

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241700

基于物联网的低压配电二次系统灵活自组网通信技术研究

李炳森^{1,2}, 王成山¹, 朱介北¹, 艾芊³, 刘健⁴, 李鹏¹, 张东霞⁵

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 国网信息通信产业集团有限公司, 北京 102211;
3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 4. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,
陕西 西安 710054; 5. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为解决低压配电二次系统通信瓶颈问题, 提出了基于物联网的灵活自组网通信架构, 通过三阶段技术链实现高效通信。首先, 在网络初始化阶段, 采用分层扫描与时间序列分析方法, 构建覆盖拓扑结构、信道质量与时延特性的通信参数数据库, 精准识别网络盲点并优化中继节点空间分布。在此基础上, 提出了改进型蚁群优化算法, 引入局部搜索策略避免局部最优陷阱, 设计动态信息素更新机制, 结合时延、能耗与带宽等多目标约束条件, 实现最优通信路径的快速搜索。同时, 为提升抗干扰能力, 融合边缘计算与信道状态感知技术, 建立噪声环境下的自适应路由策略。通过实时反馈调整路径权重, 在较强噪声干扰强度下, 仍能维持较高的有效数据传输率。最后, 实验验证表明: 所提技术线路组网复杂度低、优化消耗时间短和抗干扰能力强, 成功应用于配电台区状态感知与智能控制, 为新型电力系统海量终端接入提供了低时延、高可靠的通信解决方案。

关键词: 低压配电二次系统; 物联网; 灵活自组网; 蚁群优化算法; 网络初始化; 抗干扰能力; 异构终端接入; 路径优化

Research on flexible self-organizing network communication technology for low voltage distribution secondary systems based on the internet of things

LI Bingsen^{1,2}, WANG Chengshan¹, ZHU Jiebei¹, AI Qian³, LIU Jian⁴, LI Peng¹, ZHANG Dongxia⁵

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 102211, China; 3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China; 5. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To solve the communication bottleneck problem of low-voltage distribution secondary systems, a flexible self-organizing network communication architecture based on the internet of things is proposed, which achieves efficient communication through a three-stage technology chain. Firstly, during the network initialization phase, a communication parameter database covering topology, channel quality, and latency characteristics is constructed using layered scanning and time series analysis methods. This database accurately identifies network blind spots and optimizes the spatial distribution of relay nodes. On this basis, an improved ant colony optimization algorithm is proposed, introducing a local search strategy to avoid local optimal traps, designing a dynamic pheromone update mechanism, and combining multi-objective constraints such as delay, energy consumption, and bandwidth to achieve fast search for the optimal communication path. At the same time, in order to improve the anti-interference ability, edge computing and channel state awareness technology are integrated to establish an adaptive routing strategy in noisy environments. Through real-time feedback, path weight is adjusted to maintain a high effective data transmission rate under strong noise interference. In the end, experimental verification shows that the proposed technology has low network complexity, short optimization time, and strong anti-interference ability. It has been successfully applied to the state awareness and intelligent control of distribution stations, providing a low latency and high reliability communication solution for the massive terminal access to new power systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFA0702200).

Key words: low voltage distribution secondary system; internet of things; flexible self-organizing network; ant colony optimization algorithm; network initialization; anti-interference ability; heterogeneous terminal access; path optimization

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFA0702200)“分布式信息能源系统的智能进化机理和设计”; 国家电网公司总部科技项目资助(5400-202099526A-0-0-00)“面向配电二次设备物联的开放式通信组网技术研究与应用”

0 引言

随着技术的不断进步, 物联网在更多领域展现出巨大的应用潜力, 得到了应用和发展。近年来, 我国积极建设数字电网和坚强智能电网, 全面提升了电网数字化智能化水平。配电网也逐步演进到全面感知、数据融合和智能应用的配电物联网阶段^[1]。一直以来, 由于低压配电设备点多、面广、量大, 且受电网企业投资成本、人力资源及技术水平等多方限制, 配电网改造的重点主要放在 10 kV 及以上电压级别的网络。作为“最后一公里”的低压配电网, 其长期处于监测盲区, 现有的通信基础, 特别是本地通信, 通信带宽、速率、时延、可靠性均难以满足配电台区大量数据实时传输与交互的要求, 具有很大的局限性。

物联网技术与配电网深度融合的配电物联网为解决配电台区内部精益化运维提供了新的解决思路。将物联网技术应用在低压配电二次系统中, 可有效完成通信传输^[2], 提升其安全性和可靠性, 保障配电网的稳定运行^[3]。随着海量物联网设备的接入, 通信组网技术也得到了进一步发展。为进一步提升配电网的通信能力, 基于物联网技术研究低压配电二次系统的通信组网方案^[4]。

开放式通信组网技术由德国西门子公司自 2000 年开始研发和应用^[5], 该技术成功构建了一个基于光纤技术的开放式传输系统。它具有丰富的用户接口, 能够传输语音、数据、视频等多种信息, 具有强大的通信能力和灵活性。开放式网络架构的引入进一步增大了这一技术的应用范围, 使得网络更加灵活和可扩展, 能够适应不断变化的通信需求, 使得基于路由器的新技术能够以多种形式深入到人们的日常生活中^[6]。

我国对智能配电网应用的时分双工长期演进技术开展了很多研究, 取得了显著的成效^[7]。在电力无线宽带通信系统中, 利用新一代无线宽带通信技术有效地实现了智能配电过程中庞大数据量的采集以及传输, 提高了数据传输的安全稳定性^[8-9]。该技术的传输效率比较高, 覆盖范围广, 单个基站的接入用户超过 10 000 个, 而且组网灵活, 接口丰富, 支持多种信息加密技术, 为智能配电过程中的配电网自动化、应急通信、信息采集等提供了有效的技术支持。

除无线宽带移动通信技术外, 最受关注的是无线传感网络通信组网技术。文献[10]通过绑定载波侦听机制构建离散马尔可夫决策模型, 在模型中与电力线路的节点位置信息持续交互, 动态获取节点

状态及路由表信息, 得到节点相关信息并获取相关路由表, 再经过不断训练对电力线路进行通信组网, 优化低压台区通信组网。文献[11]建立了电力通信质量矩阵, 对其中的节点进行划分并选取中继节点, 完成第一次通信组网。基于混沌粒子群优化算法完善通信道路的衰减特性, 修正组网错误, 实现低压台区通信组网。以上两种方法没有对电力网络进行初始化处理, 导致在通信组网过程中有很多中继节点盲区, 不能得出最优通信路径, 影响了最终通信组网的效果和效率^[12]。

为了解决上述方法中存在的问题, 本文提出基于物联网的低压配电二次系统灵活自组网通信技术。

1 基于物联网的低压配电网通信管理系统总体架构

基于物联网的低压配电网通信管理系统, 由供电公司主站(含中枢控制模块)、智能网关、数据采集设备以及若干远程终端(含终端控制模块)组成。主站与智能网关通过通信和/或电气连接, 智能网关与若干远程终端通过无线方式连接。数据采集设备和终端通过通信和/或电气连接。数据采集设备与环境传感器或者气象平台通过通信和/或电气连接。系统总体架构如图 1 所示。

中枢控制模块内置于主站中, 终端控制模块内置于远程终端中, 二者均具备数据处理分析能力, 主要区别在于中枢控制模块从主站中获取数据并完成数据传输; 终端控制模块从远程终端中获取数据并完成数据传输。远程终端是具有数据处理能力的馈线终端装置。每个电网子区域至少对应一个远程终端, 负责对应区域电网数据的采集处理。远程终端经过授权之后与智能网关进行数据交互。远程终端实时或者定时采集处理, 并临时存储对应电网子区域的电力数据、设备数据和环境数据等电网数据。根据设备数据获取设备状态, 结合设备状态将电网数据发送至智能网关, 并根据数据接收信号清理存储空间。环境传感器包括温度传感器、湿度传感器、电磁传感器或者噪声传感器等。环境传感器或气象平台采集的数据, 主要用于评估通信方式的性能, 在实际应用中可对环境传感器的种类或者环境数据的范围进行适当扩展。

2 低压配电二次系统通信网络初始化

利用低压配电二次系统现有的网络架构, 不需专门铺设通信线路, 通过系统自身组网就能实现电力信息的实时传输与监控。但是, 在实际组网过程

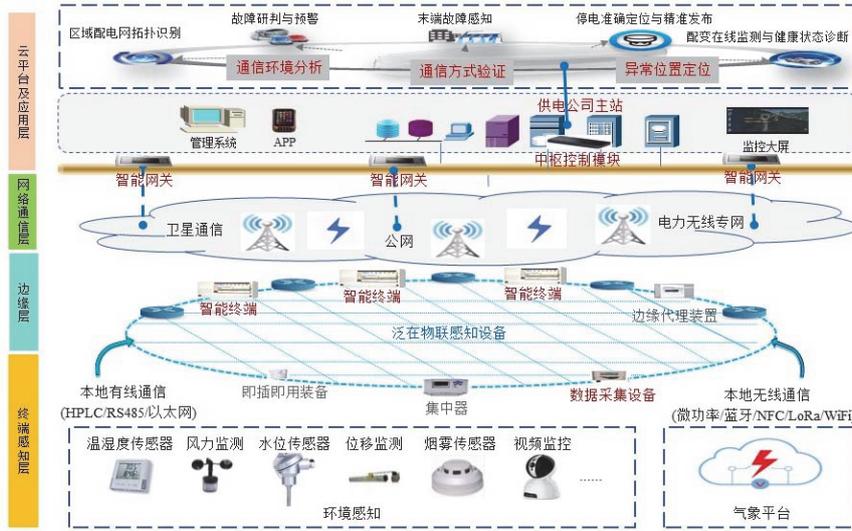


图 1 系统总体架构图

Fig. 1 Overall system architecture diagram

中，由于需要提前获取电力通信质量的网络信息列表，因此要找出最优的线路进行通信传输十分困难。这些动态变化的网络信息若未经规范化处理，会直接影响后续组网决策的准确性。在通信网络进行初始化处理^[13]，生成低压配电二次系统各终端间的通信信息。

低压配电二次系统在通信时，可以任选一个时间点，设置每个通信信道允许的信号通过并传送至终端。在初始化过程中，由于搜索终端所传送的指令会有多个终端接收和反馈信号，故存在一定的延时。鉴于此种情况，低压配电二次系统的通信终端越多，其初始化所用的最终时间也就越长。

因此，可总结得出影响低压配电二次系统通信网络初始化效率的关键因素有 3 个：接收指令时间、搜索指令等待时间和搜索结果反馈时间。也就是说，1) 由于终端数量过多，导致集中器传送指令时间过长，如果存在中继终端，也会在一定程度上增加传送时间；2) 搜索终端接收到指令后等待的时间过长；3) 搜索终端得到结果后传送给低压配电二次系统主站的用时过长。

假设接收指令时间为 T_a ，搜索指令等待时间为 T_b ，搜索结果反馈时间为 T_c 。根据低压配电二次系统相应原则可知，传输反馈指令以及终端接收的路径相同，因此得出 $T_a \approx T_c$ 。

假设 $T_a + T_c = T_d$ ，则 T_d 的结果跟搜索终端和中继终端的数量有关，可得低压配电二次系统主站的指令到达终端所需的时间为

$$T_m = \Delta T \times n(i) \quad (1)$$

式中： T_m 表示指令传送时间； $n(i)$ 表示指令传送到

程中继节点 i 的个数； ΔT 表示终端节点之间的时间差。

在低压配电二次系统中，由于集中器和通信终端的时间控制标准一致，可得 $\Delta T \approx T_c$ ，因此可计算得到从集中器到中继终端所需时间为

$$T_g(i) = T_a + T_c = 2((i+1) \times \Delta T + T_c) = 2 \times \Delta T \times (i+2) \quad (2)$$

式中： $T_g(i)$ 表示指令从集中器传送到中继终端所需要的总时间； $i+1$ 表示交互环节的总轮次； $2 \times \Delta T$ 表示低压配电二次系统搜索终端接收指令和反馈指令所需时间； T_c 表示低压配电二次系统搜索终端接收指令和反馈指令所需时间。

T_b 的取值需考虑低压配电二次系统搜索终端数据处理所需时间、终端接收数据^[14]的等待时间和发送处理后数据所需时间。

为了方便计算，现今低压配电二次系统所有通信终端的载波^[15]芯片相同，忽略芯片的影响，将其进行网络初始化。假设通信终端传输数据的接收端口有 $m(i)$ 个，进而得出搜索终端接收数据所需等待时间 $T_b(i)$ 为

$$T_b(i) = m(i) \times \Delta T \quad (3)$$

因此，可得低压配电二次系统完成一次整体搜索所需时间为

$$T_i = T_g(i) + T_b(i) \quad (4)$$

式中： T_i 表示低压配电二次系统完成一次搜索传送所需的时间。

将式(2)—式(4)进行联立后得出相应的 T_i ，如式(5)所示。

$$T_i = m(i) \times \Delta T + 2\Delta T(n(i) + 2) = \Delta T(2n(i) + 4 + m(i)) \quad (5)$$

在实际执行过程中, 由于低压配电二次系统的最后一个通信终端不需要计算数据传送时间^[16], 可得整个低压配电二次系统的网络初始化时间 T , 如式(6)所示。

$$T = \sum_{i=1}^{y-1} T_i = \sum_{i=1}^{y-1} \Delta T(2n(i) + 4 + m(i)) \quad (6)$$

中继终端个数的多少与自身的簇级别相关, 完成网络初始化处理后得到的最后终端属于屏蔽状态, 因此中继终端的个数逐渐变少, 进而得出每级簇中搜索所用的最长时间即 l 级簇中的元素搜索耗时与 l 级簇中的节点搜索之间的时间差之和, 如式(7)所示。

$$T_l = 2h(l)(l+1)\Delta T + \Delta T \sum_{j=1}^{l-1} h(l) \quad (7)$$

式中: T_l 为含 l 级终端时, 信息从发送到处理完成的总时延; $h(l)$ 表示 l 级簇中电力通信信号的传输频率。

则每级簇所需的搜索用时 T_s 计算公式为

$$T_s = \sum_{l=0}^l (l + h(l))\Delta T \quad (8)$$

式(8)表示在每级簇中所包含节点的搜索时间之和。

通过上述分析, 可定位低压配电二次系统内的所有节点盲区, 再基于传输时间相关数据, 驱动系统与各节点位置、线路信息动态交互, 迭代生成路由表并完成通信组网, 最终实现低压台区的高效通信覆盖。

3 基于蚁群优化算法通信组网

3.1 蚁群算法及其优化

蚁群算法^[17]是根据蚂蚁觅食迁移的情况完成全局最优路径选取的方法。在低压配电二次系统中, 也可以利用该算法来选取最优路径进而完成通信组网。由于蚁群算法自带自反馈机制, 且具有随机分布等特点, 因此在低压配电二次系统中进行通信组网, 需要将其进行网格化处理得到每个节点和最优路径间的长度。在实际计算过程中, 使用蚁群算法首先要确定相应参数, 然后生成最优路径的目标函数, 进而计算出低压配电二次系统的节点数据, 再根据节点数据生成低压配电二次系统的传递函数^[18]。负荷、频率响应、相位延迟输入与输出之间的关系如式(9)所示。

$$F(h) = \sum_{I=1}^M k_I \exp[-(\beta_0 + \beta_1 h^g) d_I] \exp[-2\pi h d_I (\sqrt{\zeta_r} / c_0)] \quad (9)$$

式中: I 表示低压配电二次系统中路径的编号; M 表示低压配电二次系统中可进行通信的路径个数; k_I 表示编号 I 路径的加权系数; β_0 、 β_1 和 g 表示传递函数中的衰减系数; h^g 表示频率对信号传播的衰减特性; h 表示与信号频率、信道传播特征等信道特性相关的参数; d_I 表示编号 I 路径的物理长度; ζ_r 表示频率响应; c_0 表示相位延迟。

在蚁群算法中引入局部搜索策略, 可以在每次迭代结束后进一步优化当前的最优解。这种策略可以帮助算法更快地找到全局最优解, 同时减少迭代次数和计算时间。

3.2 通信组网方法

蚁群算法可以很好地解决路径寻优差的问题, 同时还具有计算量小和计算难度小的优点, 因此提高了组网的精度。特别是当通信传输发生中断时, 为快速恢复低压配电系统的电力线载波通信^[19], 需对低压配电系统进行组网。低压配电二次系统网络完成初始化后, 多数常规路径选择方法将不再适用。

在实际计算过程中, 每条配电线路的需求均不相同。蚁群算法带有一些特殊的探测包, 会根据系统需求在每条路径中留下人工信息素, 将每条路径上的信息素进行统计得出信息素最多的路径即为最优路径。

在路径优化过程中, 蚁群算法主要涉及蚂蚁信息素及其启发因子的计算与更新, 下面对二者逐一进行计算。

首先计算出蚂蚁从两个节点之间转移的概率函数, 其表达式(10)是从节点 i 转移到节点 j 的启发函数值占所有可能转移的启发函数值之和的比例。

$$p_{ij}^d(t) = \frac{[\sigma_{ij}^d(t)]^\beta \times [\mu_{ij}^d(t)]^\alpha}{\sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v [\sigma_{ij}^d(t)]^\beta \times [\mu_{ij}^d(t)]^\alpha} \quad (10)$$

式中: d 表示蚁群算法所服务的类别; $p_{ij}^d(t)$ 表示 t 时刻类别 d 的蚂蚁从节点 i 转移到节点 j 的概率; t 表示蚁群转移的时间; v 表示蚂蚁转移的节点; $\sigma_{ij}^d(t)$ 表示 t 时刻类别 d 的信息素; $\mu_{ij}^d(t)$ 表示类别 d 的启发因子; β 表示路径优化过程中残留信息素的权重; α 表示路径优化过程中启发因子的权重。

其中, 通信组网的最优中继/终端节点 D 的计算公式为

$$D = \left(\begin{array}{l} \arg \max \{ [\sigma_{ij}^d(t)]^\beta \} \times [\mu_{ij}^d(t)]^\alpha \\ p_{ij}^d(t) \end{array} \right) \quad (11)$$

式中： $\arg \max$ 表示选择使“信息素×启发因子”最大的下一跳节点 j 。

在全局状态信息素更新方案下得出迭代最优更新公式为

$$\sigma_{ij}^d(\Delta t + t) = \theta \times \Delta \sigma_{ij}^d(\Delta t + t) + (1 - \theta) \times \sigma_{ij}^d(t) \quad (12)$$

式中： θ 表示线路更新过程中信息素的挥发系数； $\Delta \sigma_{ij}^d(\Delta t + t)$ 表示 t 到 $t + \Delta t$ 时段内，节点 i 到节点 j 类别为 d 的链路新增的信息素量。

在时间 Δt 内，低压配电系统组网线路信息素的增量为

$$\begin{cases} \Delta \sigma_{ij}^d(t, \Delta t + t) = \sum_{k \in A_d} \Delta \varphi_k^d(\sigma_{ij}^d)_k(t, \Delta t + t) \\ \Delta(\sigma_{ij}^d)_k(t, \Delta t + t) = \begin{cases} \frac{K}{(G_{lb}^d)_k} \\ 0 \end{cases} \\ (G_{lb}^d)_k = \varphi_d^g \times w_k^g(p_d) + \varphi_d^e \times w_k^e(p_d) \end{cases} \quad (13)$$

式中： k 表示组网过程中较优线路的数量； K 表示组网过程中较优线路的总数； $\Delta \varphi_k^d$ 表示第 k 条线路中信息素上升过程中的权重； A_d 表示类别为 d 的线路集合； $(\sigma_{ij}^d)_k$ 表示第 k 条较优线路、节点 i - j 类别 d 的信息素浓度； $(G_{lb}^d)_k$ 表示第 k 条线路类别 d 的综合优劣指标； φ_d^g 、 φ_d^e 表示两类评价维度的权重（ φ_d^g 关联载波侦听质量， φ_d^e 关联马尔可夫决策收益，权重和为 1，调节不同评价维度的影响）； $w_k^g(p_d)$ 、 $w_k^e(p_d)$ 表示第 k 条线路在两类评价维度下的得分函数（ p_d 为类别 d 的决策参数）。

通过计算组网过程中最优目标节点的蚂蚁数量下迭代的组网路径，得到路径优化约束如式(14)所示。

$$\begin{aligned} f_{op} = \max \sum_{k=1}^{k_m} f(p_d(v_1, v_e)) = \\ \max \sum_{k=1}^{k_m} \theta \times [e_{\max} - w^e(p_d(v_1, v_e))] \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $p_d(v_1, v_e)$ 表示迭代的组网路径； k_m 为迭代过程中的最优线路的数量； e_{\max} 表示最长路径； w^e 表示到达最优目标节点的路径； v_1 表示当前节点/起始节点； v_e 表示目标节点/终点节点。

满足式(14)的最优路径可保证线路的稳定，将满足该式的线路进行连接，完成低压配电二次系统的组网。

4 实验结果与分析

为了验证基于物联网的低压配电二次系统灵

活自组网通信技术的整体有效性，现对所提方法、文献[10-11]的方法进行通信组网复杂度、线路优化总耗时和抗干扰能力的实验测试。实验结果与分析如下。

4.1 通信组网复杂度

在实际通信组网过程中，应在保证组网性能的同时尽可能将计算过程简单化。因此，组网复杂度是衡量通信组网优劣的重要指标。

根据组网原则，不进行组网的计算复杂度为 0。1 级通信组网的复杂度为

$$Q_2(i) = 2i_{r_1}^2 + (3i_{r_1} - 1)i_{r_2} \quad (15)$$

2 级通信组网的复杂度为

$$Q_3(i) = 2i_{r_1}^2 + (3i_{r_1} - 1)i_{r_2} + 2i_{r_2}^2 + (3i_{r_2} - 1)i_{r_3} \quad (16)$$

依次递推，得到 N 级通信组网的复杂度计算公式为

$$Q_n(i) = \begin{pmatrix} 2i_{r_1}^2 + (3i_{r_1} - 1)i_{r_2} + \\ 2i_{r_2}^2 + (3i_{r_2} - 1)i_{r_3} + \dots + \\ 2i_{r_{n-1}}^2 + (3i_{r_{n-1}} - 1)i_{r_n} \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中： $Q_n(i)$ 表示组网复杂度； N 表示级别； r 代表不同级通信组网之间的节点， r_1 、 r_2 、 r_3 、 \dots 、 r_n 分别表示 0,1,2, \dots , N 级通信组网之间的节点； i_{r_1} 、 i_{r_2} 、 i_{r_3} 、 \dots 、 i_{r_n} 分别表示 0,1,2, \dots , N 级通信组网中的节点数量。

在同一低压配电网下，采用 3 种方法进行组网，可得出 11 组实验数据。3 种方法的组网复杂度结果如表 1 所示。

表 1 3 种方法的组网复杂度结果

Table 1 Network complexity results of three methods

实验编号	所提方法 组网复杂度	文献[10]方法 组网复杂度	文献[11]方法 组网复杂度	%
1	23	110	182	
2	25	120	189	
3	24	119	175	
4	28	114	198	
5	31	102	179	
6	34	103	184	
7	35	115	175	
8	30	108	186	
9	27	109	199	
10	32	124	196	
11	29	112	186	

由实验结果可知，在所有实验组别中，本文所提方法的组网复杂度均为最低。在 11 次试验中，所

提方法的组网复杂度平均值为 28.9%, 与文献[10-11]方法相比大大降低了计算量, 所提方法提高了组网精度, 从而证明了其有效性。

4.2 线路优化总耗时

在进行组网前, 低压配电二次系统为保证线路稳定都需要提前求解全局的最优线路。组网过程中的线路寻优是最耗时的步骤, 减少线路优化耗时可以大幅提升组网效率。

下一步验证所提方法的有效性。在相同环境下, 假设 3 种方法的组网精度一致, 通过计算 3 种方法进行路径优化所用的时间, 进而判断出最优的组网方法。实验结果如图 2 所示。

对比实验结果可以发现, 随着通信距离的增加, 线路优化耗时也随之增加, 但所提方法的用时始终没有超过 500 s, 其余两种方法的线路优化耗时始终大于 800 s。因此, 证明了所提方法的线路优化效率最高、耗时最短, 通信组网性能最佳。

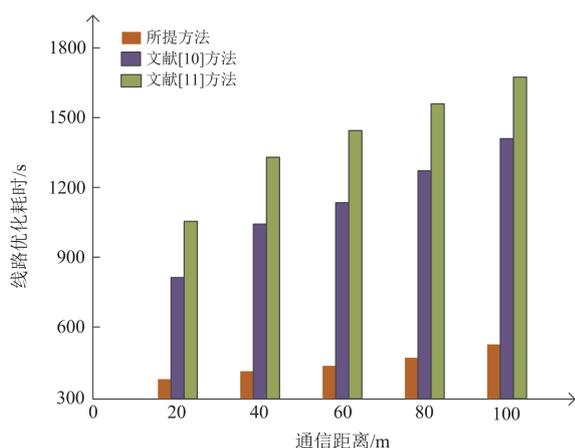


图 2 不同方法的线路优化耗时

Fig. 2 Time consumption of line optimization using different methods

4.3 抗干扰能力测试

低压配电二次系统的通信组网性能很容易受到外界因素的影响。为比较 3 种组网方法的性能, 可通过对比其抗干扰能力来验证最优方法。

为将抗干扰能力具体化, 抗干扰能力可用式(18)进行描述。

$$g = \frac{l - J}{l} \quad (18)$$

式中: g 表示抗干扰能力; l 表示组网最大通信距离; J 表示组网线路中节点间的平均通信长度。

在同一环境下, 采用 3 种方法对同一低压配电二次系统的通信线路进行组网, 并用式(18)分别计算出 3 种方法在不同通信距离下的抗干扰能力。实

验结果如图 3 所示。

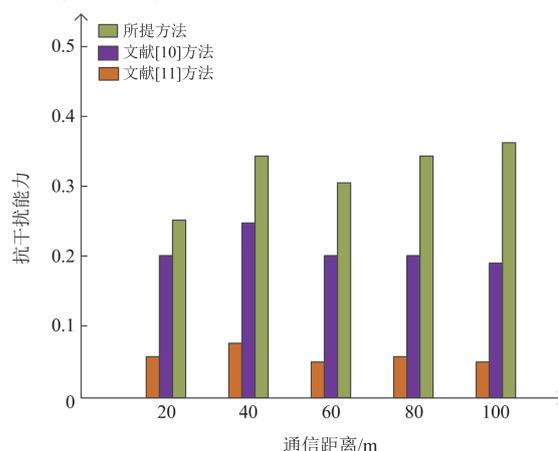


图 3 3种方法的抗干扰能力

Fig. 3 Anti-interference ability of three methods

从实验结果可知, 在任何通信距离下所提方法的抗干扰能力均最强, 其余两种方法的抗干扰能力远低于所提方法。这主要是由于所提方法在进行通信组网前, 将低压配电二次系统通信网络进行了初始化处理, 通过识别并处理通信线路中的大量盲点数据, 不仅优化了通信组网的应用效果, 还显著提升了组网能力、组网精度以及通信线路的抗干扰性能。

由此可见, 灵活自组网通信技术的应用为低压配电二次系统提供了更加高效、可靠、智能的解决方案^[20-21], 有助于提升低压配电网的整体性能和安全性^[22]。基于此, 其应用可以体现在以下几个方面。

1) 实时监测与故障预警。灵活自组网通信技术能够构建高效、可靠的通信网络, 实现低压配电二次系统中各关键节点的实时监测。通过采集电压、电流、功率因数等关键数据, 系统可以及时发现异常情况, 并进行故障预警, 从而避免因故障导致的停电或设备损坏。

2) 自动化控制与管理。基于灵活自组网的通信技术, 低压配电二次系统可以实现自动化控制与管理。例如, 根据实时监测数据, 系统可以自动调节电压、电流等参数, 保持设备的最佳运行状态。此外, 系统还可对设备进行远程管理和控制, 提高运维效率。

3) 数据整合与智能分析。灵活自组网通信技术能够将低压配电二次系统中的各种数据进行整合, 并通过大数据分析技术提取有价值的信息。这些信息可以用于优化系统运行策略、预测设备寿命、制定维护计划等, 从而提高系统的整体性能和可靠性。

4) 安全防护与应急响应。在低压配电二次系统中, 灵活自组网通信技术能够有效地构建安全防护网络, 实时监测潜在的安全威胁并及时采取防护措施。

在紧急情况下,系统可以快速响应,启动应急预案,确保电力系统的稳定运行和用户的用电安全。

5 结论

随着物联网的建设和发展,终端智能化、物联网化、泛交互化的趋势愈发明显^[23-26],更加需要高效、灵活的通信技术^[27-28],实现海量、泛在数据的可靠传输。为加强通信组网效率,提出了基于物联网的低压配电二次系统灵活自组网通信技术。该方法对低压配电二次系统通信网络数据进行初始化处理,计算出通信线路中的多数盲点、中继终端以及信息传送时间等相关组网数据,基于蚁群优化算法计算出最优路径,实现低压配电二次系统通信组网,解决了通信组网复杂度高、线路优化总耗时长和抗干扰能力弱的问题,进而加强了低压配电网的稳定运行。该方法主要基于模型分析和仿真计算,后续的研究将着重考虑实际系统的测试验证。随着技术的不断发展,灵活自组网通信技术在低压配电二次系统中的应用还将会更加广泛和深入。

参考文献

- [1] 李宏川, 赵宇, 李彬, 等. 配电物联网边缘计算场景下基于改进 ANFIS 的电缆通道综合评估及智能预警方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 94-103.
LI Hongchuan, ZHAO Yu, LI Bin, et al. Comprehensive assessment and intelligent early warning of cable passages based on improved ANFIS in the edge computing scenario of PDIoT[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 94-103.
- [2] 刘日亮, 刘海涛, 夏圣峰, 等. 物联网技术在配电网台区中的应用与思考[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1707-1714.
LIU Riliang, LIU Haitao, XIA Shengfeng, et al. Internet of things technology application and prospects in distribution transformer service area management[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1707-1714.
- [3] 王成亮, 李澄, 葛永高, 等. 基于多智能体的配电网台区智能决策系统研究[J]. 信息技术, 2020, 44(10): 49-55, 60.
WANG Chengliang, LI Cheng, GE Yonggao, et al. Intelligent decision system of distribution station area based on multi-Agent[J]. Information Technology, 2020, 44(10): 49-55, 60.
- [4] 白杨杨, 岑远遥, 孟立新, 等. 空间激光通信组网从光端机控制技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 10-17.
BAI Yangyang, CEN Yuanyao, MENG Lixin, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 10-17.
- [5] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [6] 程杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [7] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [8] 陈皓勇, 蔡伟钧, 陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 8-17.
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power internet of things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 8-17.
- [9] 张禄澳, 范一芳, 王宇轩, 等. 光储式 5G 通信基站集群灵活性聚合与协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 101-110.
ZHANG Luao, FAN Yifang, WANG Yuxuan, et al. Flexible aggregation and coordinated scheduling strategy for renewable powered 5G communication base station clusters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 101-110.
- [10] 崔莹, 刘晓胜, 徐殿国. 基于改进 Q 学习算法的低压电力线通信组网及维护方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 111-118.
CUI Ying, LIU Xiaosheng, XU Dianguo. Low-voltage power line communication networking and maintenance based on improved Q learning algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 111-118.
- [11] 王艳, 陈浩, 赵洪山, 等. 网络模式下配电物联网载波通信匹配组网方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 59-66, 80.
WANG Yan, CHEN Hao, ZHAO Hongshan, et al. Matching networking method for carrier communication of distribution internet of things under network mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 59-66, 80.
- [12] 刘朋, 赵训威, 吴庆, 等. 基于物联网的低压台区通信灵活组网技术[J]. 信息技术, 2023, 47(10): 61-65, 71.
LIU Peng, ZHAO Xunwei, WU Qing, et al. Flexible networking technology for low-voltage station area communication based on the internet of things[J]. Information Technology, 2023, 47(10): 61-65, 71.
- [13] 朱继洪, 裴继红, 赵阳. 卷积神经网络(CNN)训练中卷积核初始化方法研究[J]. 信号处理, 2019, 35(4): 641-648.
ZHU Jihong, PEI Jihong, ZHAO Yang. Research on

- convolution kernel initialization method in convolutional neural network (CNN) training[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(4): 641-648.
- [14] 柯熙政, 宋云凤. 一种移动终端可见光数据收发系统的设计与实现[J]. 西安理工大学学报, 2019, 35(1): 1-6. KE Xizheng, SONG Yunfeng. Design and implementation of visible optical communication system for mobile terminal[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2019, 35(1): 1-6.
- [15] 窦硕. 基于稀疏采样的载波通信干扰耦合抑制仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(1): 142-146. DOU Shuo. Simulation of interference coupling suppression in carrier communication based on sparse sampling[J]. Computer Simulation, 2020, 37(1): 142-146.
- [16] 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.
- [17] 邓璘, 王琳, 盛步云, 等. 基于变邻域蚁群算法的自动光学检测路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(2): 354-360. DENG Lin, WANG Lin, SHENG Buyun, et al. Path planning of automatic optical inspection based on variable neighborhood ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(2): 354-360.
- [18] 王云, 王巍, 邱婷. 基于灰色分析的低压台区线损率预测模型设计[J]. 信息技术, 2020(10): 112-115, 120. WANG Yun, WANG Wei, QIU Ting. Design of line loss prediction model of low-voltage station area based on grey analysis[J]. Information Technology, 2020(10): 112-115, 120.
- [19] 林虎, 顾栋, 康琳. 基于梯度提升决策树的低压台区线损率预测[J]. 信息技术, 2020, 44(8): 108-113, 120. LIN Hu, GU Dong, KANG Lin. Line loss rate prediction of low-voltage stations area based on gradient boosting decision tree[J]. Information Technology, 2020, 44(8): 108-113, 120.
- [20] 李炳森, 朱介北, 王成山, 等. 一种智能配电网无线通信方法及系统, 中国: CN114915022B[P]. 2023-08-01. LI Bingsen, ZHU Jiebei, WANG Chengshan, et al. A wireless communication method and system for intelligent distribution network, China: CN114915022B[P]. 2023-08-01.
- [21] 李炳森, 朱介北, 王成山, 等. 基于物联网的配网通信管理系统, 中国: CN116169788B[P]. 2023-09-12. LI Bingsen, ZHU Jiebei, WANG Chengshan, et al. Internet of things based distribution network communication management system, China: CN116169788B[P]. 2023-09-12.
- [22] LI Bingsen, WANG Chengshan, SUN Dedong, et al. Research on key information and communication technologies application of new distribution system[C] // CCC2022 the 41st Chinese Control Conference, July 25-27, 2022, Hefei, China: 4281-4286.
- [23] 电力人工智能边缘侧模型技术规范: T/CES 103—2022[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2022. Technical specification for electric power artificial intelligence edge model: T/CES 103—2022[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2022.
- [24] 电力人工智能知识图谱组件功能及接口规范: T/CES 102—2022[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2022. Function and interface specification of power artificial intelligence knowledge graph component: T/CES 102—2022[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2022.
- [25] 电力行业智能交互命名实体标注规范: T/CES 157—2022[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2022. Specification for intelligent interactive named entities in the power industry: T/CES 157—2022[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2022.
- [26] 电力智能交互训练语料标注规范: T/CES 156—2022[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2022. Specification for annotation of power intelligent interactive training corpus: T/CES 156—2022[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2022.
- [27] 向华桥, 崔文超, 刘世焯, 等. 基于高表征能力特征处理模块的小目标检测[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(5): 1360-1367. XIANG Huaqiao, CUI Wenchao, LIU Shizhuo, et al. Small target detection based on high representation capability feature processing module[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(5): 1360-1367.
- [28] 刘志仁, 薛明军, 杨黎明, 等. 基于区域自组网的配电网无线差动保护技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 167-174. LIU Zhiren, XUE Mingjun, YANG Liming, et al. Research and application of wireless differential protection for a distribution network based on a regional AD-HOC network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 167-174.

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-04-20

作者简介:

李炳森(1975—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型配电系统规划与管理、电力物联网与电力人工智能关键技术及创新应用等; E-mail: libingsen@sgitg.sgcc.com.cn

王成山(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析、配电系统规划及分析、分布式发电与微电网等; E-mail: cswang@tju.edu.cn

朱介北(1987—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统、电力电子化电力系统、新能源与智能电网、电网规划与运行等. E-mail: jiebei.zhu@tju.edu.cn

(编辑 许威)