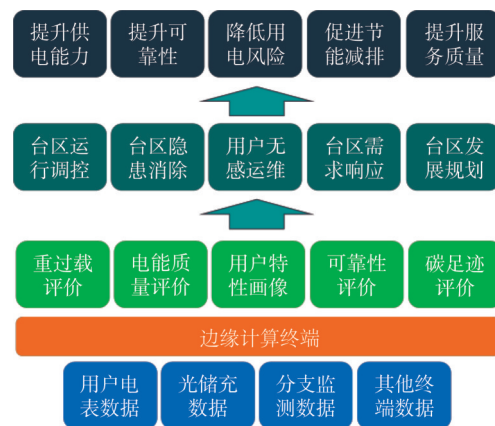


图3 透明台区画像功能架构

Fig. 3 Functional architecture of transparent substation area portrait

边缘计算终端利用采集的数据,进行重过载评价、电能质量评价、可靠性评价和碳足迹评价,进而支撑实现台区运行调控、台区隐患消除、用户无感运维、台区需求响应和台区发展规划,从而实现供电能力、可靠性和服务质量的提升,以及降低用户用电风险和促进节能减排。

4 未来展望

4.1 数据交易平台

低压透明台区依靠全域传感网络将获得海量数据,如何将这些台区的数据转化成实际利益,以充

分发挥数据的价值,是透明台区实现增量价值的重要任务。

建立透明台区的数据交易平台是未来的必然趋势,依靠数据交易平台,划分数据使用权限,给不同需求的企业提供相应数据与服务,不仅增加电网企业的收入,也有利于其他行业的企业发展,助力社会经济发展。

区块链技术所具有的去中心化特性,使得交易行为由不透明转为透明^[57],提升了交易的可靠性与安全性。

构建基于区块链技术的数据交易平台,首先,要加强透明台区端侧数据流动的监管,对含强隐私性数据的设备传输限制为单向流动至中心平台;其次,数据交易平台应该以私有链作为网络拓扑结构,以电网公司选择的服务器作为中心交易平台,只有进行了身份识别的用户可以加入;然后,用户通过身份识别划分权限等级,不同权限等级的用户可以参与不同隐私级别的透明台区数据交易;接着,数据交易完成后自动生成智能合约并记录交易行为,由于数据隐私性问题,可被所有用户查询的交易记录不会记录交易中具体数据项,该部分内容通过写入智能合约中,只有相应权限用户可以查询;最后,对于交易后无法一次性下载调用的数据,利用代理重新加密方案存储于去中心化服务器中,通过用户身份识别进行访问控制。

区块链技术在数据交易平台上应用,如贵阳大数据交易所区块链中台,不仅实现了数据商认证信息、产品发行信息等信息上链,还覆盖了政务数据授权运营、流通共享等服务内容,确保了交易行为的隐私性与数据的隐私性。同时,欧科云链的链上数据分析与市场动态数据监控平台“链上天眼”等案例,展示了区块链技术在保障交易透明性与数据安全方面的实际应用,为挖掘和发挥海量感知数据的价值提供了有效途径。

4.2 交通网络耦合

电动汽车的大量增加使得台区中越来越多的充电桩接入,实现电网与交通网的耦合,构建“充电网”,是统筹充电桩规划和管理的重要任务。

透明台区与交通网络的耦合主要可以体现在以下几个方面:1)设施共享。电动汽车充电桩是透明台区与交通网络直接共享的设备,是耦合两者的直接因素,除此之外,通信设施也可以发挥共享作

用,例如5G基站和无线路由等设备共享共用,既可以节约设施建设成本,也能实现通信系统的耦合,促进两者信息交互。2)数据共享。建立专用共享数据库,透明台区可以调取交通流量数据,分析相应充电桩的充电特性和用户出行特性,能够为负荷预测、故障识别和拓扑辨识等工作提供更多的数据支撑,提高业务能力水平;交通网络通过调取台区运行数据,获取用户用电特性及节点运行特性分析结果,有利于把握居民需求,制定更加切合实际需求的交通管理计划,有利于提高交通网络的运行维护水平。3)联合规划。将透明台区与交通网络的规划统一起来,能够优化充电桩布局,改善交通流量状况,降低充电成本,同时提升电网与交通网的安全性,进而实现更大的经济效益与社会效益^[58]。构建交通-配网动态耦合规划模型,选取用户充电满意度、用户出行满意度与车网系统运营成本为优化目标;以储能配置、充电桩选址和道路选线为决策变量;利用交通网络和电网拓扑信息得到新增道路区域约束、车辆运行路径集合约束、充电桩选址节点集合约束和电力潮流约束;使用动态交通流分配问题中的动态网络加载模型描述车辆流动,形成车辆流量变化约束。可以充分考虑交通流量需求和车辆的动态时空分布特性,提升规划结果对现实情况的适应性。

“充电网”将建立起两网耦合的新型商业模式和市场机制,为电网企业和交通运营商带来新的收益模式,为电动汽车用户提供新的增量价值。

4.3 电-碳-氢市场

透明电网依靠完善的碳计量体系可以实现公平可靠的用户碳排放责任分摊,将全面创新碳配额机制和碳交易市场模式。透明电碳数据详尽记录了各节点的用电需求及其伴随的碳排放情况,经由与其他透明电网数据的融合分析,能够深刻揭示电力流动与碳足迹的内在联系,为电碳市场的稳健构建奠定坚实基础,同时也为电力用户开辟了更广阔的参与空间与机遇。

氢能高效且适合长期储运,有利于解决新能源渗透率提高所带来的随机性与波动性问题^[59],对建设低碳新型用电系统具有重要意义^[60]。

在透明台区中引入氢能,构建电-碳-氢市场,丰富能源市场的参与主体与交易类型,将全面创新电碳耦合市场机制,为台区减碳服务提供新途径,

推动透明台区朝着近零碳的方向不断发展。

电-碳-氢市场由于多类型主体的参与,使得更多类型数据能够发挥市场价值。市场参与者通过购买透明台区的态势透明数据能够判断后续时段中相应可再生能源出力变化趋势,从而提前进行产品购入,也可以为能源产品挂牌交易价格制定提供参考。这将产生市场参与者与数据交易者之间的博弈,具有高预算的参与者有更多机会获取数据因而具有更高利润,如何平衡市场参与者之间的竞争公平性将是需要解决的问题。此外,透明台区依靠电碳计量体系能够合理实施碳排放成本分摊,氢能市场的融入,让市场参与者得以依据氢能价格动态,预测碳排放权价格走势,并探索氢能作为碳排放权替代品的可能性,因此市场参与者能够制定更合理的碳排放权交易计划,这将吸引更多碳排放主体参与进来,也促进碳市场中碳远期、碳期货等新产品的出现。

电-碳-氢市场是配电系统充分发挥减碳效益和市场经济价值的重要平台,通过激发多主体的降碳潜力,为我国的“双碳”目标的实现提供市场保障和强劲动力。

5 结语

“双碳”背景下建设新型电力系统的目标给电力能源领域带来了全新的机遇与挑战,对当前电力系统的形态进行升级转变已是迫切需求。低压配电网作为其中重要的组成部分,台区透明化建设是其提升电网整体运行水平、消纳海量新能源和参与建设新型电碳市场的必经途径。

台区透明化是一个升维过程,通过给低压用户提供新体验和满足利益诉求,实现电网-用户黏性关系的升维;通过使用配电网大数据进行管理、运维、交易和发展,实现用电大数据量和价值的升维;通过深度融合物联网技术和IT技术,开创新型商业模式,实现电网企业兼容互联网企业属性的升维。未来,随着纳米材料与复合材料的广泛应用,新型电力设备将不断涌现;同时,革命性的互联网技术和大数据技术将持续创新,推动行业发展。

面对用户需求的多元化以及市场行为的复杂化所带来的挑战,透明台区将展现出卓越的可扩展性和可创新性,随着未来电-碳-氢耦合市场的建成,还有许多全新发展潜力值得挖掘与期待。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 张勇军,羿应棋,李立涅,等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化,2022,46(22):1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [3] 张勇军,刘斯亮,江金群,等.低压智能配电网技术研究综述[J].广东电力,2019,32(1):1-12.
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research Review on Low-voltage Intelligent Distribution Network Technology [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [4] 梁明光,林文浩,李蓓.低压透明配电网主动抢修技术的研究与应用[J].中国设备工程,2022(15):256-258.
LIANG Mingguang, LIN Wenhao, LI Bei. Research and application of active repair technology for low voltage transparent distribution network [J]. China Plant Engineering, 2022(15): 256-258.
- [5] 李立涅,蔡泽祥,唐文虎,等.透明电网理论框架与关键技术[J].中国工程科学,2022,24(4):32-43.
LI Licheng, CAI Zexiang, TANG Wenhao, et al. Theoretical framework and key technologies of transparent power grid [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 32-43.
- [6] 武汉大学报社.电力樱花论坛研讨电工程学科前沿与交叉问题[EB/OL].(2017-06-16).http://oldnews.whu.edu.cn/info/1002/48951.htm.
- [7] MEDJROUBI W, MÜLLER P U, SCHARF M, et al. Open data in power grid modelling: new approaches towards transparent grid models [J]. Energy Reports, 2017(12): 3-13.
- [8] 陈文,尤毅,胡春潮,等.低压配电网透明化及智能化运维关键技术与实践[J].电力设备管理,2022(6):17-19.
CHEN Wen, YOU Yi, HU Chunchao, et al. Key technology and practice of transparent and intelligent operation and maintenance of low voltage distribution network [J]. Electric Power Equipment Management, 2022(6): 17-19.
- [9] 郑雅文,李巍,易启淋,等.基于多元数据特征的低压配电网线户关系识别[J].南方电网技术,2024,18(5):124-134.
ZHENG Yawen, LI Wei, YI Qilin, et al. Identification method of feeder-consumer connectivity in low-voltage distribution network based on multivariate data feature [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 124-134.
- [10] 李钦豪,张勇军,陈佳琦,等.泛在电力物联网发展形态与挑战[J].电力系统自动化,2020,44(1):13-22.
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power Internet of Things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.
- [11] 孙浩飞,高坤,花啸昌,等.基于路径时间差的变压器局部放电超声定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(3):100-107.
SUN Haofei, GAO Kun, HUA Xiaochang, et al. Ultrasonic

- positioning method of transformer partial discharge based on path time difference [J]. Smart Power, 2022, 50(3): 100 – 107.
- [12] 宋子豪. 基于硫化钨复合材料的氢气和乙炔气体传感器检测特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
- [13] 李贤良, 唐毅博, 詹江杨, 等. 光纤光栅传感器在变压器多参量智能监测中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 154 – 160.
- LI Xianliang, TANG Yibo, ZHAN Jiangyang, et al. Application of a fiber bragg grating sensor in multi parameter intelligent monitoring of a transformer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 154 – 160.
- [14] 王渊. 基于光子晶体光纤气室与光热光谱法的变压器油中溶解乙炔直接检测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2023.
- [15] CONG D P, RAISON B, ROGNON J P, et al. Optimization of fault passage indicators placement with dispersed generation insertion[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. IEEE, June 19 – 21, 2007, Tampa, FL, USA. New York: IEEE, 2007:391 – 401.
- [16] STEFANIDOU-VOZIKI P, SAPOUNTZOGLU N, RAISON B, et al. A review of fault location and classification methods in distribution grids[J]. Electric Power Systems Research, 2022(209):110 – 121.
- [17] 刘健. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京:中国电力出版社, 2012.
- [18] MORA-FLÓREZ J, MELÉNDEZ J, CARRILLO-CAICEDO G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 78(4):657 – 666.
- [19] HART G W. Nonintrusive appliance load monitoring [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870 – 1891.
- [20] HUONG T T L, HYOEUN K, HOWON K. Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree[J]. IEEE Access, 2020(8): 55937 – 55952.
- [21] BONFIGLI R, PRINCIPI E, FAGIANI M, et al. Non-intrusive load monitoring by using active and reactive power in additive factorial hidden Markov models [J]. Applied Energy, 2017(208):1590 – 1607.
- [22] 何恒靖, 王灏, 肖勇, 等. 基于Bi-LSTM算法的非侵入式负荷监测模型[J]. 南方电网技术, 2019, 13(2): 20 – 26.
- HE Hengjing, WANG Hao, XIAO Yong, et al. Non-intrusive load monitoring model based on Bi-LSTM algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2): 20 – 26.
- [23] KELLY J, KNOTTENBELT J W. Neural NILM: deep neural networks applied to energy disaggregation. [J]. CoRR, 2015, abs/1507.06594.
- [24] 邸志刚, 陈佳旗, 贾春荣, 等. 基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 228 – 237.
- DI Zhigang, CHEN Jiaqi, JIA Chunron, et al. Design on fiber optical current transformer based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 228 – 237.
- [25] 杨庆, 董恒, 陈少卿, 等. 基于一次电光效应的非接触式过电压监测传感器[J]. 高电压技术, 2015(1): 140 – 145.
- YANG Qing, DONG Heng, CHEN Shaoqing, et al. Non-contact overvoltage monitoring sensor based on electro-optic effect [J]. High Voltage Engineering, 2015(1): 140 – 145.
- [26] 邵方静, 宋晓林, 刘坚, 等. 动态电能计量算法研究综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 1 – 10.
- SHAO Fangjing, SONG Xiaolin, LIU Jian, et al. A review on dynamic energy metering algorithms [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 1 – 10.
- [27] 马吴燕, 李叶飞, 张涛, 等. 谐波干扰下共享电源计量装置运行误差预补偿方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 188 – 191, 211.
- MA Haoyan, LI Yefei, ZHANG Tao, et al. Pre-compensation method for operation error of shared power metering device under harmonic interference [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(10): 188 – 191, 211.
- [28] 张鼎衢, 林国营, 宋强, 等. 基于灰色理论及模糊层次分析法的电能计量装置状态评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 134 – 139, 152.
- ZHANG Dingqu, LIN Guoying, SONG Qiang, et al. State assessment of electric energy metering device based on grey theory and fuzzy analytic hierarchy process [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 134 – 139, 152.
- [29] 吴瀛, 陈崇明, 姚栋方. 基于决策树算法的关口计量装置运行状态评估[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 183 – 189.
- WU Ying, CHEN Chongming, YAO Dongfang. Operating state evolution of gateway metering device based on decision tree algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 183 – 189.
- [30] 黄瑞, 肖宇, 曾伟杰, 等. 低压配电网HPLC通信信道特征分类研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 1 – 7.
- HUANG Rui, XIAO Yu, ZENG Weijie, et al. Research on characteristic classification of the communication channel of the low voltage distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 1 – 7.
- [31] 崔莹. 基于改进遗传蚁群算法的低压PLC网络路由方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 210 – 217.
- CUI Ying. Low-voltage PLC network routing method based on improved genetic ant colony algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 210 – 217.
- [32] 李蕊, 丁宁, 史鹏博, 等. 低压配电网电力线载波通信脉冲噪声过滤系统[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(9): 77 – 79, 87.
- LI Rui, DING Ning, SHI Pengbo, et al. Impulse noise filtering system for power line carrier communication in low-voltage distribution network [J]. Microcomputer Applications, 2021, 37(9): 77 – 79, 87.
- [33] 黄彦钦, 余浩, 尹钧毅, 等. 电力物联网数据传输方案:现状与基于5G技术的展望[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3581 – 3593.
- HUANG Yanqin, YU Hao, YIN Junyi, et al. Data transmission schemes of power Internet of Things: present and outlook based on 5G technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3581 – 3593.
- [34] 郁海彬, 董烨, 翁锦德, 等. 电力5G切片在城市配电网中的应用及经济效益研究[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(1): 75 – 83.
- YU Haibin, DONG Ye, WENG Jinde, et al. Research on the application and economic benefits of 5G slice in the urban distribution network [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(1): 75 – 83.
- [35] 王日宁, 武一, 魏浩铭, 等. 基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 83 – 89.
- WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology

- identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83 – 89.
- [36] 杨秀, 蒋家富, 刘方, 等. 基于注意力机制和卷积神经网络的配电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1672 – 1682. YANG Xiu, JIANG Jiafu, LIU Fang, et al. Distribution network topology identification based on attention mechanism and convolutional neural network [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1672 – 1682.
- [37] 邵晨颖, 刘友波, 邵安海, 等. 基于生成对抗网络与局部电流相量的配电网拓扑鲁棒辨识[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 55 – 62. SHAO Chenying, LIU Youbo, SHAO Anhai, et al. Robust identification for distribution network topology based on generative adversarial network and partial current phasor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 55 – 62.
- [38] ZHENG Z, YANG Y, NIU X, et al. Wide and deep convolutional neural networks for electricity-theft detection to secure smart grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1606 – 1615.
- [39] PUNMIYA R, CHOE S. Energy theft detection using gradient boosting theft detector with feature engineering-based preprocessing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2326 – 2329.
- [40] 孔祥玉, 马玉莹, 赵鑫, 等. 基于多阶段递推数据分析的低压台区窃电检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5921 – 5934. KONG Xiangyu, MA Yuying, ZHAO Xin, et al. Detection method of electric theft in low voltage station area based on multi-stage recursive data analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5921 – 5934.
- [41] XIONG Y, YAO W, CHEN W, et al. A data-driven approach for fault time determination and fault area location using random matrix theory [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020 (116): 105566.1 – 105566.10.
- [42] 李碧桓, 李知艺, 鞠平. 基于随机矩阵理论的低压配电网边-云协同故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 25 – 37. LI Bihuan, LI Zhiyi, JU Ping. An edge-cloud collaborative fault detection method for low-voltage distribution networks based on random matrix theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 25 – 37.
- [43] 广东电网揭阳供电局打造南方电网首个“透明化”示范台区低压实现“三透明”中压自愈率100%[EB/OL]. (2024 – 01 – 06). www.csg.cn/xwzx/2024/yxcz/202401/t20240116_338700.html.
- [44] 李光辉, 胡世红. 基于VF-CS的移动传感器网络覆盖优化算法[J]. 通信学报, 2018, 39(3): 95 – 107. LI Guanghui, HU Shihong. Coverage optimization algorithm based on VF-CS in mobile sensor network [J]. Journal on Communications, 2018, 39(3): 95 – 107.
- [45] KYU C J, CHANGYEON B, I A K, et al. Lead-free perovskite nanowire-employed piezopolymer for highly efficient flexible nanocomposite energy harvester [J]. Small, 2018, 14(19): 22 – 31.
- [46] HUANG L, XU W, BAI G, et al. Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator [J]. Nano Energy, 2016(30): 110 – 121.
- [47] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220 – 2236. LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220 – 2236.
- [48] 李姚旺, 刘昱良, 杨晓斌, 等. 计及电量交易信息的用电碳计量方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 439 – 451. LI Yaowang, LIU Yuliang, YANG Xiaobin, et al. Electricity carbon metering method considering electricity transaction information [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 439 – 451.
- [49] HOU R, REN G, ZHOU C, et al. Analysis and research on network security and privacy security in ubiquitous electricity Internet of Things [J]. Computer Communications, 2020(158): 64 – 72.
- [50] 国网上海市电力公司. 一种基于营配数据融合的台区画像精准刻画方法: 202411501898[P]. 2024 – 10 – 25.
- [51] HOU R, REN G, ZHOU C, et al. Analysis and research on network security and privacy security in ubiquitous electricity Internet of Things [J]. Computer Communications, 2020(158): 64 – 72.
- [52] ATIN A D, PAVLENKO E Y. Using the neat-hypercube mechanism to detect cyber attacks on IoT systems [J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2022, 55(8): 1111 – 1114.
- [53] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1765 – 1778. SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key Technologies and development trends of digital power equipment for new type power system [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765 – 1778.
- [54] 李业辉, 李姚旺, 刘昱良, 等. 基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(一): 理论方法与分析[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2165 – 2174. LI Yehui, LI Yaowang, LIU Yuliang, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow (i): theoretical method and analysis [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2165 – 2174.
- [55] 龙寰, 石子晴, 赵景涛, 等. 基于多标签分类与卷积神经网络的配电网拓扑辨识[J]. 高电压技术, 2023, 47(6): 2165 – 2174. LONG Huan, SHI Ziqing, ZHAO Jingtao, et al. Topology identification of distribution network based on multi-label classification and CNN [J]. High Voltage Engineering, 2023, 47(6): 2165 – 2174.
- [56] 王皓怀, 邓韦斯, 戴仲覆, 等. 面向新能源功率多时空尺度精确预测的机制创新与平台建设探索[J]. 南方电网技术, 2023, 17(2): 3 – 10. WANG Haohuai, DENG Weisi, DAI Zhongfu, et al. Mechanism innovation and platform construction for accurate prediction of new energy power at multiple temporal and spatial scales [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(2): 3 – 10.
- [57] 李姝, 赵培培, 于金刚, 等. 基于区块链的数据交易平台的研究与设计[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(5): 1109 – 1114.

(下转第 149 页 Continued on Page 149)