工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 7 卷◆第 9 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

边缘计算在配电网实时状态监测与自愈控制中的应用探索

陈振兴　樊官喜
北京京能清洁能源电力股份有限公司内蒙古分公司　内蒙古呼和浩特市

DOI:10.12238/ems.v7i9.15216

[摘　要] 电力系统的安全性及可靠性 受配电网稳定运行情况的显著影响。伴随智能电网逐步发展的阶段，传统集中式监测与控制模式已无法符合配电网对实时性和自愈能力的要求。边缘计算作为一种新兴的计算模式，采用在配电网侧安排计算节点的做法，实现数据分析和决策向数据源的靠近，因此能有效缩短数据传输的时延长度，带动系统响应速度的增长。本文研究了边缘计算在配电网实时状态监测与自愈控制这一应用场景，针对当前现存的技术挑战加以分析，且针对现存问题提出优化策略。研究表明，边缘计算能够有效提升配电网的监测精度和自愈能力，为智能电网的发展提供重要支撑。

[关键词] 边缘计算；配电网；实时状态监测；自愈控制；智能电网

引言：

配电网是电力系统的重要组成部分，其运行状态直接影响电能的稳定供应和终端用户的用电体验。传统的集中式监测和控制模式依靠的是云计算和远程数据中心，就算拥有较强的计算本领，不过存在数据传输出现延迟状况、带宽占用比例高、网络安全方面有隐患等情形，无法契合配电网在实时性与智能化方面的需求。跟随着智能电网技术的演进，属于新型计算模式范畴的边缘计算，可把计算和分析能力部署到临近数据源的边缘节点之上，从而增进配电网状态监测实时特性与自愈控制的响应速率。

一、边缘计算在配电网实时状态监测与自愈控制中的作用概述

随着智能电网的动态发展，实时状态监测与自愈控制被配电网赋予不断提高的要求。传统集中式数据处理模式借助云计算中心来开展信息分析与决策，即便有着强劲的运算能力，只是被数据传输时延、带宽占用及网络安全等问题所牵绊，无法契合配电网对高效实时响应方面的要求。边缘计算作为一种新兴的计算模式，将计算和数据处理能力下沉至靠近数据源的边缘设备，使配电网能够更快速、智能地完成状态监测与自愈控制。

从实时状态监测的角度而言，边缘计算可在本地针对电力设备运行数据进行采集与分析，诸如电压数值、电流强度、负荷波动状况等，防止数据传至远程云端造成的延迟与网络拥堵难题。这让配电网可实时对运行状态进行感知，及时探知配电网的异常状态，增强系统运行过程中的稳定性与可靠性。此外，边缘计算可借助分布式计算的模式，实现数据处理流程的优化，减轻集中式服务器面临的负载，带动数据分析效率的上扬。

在自愈控制方面，边缘计算能够通过本地计算能力快速响应故障，减少故障处理时间，提高配电网的智能化水平。例如，当配电网某一节点发生短路、过载或设备故障时，边缘计算节点可以根据本地数据和预设控制逻辑，迅速完成故障隔离、负荷调整等自愈操作，而无需等待远程云端的决策指令，从而显著提升故障恢复的速度，减少停电时间，提高供电可靠性。

此外，边缘计算还支持与人工智能、大数据分析之类的先进技术相融合，采用机器学习算法去分析电网相关历史数据，对设备可能发生的故障以及异常现象作出预测，预先进行优化方案实施，增进电网预测性维护的整体能力[1]。这种依托智能化手段实现的设备状态监测与自愈控制模式，对促使设备损坏率降低有积极意义，促使电力设备的使用寿期延长。边缘计算在配电网实时状态监测与自愈控制中发挥着关键作用，它不仅提升了数据处理的实时性和精准度，还优化了配电网的自愈能力，为智能电网的发展提供了强有力的技术支撑。未来，随着边缘计算技术的不断进步，其在智能配电网中的应用将更加深入，进一步推动电力系统向智能化、自动化方向发展。

二、配电网实时状态监测与自愈控制存在的问题

（一）计算资源受限与数据处理能力问题

当对配电网开展实时状态监测以及实施自愈控制的时

候，边缘计算节点往往是被布置在变电站、配电终端、智能电表等分布式设备之内，这些设备在计算资源、存储能力上以及能耗预算方面都相对有限，无法对复杂的数据处理及大规模计算任务提供支持。相比于云计算中心强大的处理能力，边缘计算节点往往采用嵌入式硬件或小型服务器，受限于处理器性能、内存容量与能耗相关要求，造成其在应对大数据分析、深度学习等计算密集型任务执行时面临困境。

此外，配电网运行状态数据体现出种类繁杂的特性，具备电压、电流、频率、谐波、电能质量等诸多维度，存在较高的数据更新频率，边缘计算节点需在计算资源有限的状况下达成高效数据处理与实时分析。可能传统的数据处理方法无法适应海量数据的动态变化，尤其是当多节点进行协同计算的时候，关键问题聚焦于计算负载均衡调度和资源优化配置的有效实施。

（二）设备互联性与数据融合复杂性挑战

配电网中所涉及的边缘计算设备类型多样，涉及有智能传感器、智能电表、分布式能源管理系统（DERMS）、配电自动化终端（DTU）和变电站智能控制设备等类别，往往不同厂商会把这些设备进行提供，采用彼此不同的通信协议与数据格式，未拥有统一的标准架构，导致设备互联跟数据融合陷入巨大挑战[2]。

此外，配电网实时状态监测关联到多源异构数据，若如电力负荷的数据情况、设备运行状态的数据情形、环境监测的数据状况等，从时间尺度、空间尺度、采样精度等方面看 这些数据存在差异。怎样做到对不同来源数据的高效融合，萃取出有价值的信息，堪称边缘计算所面临的一项突出技术挑战。

（三）网络安全与隐私保护问题

在边缘计算于配电网进行广泛应用的阶段，需在边缘设备之间传输大量的电力数据与控制指令，这让网络安全以及数据隐私保护变为重要挑战突显出来。跟传统的云计算架构相比对，边缘计算节点体现出广泛分布的属性，安全防护能力存在明显短板，很容易被黑客当作攻击的靶子。一旦边缘计算设备被恶意入侵，可能导致配电网运行状态被篡动、关键控制指令被非法挟持,甚至会引起大范围的电网运转故障。

此外，像用户用电行为、企业生产用电负荷等敏感信息包含在配电网的监测数据里,未经授权而进行的数据访问 也许会引发用户隐私泄露问题。常规的传统云计算模式多采用集中式安全防护体系开展工作，就边缘计算模式这种情形而言，多个设备分别分散进行数据处理与存储，安全管理变得更为错综复杂。

三、基于边缘计算的优化策略

（一）构建高效的边缘计算架构

在配电网实时状态的监测与自愈控制的进程里，提升数据处理效率、降低延迟、增强系统稳定性与构建高效边缘计算架构紧密相关。传统集中式云计算模式要把大量数据传输到云端开展处理工作，很容易受到网络带宽、时延及计算负载约束。边缘计算则依靠在靠近数据源的如智能变电站、配电自动化终端等边缘节点来开展实时处理，大幅削减数据传输占用的时间，实现响应速度的提升[3]。为达成高效边缘计算架构的实现目标，应当实施恰当的计算资源分配部署。可以采用云-边-端协同计算模式，在云端实施大数据的存储、历史状况分析及长期规划优化，边缘侧承担实时数据处理工作并做出故障自愈相关决策，把基础数据采集和简单计算的工作交由终端设备（如智能电表）完成。依靠任务动态分配与负载均衡的相关机制，可实现对计算资源利用率的有效优化，避免单个节点出现过载问题而引发计算瓶颈。

边缘计算架构需拥有良好的可扩展性以及兼容性。配电网而言智能设备的种类表现得十分繁多，数据通信协议显现出不统一情形，需采用标准化的通信协议（如 IEC 61850、OPC UA、MQTT）确保设备互联互通。此外，采用容器化和微服务架构，可增强边缘计算平台在动态环境下的灵活能力，从而让其可依据需求对计算能力进行动态扩展。高效的边缘计算架构应支持低功耗和高可靠性。鉴于边缘计算节点有着广泛分布的格局，部分设备说不定处于偏远的地带，由于供电条件有一定限制，由此需优化计算任务所产生的功耗，采用体现高效特质的调度算法，实现计算能耗跟处理能力的最理想平衡状态。同时，应增强设备的冗余设计和容错能力，实现配电网在单点故障发生时依旧保持稳定运行，依靠构建起高效的边缘计算架构，实时监测和智能自愈可在配电网中获得更好落实，增进电网安全性及运行的效率。

（二）融合人工智能算法提升智能化水平

在借助边缘计算生成的环境里，借助融合人工智能（AI）算法 配电网的智能化水平能大幅提升,赋予配电网更强悍的数据分析、故障诊断和优化控制本领。预设规则和专家经验是传统配电网监测和控制所凭借的依据，以历史数据和实时信息为基础 AI 技术能，自行进行规律挖掘，实现决策的动态性优化，强化系统的自主响应水平。AI 可以优化状态监测

与故障预测。采用包含 LSTM、CNN、随机森林等在内的机器学习及深度学习算法，边缘计算设备可对诸如电压、电流、负荷波动、故障信号等数据做实时分析，预测或许存在的异常现象。

在自愈控制方面，AI 可以增强故障定位和恢复策略。要是配电网出现故障之际,常规方法大多时候需人工加以干预，AI 可把电网拓扑、历史故障数据和实时状态融合在一起，迅速计算出最合理的故障隔离及恢复方案。例如，以强化学习算法（如 DQN）的采用可以训练智能代理，按照有差异的故障场景自动调整开关状态，实现电网恢复速度的最大化。此外，AI 还可以优化电力负荷预测与调度。负荷变化在配电网中表现出鲜明的时空特性，受时间、天气、用户行为等一系列因素左右。依靠 AI 算法达成目的，可准确预估不同区域的负荷需求水平，而能在边缘计算节点位置对供电策略进行动态性调整，助力能源利用效率的提升。例如，基于光伏、风电等分布式能源实施结合，依靠 AI 可以完成电力调度的优化，减少风电及光伏能源被搁置现象，实现新能源利用比例的增长。为实现 AI 技术更顺畅的融合，得在边缘计算节点对轻量级的 AI 模型予以部署，采用边缘 AI 推理优化（如 TensorRT、ONNX 等技术），降低计算负担。此外，可以采用联邦学习技术，引导多个边缘节点在本地对 AI 模型实施训练，且借助云端进行协同式优化，可实现数据隐私保护的提升，又可增强模型应对多样情况的泛化力。

（三）强化网络安全机制与隐私保护

伴随边缘计算于配电网中的普遍运用，网络安全跟隐私保护相关问题显著浮现。如果边缘设备受到恶意攻击抑或出现数据泄露，或许会对电网的运行产生影响，亦存在危及国家能源安全的潜在风险[4]。因此，应实施多层次的安全防护手段，实现配电网稳定安全运行这一目标。加强数据传输加密与身份认证。边缘计算设备之间的数据交互要求采用强加密技术，诸如 AES－256、RSA 之类的算法，使数据在传输过程中不被窃取与非法篡改现象侵扰。同时，可以采用基于区块链的身份认证机制,对所有接入的设备进行数字签名认证，防止非法设备接入配电网。

引入入侵检测与异常行为分析。鉴于边缘设备在数量上极为庞大，以往的安全防护手段也许不能实时查测到所有威胁。因此，可以部署基于 AI 的智能安全防护系统，借助机器学习算法对设备行为进行剖析,鉴别出异常的访问模式特征。此外，在隐私保护方面，采用数据去中心化和差分隐私技术。由于配电网牵扯到大量用户数据，诸如家庭用电所表现的情况、企业生产作业的用电负荷等，未经许可的数据访问 有很大概率造成用户隐私泄露。可以采用联邦学习，实现数据在本地边缘设备上开展训练进程，无需把数据传至云端，减少数据面临泄露状况的风险[5]。同时，引入差分隐私算法，在数据分析进程中添加噪声干扰，保证数据在统计层面呈现可用态势，却无法回溯到特定的个体。以云端作为统一的安全监控中心可行，把边缘计算节点实时防护策略进行结合，达成多层面的安全防御体系。例如，云端可定时把最新安全补丁以及防火墙规则推送到边缘设备，保证所有节点皆具备最新的安全防护水平。以对网络安全机制与隐私保护进行强化的手段，可切实减轻配电网面临的安全风险程度，保障边缘计算于实时状态监测及自愈控制进程中的平稳运转。

结论：

在智能电网深入发展的阶段，配电网对实时状态监测及自愈控制的需求呈不断增长趋势，传统的集中式监测与控制方式已经难以满足现代配电系统的需求。新兴的边缘计算属于一种计算模式,可在本地完成数据的处理与决策分析事宜，极大增进配电网响应的速度及自愈的能力。本文从分析边缘计算在配电网内的应用优势入手，点明了当前面临着计算资源受限、数据融合复杂状况、网络安全等一系列问题，进而针对性地提出了一系列优化策略，为提升配电网整体的智能化综合水平。

[参考文献]

[1]盛万兴，刘科研，李昭，等.新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J].高电压技术，2024，50（1）：1-18.

[2]张有全，陈盼，芦金雨.10 kV 开关站双环网自愈系统事故分析[J].农村电气化，2024（9）：54-57.

[3]陈俊彬，邝似斌，江泉，等.改进麻雀搜索算法在智能配电网自愈控制中的应用研究[J].自动化与仪器仪表，2024（1）：116-120.

[4]杨斌杰，李实，李仕君，等.关于智能配电网运行方式优化和自愈控制探析[J].电力设备管理，2023（2）：39-41.

[5]李伟青，陈虹宇，赵瑞锋，等.配电边缘物联网网络预警及自愈方案[J].重庆大学学报，2023，46（8）：11-19.