

基于改进 ACO 算法的 0.4 kV 配网不停电抢修方法研究

李真娣, 贾黎明, 郝斌斌, 马振兴

(国网宁夏电力有限公司培训中心, 宁夏 银川 721001)

摘要:传统的停电抢修方法已无法满足现代电力系统的要求,为此,提出基于改进 ACO 算法的 0.4 kV 配网不停电抢修方法。结合深度 CNN 与迁移学习的故障智能研判模型,实现 0.4 kV 配网故障智能研判;基于信息素冗余挥发策略与融合启发式靠近目标策略改进 ACO 算法,实施 0.4 kV 配网不停电抢修的路径规划;设计配网抢修策略,优化应急发电车的配置,执行抢修串行生成机制,实现配网的不停电抢修。测试结果表明,该方法对于三种故障的抢修时间均控制在 30 min 内,最大限度地减少需要应急发电的时间,为不停电抢修方案优化提供了有力支持,为实际抢修工作提供了决策依据。实际应用验证了本研究的可行性和有效性,为不停电抢修技术的发展提供了有益的参考和借鉴。

关键词:故障智能研判;改进 ACO 算法;0.4 kV 配网;不停电抢修

中图分类号: TP18 文献标志码: A 文章编号: 1003-7241(2025)11-0163-05

Research on 0.4 kV distribution network uninterrupted repair method based on improved ACO algorithm

LI Zhendi, JIA Liming, HAO Binbin, MA Zhenxing

(State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Training Center Yinchuan, Ningxia 721001, China)

Abstract: The traditional outage repair method can not meet the requirements of modern power system. Therefore, the non-outage repair method of 0.4 kV distribution network based on improved ACO algorithm is proposed. Combined with the intelligent fault diagnosis model of deep CNN and transfer learning, the intelligent fault diagnosis of 0.4 kV distribution network is realized. Based on the redundant pheromone volatilization strategy and the fusion heuristic approach to the target strategy, the ACO algorithm is improved to implement the path planning of 0.4 kV distribution network without power outage. It designs the emergency repair strategy of distribution network, optimizes the configuration of emergency generator vehicle, implements the serial generation mechanism of emergency repair, and realizes the emergency repair of distribution network without power failure. The test results show that the method can control the emergency repair time of three kinds of faults within 30min, minimizing the time required for emergency power generation to the greatest extent possible provides strong support for optimizing uninterrupted repair plans and provides decision-making basis for actual repair work. The practical application verifies the feasibility and effectiveness of this study, providing useful reference and inspiration for the development of uninterrupted repair technology.

Keywords: intelligent fault analysis and judgment; improved ACO algorithm; 0.4 kV distribution network; emergency repair without power outage

0 引言

由于配网设施的老化、恶劣天气、外力破坏等多种原因,配网故障时有发生,给人们的生产生活带来不便。因此,如何快速、准确地抢修配网故障,恢复供电成为了研究的热点问题。传统的配网抢修方法通常需要停电作业,不仅影响了供电可靠性,还给用户带来了诸多不便。随着用户对电力服务要求的提高,不停电抢修成为了配网抢修的重要发展方向^[1]。不停电抢修能够在保证用户正常用电的前提下,快速修复故障,提高供电可靠性。然而,不停电抢修技术难度大、风险高,需要深入研究和实践经验的积累。

目前,国内外对于配网抢修技术的研究尚处于发展阶

段,尽管取得了一些研究成果,但尚未形成一套成熟的理论和方法体系。其中文献[2]提出了一种考虑配电网故障修复场景的输配网络协同恢复方法。讨论了黑启动恢复过程中 TN 和 ADNs 侧故障修复场景的处理。分析了 TN/ADNs 协同恢复与 ADNs 故障修复方案之间的相互作用。建立了考虑 ADN 故障修复场景的 TN/ADN 协同恢复模型。采用解析目标级联算法对优化模型实施求解。文献[3]提出了一种基于故障模式和影响分析的配电系统以可靠性为中心的最优维护策略。采用灰色关联分析的多准则决策方法对故障模式实施优先排序,并得到其在网络中的风险因子。考虑了网络设备的各种故障模式,如绝缘子、跳线、断路保险丝、开关、变压器和电缆。根据配电网馈线的无功电量、维护成本、停电成本、安全成本和故障模式的风险系数,提出了针对各故障模式的优化策略。而由

* 基金项目:宁夏回族自治区基金项目(5229NX18004U)

收稿日期:2024-01-16

于我国配网的复杂性和特殊性,国外的不停电抢修技术难以完全适用于我国实际情况。文献[4]提出了一体化管控系统,利用电网采集到的状态参数,采用指标评价体系对电网运行状态进行实时评价,预测电网存在的安全隐患以及即将发生的故障。文献[5]提出了一种考虑客户画像和能量枢纽的配电网多目标抢修重构模型,该模型考虑了能量枢纽与客户的画像,并使用改进的 NSGA-II 算法求解,得到 Pareto 解集后通过模糊最大满意度实施决策。以上方法均会导致一定范围内的电力服务中断,对用户造成不便和潜在的经济损失,因此本文针对 0.4 kV 配网设计一种基于改进 ACO 算法的不停电抢修方法。

1 0.4 kV 配网不停电抢修方法设计

1.1 配网故障智能研判

设计一种结合深度 CNN 与迁移学习的故障智能研判模型,实现 0.4 kV 配网故障智能研判。该故障智能研判模型的设计具体如下:ResNet 网络在处理复杂特征方面表现出色,尤其适用于配电网故障特征的提取。利用在 ImageNet 数据集上训练后的 ResNet50 网络卷积层,并将其参数迁移至故障智能研判模型中。该模型分为固定参数和可变参数两部分。固定参数部分通过 ResNet50 网络的卷积层,有效地从配电网故障数据中提取特征。考虑到 CNN 全连接层参数过多可能导致过拟合的问题,将可变参数部分的全连接层替换为 256 个 1×1 尺寸的卷积层,作为深度 CNN 的输出层。通过对这一层的参数实施微调,并采用 Softmax 回归模型实施归一化处理,最终输出故障区域的位置信息。这一改进不仅提高了模型的泛化能力,还降低了过拟合的风险。

该故障智能研判模型的具体结构如图 1 所示。

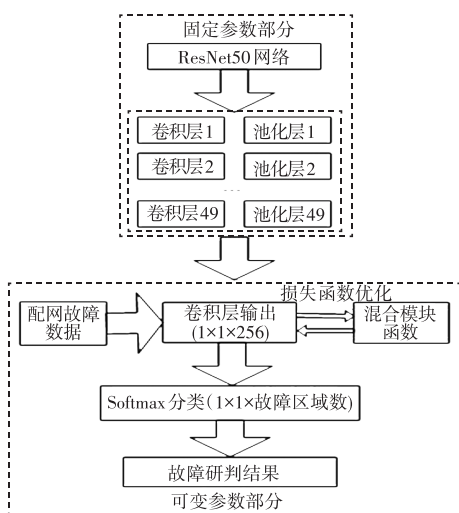


图 1 该故障智能研判模型的具体结构

传统的神经网络损失函数常采用 BP 多层前馈网络的 SGD 算法。然而,SGD 存在一些缺点,如迭代方向变化大、精度不高、易陷入局部最优等。此外,CNN 的训练参数量通常较大,进一步增加了训练的难度。为了改善

CNN 的训练效果,将 CNN 的损失函数替换为 PSO 的目标函数^[6]。具体而言,将每一组的网络权重参数视为 PSO 中的一个粒子,并选择损失函数值最小的粒子作为最优的 CNN 权重系数。

损失函数具体优化流程如图 2 所示。

至此完成 0.4 kV 配网故障智能研判。

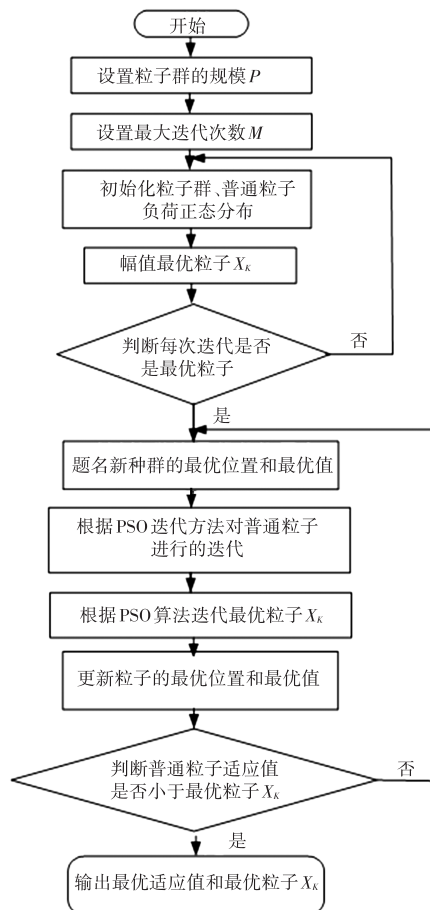


图 2 损失函数具体优化流程

1.2 基于改进 ACO 算法的抢修路径规划

通过改进 ACO 算法实施 0.4 kV 配网不停电抢修的路径规划。传统 ACO 算法在选择路径时仅考虑路径长度与信息素浓度,忽略了其他影响因素。为了改进该点,引入启发式靠近目标策略。通过启发式函数将问题的先验知识转化为数学形式,为蚂蚁提供额外的路径选择指导。具体来说,通过启发式函数将问题状态转化成状态评价函数,通过该函数评估蚂蚁当前行动选择的优劣程度,从而辅助蚂蚁实施路径选择^[7]。启发式靠近目标策略旨在解决传统 ACO 算法中缺乏灵活性、信息素更新单一等问题。此外,还引入了信息素冗余挥发策略,该策略采用自适应的信息素更新规则,使信息素能够动态调整以适应问题变化,从而提高 ACO 算法的搜索效率与收敛速度。主要采用基于反馈的自适应信息素更新策略,根据蚂蚁搜索路径的质量调整信息素权重,从而达到更好的优化效果。

在基本 ACO 算法中,其启发式函数仅考虑当前节点的下一个节点,而忽略了起始点与目标点。这种设计可能

导致算法在实施下一个节点的选择时陷入僵局,进而导致算法停滞。为了解决该问题,引入了启发式靠近目标策略。这一策略指导蚂蚁在选择下一个节点时更加远离起始点,同时更加接近目标点,从而避免算法陷入僵局,确保算法的持续进展。改进后的启发式函数公式为

$$G_{ij}(r) = \frac{K_{ij}}{K_{ij} + K_{jh}} \quad (1)$$

式中, $G_{ij}(r)$ 指的是节点 i 至节点 j 的启发值; K_{jh} 是指节点 j 与目标点 h 之间的距离; K_{ij} 指的是节点 i 与节点 j 之间的距离; K_{ij} 是指起点 z 到节点 j 之间的距离。

为了提升节点 j 被选中的概率,尽可能远离起始点 z , 使 $G_{ij}(r)$ 更大。同理, $K_{ij} + K_{jh}$ 越小, $G_{ij}(r)$ 也会更大。至此,获得初步改进后的 ACO 算法。

在基本 ACO 算法中,每轮搜索结束后会对所有经过的路径实施信息素更新。然而,初始阶段的探索中,蚂蚁可能会走一些弯路。为了避免在无关路径上更新信息素导致搜索效率低下,需要减少差路径上的信息素浓度,使蚂蚁放弃这些路径。为此,设置一个代价函数阈值来判断路径的好坏,只有好路径上的信息素才会被更新^[8]。这一策略是信息素挥发。

信息素更新规则的改进具体公式为

$$\Delta Q_{ij}^l(w) = \begin{cases} G_{ij}(r) \frac{\eta}{K_l}, & \text{iter} < B \\ \frac{\eta}{K_{\text{mid}} - K_l}, & K_l \geq B \end{cases} \quad (2)$$

式中, η 指的是增量的权重系数; B 是指算法达到的迭代次数; K_l 指的是第 l 次蚂蚁所走路程的长度; K_{mid} 是指每次迭代以后全部路径长度的均值^[9]。

至此完成 ACO 算法的改进,改进后的 HPACO 算法具体运行流程如下:

- 1) 初始化迭代次数、代价函数阈值、启发因子、信息素浓度以及蚂蚁的位置和数量;
- 2) 更新启发因子;
- 3) 依据启发因子与信息素浓度移动至新的抢修位置;
- 4) 更新信息素浓度,实现最优抢修路径的更新;
- 5) 确认是否达到迭代次数或阈值,达到后获得规划的抢修路径;未达到则返回第 2) 步。

1.3 不停电抢修

设计一种配网抢修策略,实现 0.4 kV 配网的不停电抢修。在该配网抢修策略中,为确保能够实现不停电抢修,首先应该优化应急发电车的配置,具体优化公式为

$$H(\alpha) = \max_{A \in X} \sum_{A \in X} B_A V_A \Delta Q_{ij}^l(w) \quad (3)$$

式中, B_A 指的是到达负荷点 A 的时间,其中负荷点 A 是应急发电车配置的负荷节点; V_A 是指 A 的加权失电负荷功率; X 指的是应急发电车配置的负荷节点集合; $H(\alpha)$ 是指应急发电车配置的优化结果^[10]。

其次,设计一种抢修串行生成机制实现 0.4 kV 配网的抢修。该机制的具体抢修调度流程具体如下:

1) 初始化

通过下式实施抢修调度初始化处理为

$$\begin{cases} S_D = 0 \\ PD_h = 0 \\ DD_h = 0 \\ DD_1 = \{1\} \\ WE_l(u) = W_l^o \\ \vartheta_m^u = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_D 指的是可行调度模式序列; PD_h 是指调度候选集合; DD_h 指的是调度已选集合; DD_1 是指第一个调度选择; $WE_l(u)$ 表示根据工期安排更新的能够再生的资源剩余量; W_l^o 代表可再生资源的限量; ϑ_m^u 表示不可再生资源的累积值^[11]。

2) 获得可行模式序列 S_D

通过随机抽样方式在项目活动 i 的全部模式内选择满足 $e_{in,l}^o \leq W_l^o$ 的模式 n_i ; 其中 $e_{in,l}^o$ 指的是单位时间内可再生资源的消耗量。

并更新不可再生资源的累积值,为

$$\vartheta_m^{u*} = \vartheta_m^u + e_{in,l}^v \quad (5)$$

式中, $e_{in,l}^v$ 为项目周期内不可再生资源的消耗量。

将满足 $\vartheta_m^{u*} \leq W_m^v$ 的模式 n_j 添加至 S_D 中,其中 W_m^v 是指不可再生资源的限量。最终获得满足不可再生资源约束条件与可再生资源约束条件的可行模式序列 S_D 。

3) 获得多模式调度活动序列

当第 j 个阶段不是最后一个阶段,计算 PD_h , 基于节点距离的优先规则选择任务 i^* , 在满足可再生资源需求与抢修任务中的紧前紧后关系的情况下安排活动 i^* 开始的时间 T_{i^*} 。并在 DD_h 中添加 i^* ^[12]。最终获得多模式调度活动序列,具体公式为

$$\begin{cases} v = \{(n_1, T_1), (n_2, T_2), \dots, (n_J, T_J)\} \\ j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (6)$$

式中, J 指的是项目活动数。

至此完成 0.4 kV 配网的不停电抢修。

2 实例分析

2.1 实验算例

对于设计的基于改进 ACO 算法的 0.4 kV 配网不停电抢修方法,给出一个算例,利用其实施不停电抢修,测试设计方法的表现性能。实验算例采用由故障节点、负荷节点形成的 0.4 kV 配网。其节点负荷情况见表 1。

其中某节点的故障现场如图 3 所示。

利用设计方法对实验配网实施不停电抢修,利用设计的结合深度 CNN 与迁移学习的故障智能研判模型,实现实验配网的故障智能研判。研判结果见表 2 所示。

表 1 节点负荷情况

序号	负荷节点编号	负荷等级	负荷范围/kW
1	2,3,9,10,11,17,29,30	一级	1-100
2	1,5,6,8,13,14,15,16,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,31,32	二级	101-200
3	4,7,12,18	三级	200 以上



图 3 某节点的故障现场

表 2 研判结果

故障序号	故障名称	故障位置
1	杆上电缆损坏	节点 5
2	真空开关损坏	节点 7
3	变压器本体损坏	节点 9

通过改进 ACO 算法实施 0.4 kV 配网不停电抢修的路径规划。其中 HPACO 算法的参数设置情况具体如下。

迭代次数:500 次;

代价函数阈值:0.5;

蚂蚁数量:100 只;

蚂蚁初始位置:分散且均匀地分布在解空间中。

利用设计的配网抢修策略实施实验配网的不停电抢修。优化应急发电车配置,执行抢修串行生成机制。

测试设计方法的抢修时间与资源配置情况。在测试中,将配网调度与抢修一体化管控系统与考虑客户画像和能量枢纽的配电网多目标抢修重构模型作为对比方法共同参与测试,分别用方法 A、方法 B 来表示。

2.2 测试结果

首先测试设计方法与方法 A、方法 B 各故障处的抢修时间,测试结果如图 4 所示。

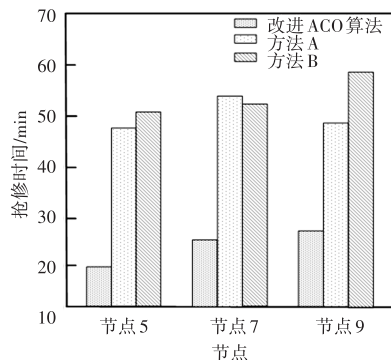


图 4 抢修时间测试结果

根据图 4 的测试结果,改进 ACO 算法对于三种故障的抢修时间均控制在 30 min 内,实现了迅速的故障抢修,同时该故障抢修时间能够支撑该方法实现不停电的故障抢修,证明了改进 ACO 算法的故障定位、路径规划以及抢

修策略执行均十分迅速。而方法 A、方法 B 对于三种故障的抢修时间均远长于设计方法。

测试三种方法抢修中的资源配置情况,包括抢修队、电缆测试设备、吊车、绝缘斗臂车的资源配置情况,测试结果见表 3。

表 3 测试结果

资源	所需资源数量	故障 1/2/3 资源配置情况		
		改进 ACO 算法	方法 A	方法 B
抢修队/人数	4/2/6	4/3/6	4/4/8	6/3/8
电缆测试设备/个	1/1/2	1/1/2	1/1/3	1/1/3
吊车/个	1/1/2	1/1/2	1/1/1	1/2/1
绝缘斗臂车/个	2/1/3	2/1/2	3/2/2	2/1/2

可以看到,改进 ACO 算法对于各故障的资源配置情况与所需资源数量基本相符,资源浪费情况较少,同时也不存在资源配置不到位的问题,整体资源配置很合理。而方法 A、方法 B 对于各故障的资源配置存在资源配置不到位的问题,存在资源浪费的问题,整体资源配置情况不合理。

为进一步验证改进 ACO 算法的有效性,将改进 ACO 算法与方法 A、方法 B 进行对比,测试指标为抢修精度,具体对比结果见表 4。

表 4 不同方法的抢修精度对比

迭代次数	改进 ACO 算法/%	方法 A/%	方法 B/%
10	96.72	86.42	84.48
20	96.75	84.55	86.36
30	95.62	87.62	83.44
40	94.55	89.46	84.85
50	96.57	87.55	83.74
60	98.35	86.36	87.36

由表 4 可知,改进 ACO 算法的抢修精度最高为 98.35%,方法 A 和方法 B 的抢修精度最高为 89.46% 和 87.36%,相比两种文献方法,改进 ACO 算法的抢修精度较高。

为评估改进 ACO 算法在故障判断和定位后实现配电系统可靠性的恢复所需的时间。较短的系统恢复时间可以减少对用户的供电中断时间。测试指标为可靠性恢复时间,具体对比结果如图 5 所示。

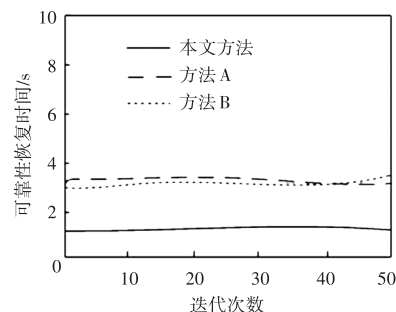


图 5 不同方法的可靠性恢复时间对比结果

由图 5 可知,本文方法的可靠性恢复时间均在 2 s 以下,方法 A 和方法 B 的可靠性恢复时间均在 3 s 左右,相比两种文献方法,本文方法的可靠性恢复时间较短。

为评估改进 ACO 算法在故障定位方面的速度和准确性。测试指标为抢修速度,具体对比结果如图 6 所示。

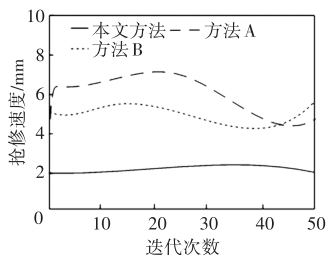


图6 不同方法的抢修速度对比结果

由图6可知,本文方法的抢修速度均在5 min左右,方法A和方法B的抢修速度均在10 min以上,相比两种文献方法,本文方法的抢修速度较快。

3 结束语

0.4 kV 配网不停电抢修方法的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。提出了一种基于改进ACO的0.4 kV配网不停电抢修方法,取得了以下研究成果:改进了传统蚁群优化算法,提高了算法的全局收敛性与搜索效率,通过改进ACO算法实施工作人员抢修路径规划,能够最大限度地减少需要应急发电的时间,为不停电抢修方案优化提供了有力支持。设计了0.4 kV配网不停电抢修策略,综合考虑了抢修任务的执行模式、资源量等多个因素,为实际抢修工作提供了决策依据。通过实际应用验证了本研究的可行性和有效性,为不停电抢修技术的发展提供了有益的参考和借鉴。虽然本研究取得了一定的成果,但仍存在一些不足之处,需要深入研究和完善。未来可以进一步研究其他优化方式。本研究建立的0.4 kV配网不停电抢修策略还可以扩展和完善,考虑更多的实际因素,提高模型的准确性和实用性。在实际应用中,还需要积累不停电抢修的实践经验,不断完善和优

化抢修方案,提高供电可靠性和优质服务水平。

参考文献

- [1] 王申华,王旭杰,夏圆,等.配网开关用PT在不停电作业工况下铁磁谐振特性与识别研究[J].电网技术,2022,46(11):4534-4540.
- [2] BAIY, GU X, LI S, et al. Coordinated restoration method of transmission and distribution network considering distribution network fault repair scenario [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(151): 109153.
- [3] ENJAVIMADAR M H, RASTEGAR M. Optimal reliability-centered maintenance strategy based on the failure modes and effect analysis in power distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2022 (203): 107647.
- [4] 王金仕,陈民洪,杨新华.基于多目标粒子群的光伏电站火灾综合管控一体化系统[J].自动化技术与应用,2025,44(8):52-56.
- [5] 文明,谭玉东,李杨,等.考虑客户画像和能量枢纽的配电网多目标抢修重构模型[J].陕西电力,2021,49(9):77-86.
- [6] 李明轩,魏韡,许寅,等.基于预演算法的灾后配电网应急抢修决策优化[J].电力建设,2023,44(12):85-94.
- [7] 范敏,杨青,郭祥富,等.面向不平衡数据的配电网故障停电预测方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(8):96-106.
- [8] 韩世军,杜帅,李真娣.配电网不停电状态下电能分项计量误差测试方法[J].电网与清洁能源,2022,38(8):24-29.
- [9] 侯慧,刘超,陈希,等.台风灾害下配网两阶段应急抢修恢复优化策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):169-179.
- [10] 姚卓磊,黄文焘,余墨多,等.智能配电网电力-通信灾害故障动态协调恢复方法[J].电力系统自动化,2022,46(19):87-94.
- [11] 王华昕,倪静,赵永熹,等.配网居民用户侧应急抢修资源多目标选址研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):73-80,131.
- [12] 方健,王红斌,刘育权,等.配电网灾后动态抢修滚动优化决策方法[J].南方电网技术,2021,15(5):122-128.

作者简介:李真娣(1989—),女,硕士,讲师,研究方向:配网运行与检修。

(上接第65页)

- [5] PREMNATH A P, JO J Y, KIM Y. Application of NTRU cryptographic algorithm for SCADA security [C]. 2014 11th International Conference on Information Technology, Premier Hall for Science and Engineering, Las Vegas, NV, United states, 2014:341-346.
- [6] FERST M K, FIGUEIREDO H F, DENARDIN G, et al. Implementation of secure communication with modbus and transport layer security protocols [C]. 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, Sao Paulo, Brazil, 2018:155-162.
- [7] 刘飞. SCADA 系统安全认证协议及实施方法研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [8] JIDIN R, TUKIJAN S N, AL-BAHADLY I, et al. Prototyping a lightweight encryption on a field programmable gate array for securing tele-control data [C]. 2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, Penang, Malaysia, 2018:180-185.
- [9] 郑卜之. 远程安全通信系统设计 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (S1):158-160.
- [10] 熊琦,戴忠华,彭勇,等.油气管道SCADA系统网络安全风险分析及防护框架研究[J].通信技术,2014,47(8):919-924.
- [11] 程小曼,黄茜,赵萍萍,等.油气SCADA系统安全主动防御体系构建及应用[J].网络安全和信息化,2022(1):139-142.
- [12] GOMEZ RIVERA A O, TOSH D K, GHOSH U. Resilient sensor authentication in SCADA by integrating physical unclonable function

- and blockchain [J]. Cluster Computing, 2022, 25(3):1869-1883.
- [13] CHAN A C F, ZHOU J. Non-intrusive protection for legacy SCADA systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(6):36-42.
- [14] AGGARWAL S, KADDOUM G. Authentication of smart grid by integrating QKD and blockchain in SCADA systems [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(5):5768-5780.
- [15] MA D D, SHI Y J. A lightweight encryption algorithm for edge networks in software-defined industrial internet of things [C]. 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications, Chengdu, China, 2018:1489-1493.
- [16] 杨海龙,靳新华.基于ECC复合加密的医院网络隐私信息安全保护方法[J].自动化技术与应用,2024,43(8):140-143,166
- [17] 徐珊珊.工业控制系统轻量级数据安全传输的研究 [D].杭州:浙江大学,2016.

作者简介:邓正东(1983—),男,工程师,硕士,研究方向:电网调度运行与控制、电网规划研究等。

通信作者:李中伟(1976—),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向:综合能源管理系统能量调度优化,新型电力系统通信及其信息安全,工业互联网安全,新型电力系统需求侧频率稳定与控制。