

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.03.007

光通信系统与网络技术

魏培瑶,赵凤,陈瑾,等.面向配电场域网的高可靠路由优化算法研究[J].光通信研究,2023(3):38-45.

Wei P Y, Zhao S, Chen J, et al. Research on High Reliable Routing Optimization Algorithm for Distribution Field Area Network [J]. Study on Optical Communications, 2023(3):38-45.

面向配电场域网的高可靠路由优化算法研究

魏培瑶¹,赵 凤¹,陈 瑾²,朱晓荣¹

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室,南京 210003; 2. 深圳友讯达科技股份有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:配电场域网作为电力物联网的重要组成部分,是电力物联网“最后一公里”基础设施,解决电力物联网“最后一公里”的通信问题。为满足配电场域网控制类业务的高实时性和高可靠性需求,提高网络的覆盖能力和可靠性,文章提出了一种基于 Dijkstra 算法的高可靠、快速的路由优化算法。通过配电场域网的场域高速电力线载波和微功率无线两种通信方式的优势互补,节点通过混合路由表选择最可靠的通信链路传输数据,同时考虑了可靠性和实时性约束。仿真结果表明,该配电场域网高可靠路由优化算法有效增加了覆盖能力、成功传输业务数以及平均路由可靠性。

关键词:配电场域网;场域高速电力线载波;微功率无线;高可靠路由

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2023)03-0038-08

Research on High Reliable Routing Optimization Algorithm for Distribution Field Area Network

WEI Pei-yao¹, ZHAO Su¹, CHEN Jin², ZHU Xiao-rong¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China; 2. Shenzhen Friendcom Technology Development Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: As an important part of the power Internet of things, the distribution field area network is the "last mile" infrastructure of the power Internet of things. It can solve the communication problem of the last mile of the power Internet of things. In order to meet the high real-time and high reliability requirements of distribution field area network control services and improve the coverage and reliability of the network, a highly reliable and fast routing optimization algorithm based on Dijkstra algorithm is proposed. The field high-speed power line carrier and radio frequency communication methods of the field area network have complementary advantages. The nodes select the most reliable communication link to transmit data through the hybrid routing table, and consider the reliability and real-time constraints at the same time. The simulation results show that the high-reliability routing optimization algorithm of the distribution field area network can effectively increase the coverage capacity, the number of successfully transmitted services and the average routing reliability.

Key words: distribution field area network; field high-speed power line carrier; radio frequency; high reliable routing

0 引 言

配电场域网是电力物联网“最后一公里”基础设施,利用灵活可靠的通信技术为许多智能电网应用提供支撑^[1-3]。配电场域网业务包含控制类与采集类两大类^[4],控制类业务对于实时性和可靠性的要求极高,现有的单一通信网络无法完全满足其可观、可测和可控的需求。因此一些将电力线载波(Power Line Carrier, PLC)通信与无线通信融合的方案被提出,如文献[5]中讨论了混合通信系统相对于非混合通信系统的优势;文献[6]考虑混合 PLC 和 LoRaWAN 架构,每个智能电表(Smart Meter, SM)

都配备有电力线通信或远程广域网协议节点以连接到其服务网关;文献[7]提出了在电力线节点与无线节点之间部署电力线-无线双接口中继以实现异构网络的互联互通,从而改善通信系统的可靠性;文献[8-9]描述了 PLC/微功率无线(Radio Frequency, RF)通信混合技术在“最后一公里”的通信系统解决方案。上述文献表明,电力线与无线并行与级联通信总是能比单一的通信方式提供更可靠的数据传输路径。

本文结合场域高速电力线载波(Field High-speed Power Line Carrier, FHPLC)通信和 RF 通信两种通信方式的优势,提出一种基于 Dijkstra 算法

收稿日期:2022-09-08; 修回日期:2022-09-20; 纸质出版日期:2023-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(92067101);江苏省重点研发计划资助项目(BE2021013-3)

作者简介:魏培瑶(1998-),女,陕西宝鸡人。硕士,主要研究方向为配电网可靠路由。

通信作者:朱晓荣,教授。E-mail: xrzhu@njupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

的高可靠路由优化算法,将网络中的可靠链路筛选出来,使网络中各节点具有统一的混合路由表,可自动、动态和实时地选择最可靠的链路(FHPLC/ RF)进行数据传输,以提高网络通信传输效率和覆盖率,保障信息数据及时可靠地传输。

1 系统模型

1.1 网络模型

在建设配电场域网的过程中,PLC通信利用现有的电力线作为载体进行数据传输,是电力网络特有的一种通信方式,其建设成本低,覆盖范围广,且不容易受到障碍物的影响。但由于PLC通信易受到电力线负载、噪声、阻抗不匹配和干扰的影响,从而导致信号衰减严重^[10]。无线通信无需布线,具有组网灵活、功耗低和可扩展性较好等特点,但易受障碍物、距离以及气候环境等因素的影响,从而导致信号衰减较大,严重影响其通信质量^[11]。同时由于一些配电设备须与交流电相隔离,部分设备由于使用直流电源供电或使用电池、互感器取电而不具备PLC通信回路,停电(PLC通信中断)时信息难以实时上报等原因,使用单一的电力线通信方式无法实现配电设备的全覆盖。

参考深圳友讯达科技公司和国家电网等公司共同编制的配电台区边端通信标准体系架构,本文中的配电场域网采用FHPLC、470 MHz-RF和2.4 GHz-RF等多种通信模式,通过将FHPLC通信与RF通信结合,发挥各自的优势,弥补对方的不足。配电场域网主要由中心主控节点(Master Node, MN)、路由汇聚节点(Route and Aggregate Node, RN)及末端感知节点(End Sensor Node, EN)组成,其网络拓扑结构如图1所示,配电场域网以MN为中心,MN通过远程通信网(光纤和以太网等)与配电主站进行数据传输交互,通过FHPLC或RF通信方式实现网内各节点和融合终端的数据交换;一个MN与多个RN构成以MN为中心、以PLC与RF为传输介质的Mesh主干网结构,EN通过低功耗通信方式接入主干网,与MN或RN之间构成星形拓扑结构,同时MN和RN可支持扩展接入无线保真(Wireless Fidelity, WiFi)、ZigBee和远距离无线电(Long Range Radio, LoRa)等标准通信的无线传感设备。

配电场域网中的3类节点介绍如下:

(1) MN: MN为配电场域网的中心节点,充当网关,是网络的控制与管理中心,负责网络的构建、

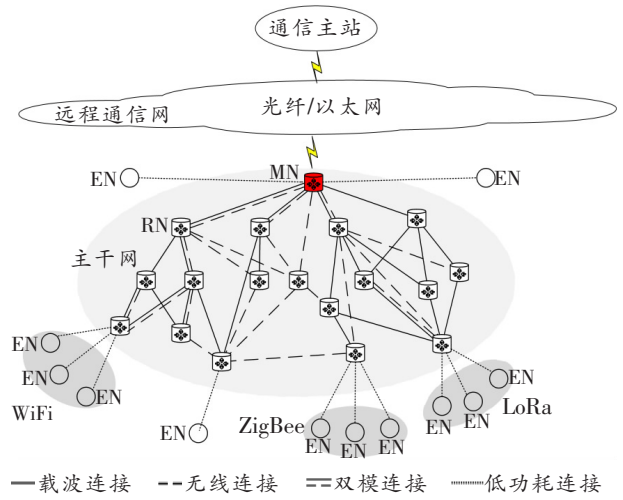


图1 配电场域网拓扑图

Figure 1 Distributed field area network topology

RN和EN的接入管理、路由维护和资源分配等,实现网内各个节点与融合终端的数据传输。

(2) RN: RN为配电场域网的从属节点,参与网络的构建、维护和管理,负责本节点的数据传输及其子节点的数据转发。

(3) EN: EN为配电场域网的末端节点,负责本节点的数据传输。EN为低功耗传感设备,通过低功耗无线通信方式接入MN或RN。

配电场域网不同的业务类型服务质量(Quality of Service, QoS)需求呈现差异化,控制类业务包括智能分布式配电自动化、用电负荷需求侧响应和分布式能源调控等,这类业务对实时性与可靠性的要求极高,对带宽的需求较小,因此本文不考虑带宽因素对可靠路由的影响。在配电场域网中影响可靠路由的决定性因素是通信时延、路由跳数和可靠性。可靠路由端到端通信时延要求为毫秒级,可靠性要求为99.999%。

1.2 系统模型

本文主要关注的是配电场域网应用场景,首先可将通信网络拓扑表示为加权无向图 $G=(N, E)$,其中 N 和 E 分别为通信网络中的节点集合与链路集合,这里节点集合是对配电场域网中融合终端、低压监测单元、用户电表和传感设备等通信设备的抽象,链路集合是连接节点通信通道的抽象。节点个数 $n=|N|$,链路个数 $e=|E|$ 。

假设配电场域网中有 K 个电力控制类业务要同时传输,业务集合可表示为 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k, \dots\}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$,其中, s_k 为业务集合 S 中的第 k 条业务,每条业务 $s_k \in S$ 有其源节点 n_k^{src} 和目的节点 n_k^{dst} ,显然 $n_k^{\text{src}}, n_k^{\text{dst}} \in N$ 。假设 $p(k)$ 为业务 s_k 的路

由, $\mathbf{Path}$ 为业务路由的集合, 显然 $p(k) \in \mathbf{Path}$ 。业务 s_k 从源到目的节点的路由 $p(k)$ 是由满足业务 QoS 需求的节点和每对相邻节点间的链路组成的串联系统, 所以业务 s_k 的路由可由 $p(k) = \{n_k^{\text{src}}, e_k^{\text{sa}}, n_k^{\text{a}}, \dots, n_k^{\text{f}}, e_k^{\text{fd}}, n_k^{\text{dst}}\}$ 表示, e_k^{sa} 为与源节点 n_k^{src} 相邻的节点 n_k^{a} 间的链路, e_k^{fd} 为与目的节点 n_k^{dst} 相邻的节点 n_k^{f} 间的链路。

2 可靠路由优化模型

2.1 可靠性分析

2.1.1 节点可靠性

节点的可靠性主要取决于网络拓扑中路由路径所包含各个节点设备的可用性, 只有各节点在一定时间内持续可用, 即状态正常的情况下, 路由路径才不会中断。假设这里的设备节点故障是可修复的, 不考虑节点老化状态, 那么节点能够正常工作的概率即节点的可靠性 R_{n_i} 定义如下:

$$R_{n_i} = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i}, \quad (1)$$

式中: $MTBF_i$ 为节点 i 的平均故障间隔时间; $MTTR_i$ 为平均修复时间。

2.1.2 链路可靠性

(1) RF 链路可靠性

RF 链路故障可能是信号衰减、无线电干扰和背景噪声等因素造成的^[12]。无线信道模型主要分为大尺度衰落和小尺度衰落两大类。大尺度衰落模型主要体现在由于发射信号长距离传播导致的路径损耗和由于障碍物的遮挡而造成的阴影衰落, 小尺度衰落主要体现在障碍物较多的复杂无线信道环境中^[13]。

考虑对数路径损耗模型, 路径损耗 $PL(d_{ij})$ (单位为 dB) 定义如下:

$$PL(d_{ij}) = PL(d_0) + 10L_s \lg\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (2)$$

式中: d_{ij} 为发送节点 i 与接收节点 j 之间的距离; d_0 为近地距离 (推荐取 1 m); $PL(d_0)$ 为第 1 m 参考路径损耗; L_s 为无线信号路径损耗指数, 通常表示路径损耗的快慢, 一般由传播环境决定; X_σ 为均值为 0、标准偏差为 σ 的服从高斯分布的随机变量, 表示不同传播环境和信道条件下会产生不同的阴影效应^[14]。简化式(2)可得:

$$PL(d_{ij}) = K_L d_{ij}^{-n}, \quad (3)$$

式中, K_L 为一个常数, 取决于无线信号的频率和天线增益。

考虑小尺度多径衰落服从瑞利分布, 对于存在干扰与衰减的无线网络, 当节点 i 以发射功率 P_i^{RF} 向节点 j 发送数据时, 接收节点 j 的信干噪比 (Signal to Interference Noise Ratio, SINR) $SINR_{ij}^{\text{RF}}$ 为

$$SINR_{ij}^{\text{RF}} = \frac{P_i^{\text{RF}} \cdot |h_{ij}^{\text{RF}}|^2 \cdot PL(d_{ij})}{N_0^{\text{RF}} + \sum_{w \in I \setminus i} P_w^{\text{RF}} |h_{wj}^{\text{RF}}|^2 PL(d_{wj})}, \quad (4)$$

式中: h_{ij}^{RF} 为信道增益, 其服从参数为 1 的指数分布; 无线信道的噪声是均值为 0、方差为 N_0^{RF} 的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AGWN), 对于所有节点而言, N_0^{RF} 固定且相同; I 为除通信节点 i 之外对接收节点 j 造成干扰的干扰节点集。

当 $SINR_{ij}^{\text{RF}}$ 大于等于一定的阈值 $SINR_0^{\text{RF}}$ 时, 节点 i 到节点 j 之间的 RF 链路 $e_{i,j}$ 能够准确可靠的传输数据信息。定义一个二进制变量 γ_{ij}^{RF} :

$$\gamma_{ij}^{\text{RF}} = \begin{cases} 1, & SINR_{ij}^{\text{RF}} \geq SINR_0^{\text{RF}} \\ 0, & SINR_{ij}^{\text{RF}} < SINR_0^{\text{RF}} \end{cases}. \quad (5)$$

$\mathbf{A}^{\text{RF}} = [a_{ij}^{\text{RF}}]_{N \times N}$ 为无线网络的邻接矩阵, a_{ij}^{RF} 为

$$a_{ij}^{\text{RF}} = \begin{cases} 1, & \gamma_{ij}^{\text{RF}} = 1 \\ 0, & i = j \\ \infty, & \gamma_{ij}^{\text{RF}} = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

$\mathbf{R}^{\text{RF}} = [R_{ij}^{\text{RF}}]_{N \times N}$ 为无线网络的可靠性权值矩阵, R_{ij}^{RF} 为

$$R_{ij}^{\text{RF}} = \begin{cases} P(SINR_{ij}^{\text{RF}} \geq SINR_0^{\text{RF}}), & a_{ij}^{\text{RF}} = 1 \\ 1, & i = j \\ 0, & a_{ij}^{\text{RF}} = \infty \end{cases}. \quad (7)$$

(2) FHPLC 链路可靠性

FHPLC 链路时变性较强, 电力线信道的“噪声、阻抗、衰减”3 个主要特性参数不稳定, 噪声和阻抗主要取决于用电器, 衰减由用电器、距离和线路布线等因素共同决定。FHPLC 通信不受障碍物的影响, 但通过电力线传输数据通常会受到上述恶劣信道条件的影响, 从而大大缩小了 FHPLC 的通信距离, 需要通过引入中继的方式扩展信号的覆盖范围。

本文中 FHPLC 信道衰落 h_{ij}^{FHPLC} 考虑通过对数正态分布来统计建模^[15], 对数正态分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

式中, 参数 μ 和 σ 分别为正态随机变量 $\ln x$ 的均值和标准差。假设信道增益的单位能量为 1, 那么 $\mu = -\sigma^2$ 。

路径损耗考虑线性距离相关的路径损耗 $PL^{\text{FHPLC}}(d_{ij})$, 假设节点 i 以发射功率 P_{t_i} 向节点 j

发送数据,那么接收节点 j 处的接收信号功率 P_j 可以表示为

$$P_j = P_{i_j} - PL^{\text{FHPLC}}(d_{ij}) \times d_{ij}, \quad (9)$$

通过实际测量计算得出 $PL^{\text{FHPLC}}(d_{ij})$ 可能值的范围在 $40 \sim 100 \text{ dB/km}^{[16]}$ 。

影响电力线通信的主要因素是电力线脉冲噪声, FHPLC 噪声 n_p 是背景噪声 n_A 与脉冲噪声 n_1 的混合,服从伯努利-高斯模型^[17]:

$$n_p = n_A + b_p n_1, \quad (10)$$

式中: n_A 和 n_1 分别独立服从于均值为 0、方差为 σ_A^2 和 σ_1^2 的高斯分布; b_p 为伯努利随机变量($b_p=1$ 的概率为 ρ , $b_p=0$ 的概率为 $1-\rho$)。平均噪声功率 N_0^{FHPLC} 可表示为

$$N_0^{\text{FHPLC}} = \sigma_A^2(1 + \rho\eta), \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_A^2}. \quad (12)$$

因此当节点 i 以发射功率 P_i^{FHPLC} 向节点 j 发送数据时,接收节点 j 的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR) SNR_{ij}^{FHPLC} 可以表示为

$$SNR_{ij}^{\text{FHPLC}} = \frac{P_i^{\text{FHPLC}} \cdot |h_{ij}^{\text{FHPLC}}|^2 \cdot PL^{\text{FHPLC}}(d_{ij})}{N_0^{\text{FHPLC}}}. \quad (13)$$

显然,当 SNR_{ij}^{FHPLC} 大于等于一定的阈值 SNR_0^{FHPLC} 时,我们可以说节点 i 到节点 j 之间的 FHPLC 链路 $e_{i,j}$ 能够准确可靠地传输数据信息。定义一个二进制变量 $\gamma_{ij}^{\text{FHPLC}}$:

$$\gamma_{ij}^{\text{FHPLC}} = \begin{cases} 1, & SNR_{ij}^{\text{FHPLC}} \geq SNR_0^{\text{FHPLC}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \quad (14)$$

$A^{\text{FHPLC}} = [a_{ij}^{\text{FHPLC}}]_{N \times N}$ 为电力线网络的邻接矩阵, a_{ij}^{FHPLC} 为

$$a_{ij}^{\text{FHPLC}} = \begin{cases} 1, & \gamma_{ij}^{\text{FHPLC}} = 1 \\ 0, & i = j \\ \infty, & \gamma_{ij}^{\text{FHPLC}} = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

$R^{\text{FHPLC}} = [R_{ij}^{\text{FHPLC}}]_{N \times N}$ 为电力线网络的可靠性权值矩阵, R_{ij}^{FHPLC} 为

$$R_{ij}^{\text{FHPLC}} = \begin{cases} 1, & a_{ij}^{\text{FHPLC}} = 1 \\ 1, & i = j \\ 0, & a_{ij}^{\text{FHPLC}} = \infty \end{cases}. \quad (16)$$

2.1.3 路由路径可靠性

配电场域网中电力控制类业务 s_k 从源到目的节点的路由路径是由满足业务性能需求的节点和每对相邻节点间的链路组成的串联系统,所以业务 s_k 端到端路由路径 $p(k)$ 的可靠性 $R_{p(k)}$ 是节点和链路可靠性的乘积,可以表示为

$$R_{p(k)} = R_{n_m} \prod_{i=1}^{m-1} (R_{e_i} R_{n_i}), \quad (17)$$

式中: m 为路径 $p(k)$ 所经过的节点数; R_{e_i} 为第 i 条链路的可靠性; R_{n_i} 为第 i 个节点的可靠性; R_{n_m} 为第 m 个节点的可靠性。

业务 s_k 的路由路径 $p(k)$ 是否满足可靠性要求可由下面定义的决策变量 $E_{p(k)}$ 表示:

$$E_{p(k)} = \begin{cases} 1, & R_{p(k)} \geq R_{\min} \\ 0, & R_{p(k)} < R_{\min} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: $E_{p(k)}$ 为二进制变量, $E_{p(k)}=1$ 为业务 s_k 的路由路径 $p(k)$ 满足可靠性要求,否则为 $E_{p(k)}=0$; $R_{\min}$ 为基于业务 s_k 可靠性需求的可靠性阈值。

2.2 实时性分析

配电场域网中的电力控制类业务为端到端双向交互通信,对实时性、可靠性、丢包率以及安全性等性能要求非常高,因此满足此类业务的 QoS 需求(时延和可靠性等)对于设计可靠路由优化算法来说是必要的。配电场域网中的设施节点没有计算能力,只有信息转发功能。电力控制类业务数量大、较为固定且报文长度较小,影响时延的主要因素是跳数,为了分析起来方便一些,本文通过路由跳数对时延加以约束来达到更可靠传输的目的。

为每条业务分配一个决策变量 $X^k(i, j)$ 来表示业务 s_k 是否经过链路 $e_{i,j}$, 对于 k 条业务来说,有 k 个决策变量,定义如下:

$$X^k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{业务 } s_k \text{ 的路由经过链路 } e_{i,j} \\ 0, & \text{业务 } s_k \text{ 的路由未经过链路 } e_{i,j} \end{cases}. \quad (19)$$

显然,业务路由路径的跳数越多,业务端到端通信时延即消耗的时间就越长,路由的可靠性就会降低。因此,可靠路由的跳数 h_k 约束定义如下:

$$h_k = \sum_{n_i, n_j \in N} X^k(i, j) \leq h_{k\max}, \quad \forall k \in (1, K), \quad (20)$$

式中: $h_{k\max}$ 表示业务 s_k 可以容忍的跳数上限,一般情况下取 6。

业务 s_k 的路由路径 $p(k)$ 是否满足跳数要求可以由下式表示:

$$H_{p(k)} = \begin{cases} 1, & \sum_{n_i, n_j \in N} X^k(i, j) \leq h_{k\max} \\ 0, & \sum_{n_i, n_j \in N} X^k(i, j) > h_{k\max} \end{cases}, \quad (21)$$

式中: $H_{p(k)}$ 为决策变量, $H_{p(k)}=1$ 表示业务 s_k 的路由跳数 $h_{k\max}$ 满足跳数约束,否则为 $H_{p(k)}=0$ 。

2.3 问题建模

业务 s_k 的路由 $p(k)$ 的有效性 $A_{p(k)}$ 表示如下:

$$A_{p(k)} = H_{p(k)} \cap E_{p(k)}. \quad (22)$$

只有在满足电力控制类业务路由路径可靠性要求的前提下,同时满足跳数约束,才可以说路由路径 $p(k)$ 端到端传输成功,即 $A_{p(k)} = 1$,否则为 0。

本文以配电场域网为研究场景,以所有需要传输的电力控制类业务为研究对象,以最大化端到端业务同时传输成功的数量为优化目标,以单条业务的可靠性和跳数为约束来进行路由建模,目标函数如下:

$$\max \sum_{k=1}^K A_{p(k)}, \quad (23)$$

对于 $\forall k \in (1, K)$, 约束条件如下:

$$R_{p(k)} \geq R_{\min}, \quad (24)$$

$$\sum_{n_i, n_j \in N} X^k(i, j) \leq h_{k\max}, \quad (25)$$

$$\sum_{n_j \in N, e_{i,j} \in E} X^k(i, j) \leq 1, n_i \in p(k), \quad (26)$$

$$E_{p(k)} = \{0, 1\}, \quad (27)$$

$$H_{p(k)} = \{0, 1\}, \quad (28)$$

式中:对于业务 s_k 而言,约束条件(24)为可靠性约束,表示路由路径 $p(k)$ 的可靠性 $R_{p(k)}$ 须 $\geq R_{\min}$;约束条件(25)为路由跳数约束,表示业务 s_k 的路由跳数须 $\leq s_k$ 可以容忍的最大跳数 $h_{k\max}$;约束条件(26)为路径无环约束;约束条件(27)和(28)均为二进制变量。本模型的决策变量 $A_{p(k)}$ 、 $H_{p(k)}$ 和 $E_{p(k)}$ 只取 0 或 1,要实现最优化目标,对于每条业务来讲,可靠路由要尽可能满足约束条件。

3 配电场域网高可靠路由优化算法

考虑到配电场域网的特点,仅计算 MN 与网内其他各节点的路由,采用集中式路由, MN 具有全局网络视角,能够收集全网状态信息,统一进行路由计算并下达转发策略,对于控制类业务来说能够高效快速地寻找最可靠的路由^[18]。

本文提出了一种基于 Dijkstra 算法的高可靠路由优化算法,首先,根据网络中的 FHPLC 和 RF 链路是否满足各自的 SNR 和 SINR 条件确定配电场域网的拓扑连接关系,最优邻接矩阵 $\mathbf{A} = \min(q \times \mathbf{A}^{\text{RF}}, \mathbf{A}^{\text{FHPLC}})$,其中对无线网络的邻接矩阵 $\mathbf{A}^{\text{RF}}$ 中的权值按比例 q 进行放大,以确保在利用 Dijkstra 算法计算路由时优先选择 FHPLC 链路,同时可以对 RF 和 FHPLC 链路加以区分。这一步骤将筛选出不可靠的链路,保证通信的可靠性。默认在同时满足条件时, FHPLC 链路可靠性取 1,要比存在丢包

的 RF 链路更可靠,可靠性权值矩阵 $\mathbf{R} = \max(\mathbf{R}^{\text{RF}}, \mathbf{R}^{\text{FHPLC}})$ 。然后在通过上一步确定的配电场域网拓扑中利用 Dijkstra 算法寻找最可靠的路径,同时判断是否满足控制类业务可靠性和实时性需求,如若满足,则业务传输成功。本文中的路由算法考虑以 FHPLC 通信为主, RF 通信为辅,两种通信方式互为备份进行独立混合组网,同时采用独立路由的方式,选择最可靠的通信方式传输信息。

考虑如表 1 所示的基于可靠性优选的链路选择规则。

表 1 基于可靠性优选的链路选择规则

Table 1 Link selection rule based on reliability preference

序号	无线链路信道状态	载波链路信道状态	优选链路
1	$\text{SINR}_{ij}^{\text{RF}} \geq \text{SINR}_0$	$\text{SNR}_{ij}^{\text{FHPLC}} \geq \text{SNR}_0$	载波
2	$\text{SINR}_{ij}^{\text{RF}} < \text{SINR}_0$	$\text{SNR}_{ij}^{\text{FHPLC}} \geq \text{SNR}_0$	载波
3	$\text{SINR}_{ij}^{\text{RF}} \geq \text{SINR}_0$	$\text{SNR}_{ij}^{\text{FHPLC}} < \text{SNR}_0$	无线
4	$\text{SINR}_{ij}^{\text{RF}} < \text{SINR}_0$	$\text{SNR}_{ij}^{\text{FHPLC}} < \text{SNR}_0$	无

对于一个加权无向图 $\mathbf{G} = (\mathbf{N}, \mathbf{E})$, 节点个数 $n = |\mathbf{N}|$, 编号为 $[1 : n]$, 链路个数 $e = |\mathbf{E}|$ 。规定节点 1 为 MN, 求解 MN 到所有其他网内各节点的可靠路由, 那么控制类业务集合 $\mathbf{S}$ 中业务数 K 为 $n - 1$ 。求解可靠路由的具体步骤如下所示, 首先利用 Dijkstra 算法计算出每条业务 s_k 的一条高可靠路由路径 $p(k)$; 然后计算路由路径 $p(k)$ 的可靠性 $R_{p(k)}$ 以及路由跳数 h_k , 判断是否满足可靠性及跳数要求, 若都满足要求则业务 s_k 传输成功; 最后返回 K 个同时传输成功的业务数量 M 。此算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

算法: 基于 Dijkstra 算法的配电场域网高可靠路由优化算法

输入: 节点数目 n , 业务集合 $\mathbf{S}$, 邻接矩阵 $\mathbf{A}$, 可靠性权值矩阵 $\mathbf{R}$

输出: 每条业务 s_k 的路由路径 $p(k)$ 、路由跳数 h_k 以及可靠性 $R_{p(k)}$, 业务集合 $\mathbf{S}$ 同时传输成功的数量 M

1: 初始化 $M = 0$

2: for $s_k \in \mathbf{S}$ do

3: 通过邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 利用 Dijkstra 算法计算业务 s_k 的高可靠路由路径 $p(k)$

4: 计算业务 s_k 的路由跳数 h_k 以及可靠性 $R_{p(k)}$

5: if $R_{p(k)} \geq R_{\min} \& \& h_k \leq h_{k\max}$

6: 业务传输成功, $M = M + 1$

7: else

```
8:         业务传输失败
9:     end if
10: end for
11: return  业务集合  $S$  同时传输成功的数量  $M$ 。
```

4 仿真实验

本文提出的基于 Dijkstra 算法的配电场域网高可靠路由优化算法使用仿真软件 Matlabr2020a 进行验证,根据深圳友讯达科技公司在江苏省低压配电台区开展的一系列配电场域网相关测试工作得到的相关数据以及技术报告,仿真场景考虑环境 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 范围内随机生成节点,考虑以电力线和 470 MHz 无线为传输介质构成的主干通信网,所有节点都支持 FHPLC/ RF 双模混合通信,而且网络中需要传输的控制类业务对实时性和可靠性的要求极高。仿真实验假设 K 个控制类业务均为同时发起,配电场域网初始状态没有任何其他业务执行。仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter settings

参数	说明	取值
n	RF 路径损耗指数	4
$P_{\text{T}}^{\text{RF}}/\text{dBm}$	RF 节点发射功率	30
$N_0^{\text{RF}}/\text{dBm}$	AGWN 方差	-105
$\text{SINR}_0^{\text{RF}}/\text{dB}$	RF SINR 阈值	-12
$P_{\text{T}}^{\text{FHPLC}}/\text{dBm}$	FHPLC 节点发射功率	30
$PL^{\text{FHPLC}}(d_{ij})/\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	FHPLC 的路径损耗值	40
σ/dB	对数正态分布的标准差	3.5
ρ	伯努利-高斯噪声相关参数	3.27×10^{-3}
η	伯努利-高斯噪声相关参数	10
$\text{SNR}_0^{\text{FHPLC}}/\text{dB}$	FHPLC SNR 阈值	-10

随机生成的 15 节点配电场域网拓扑图如图 2 所示,分别为配电场域网、无线通信网络以及电力线网络,通过本文提出的高可靠路由算法使 MN 1 对节点 10 搜索最优通信路径,配电场域网中以 FHPLC 通信为主、RF 通信为辅的双模通信方式寻找到的最优通信路径为 1-11-8-5-10,RF 通信方式寻找的最优通信路径为 1-14-10,FHPLC 通信找到的最优通信路径为 1-11-8-5-10,可以看出,双模通信方式 MN 1 对节点 10 搜索最优通信路径与 FHPLC 通信找到的最优路径相同,符合本文中优先选择 FHPLC 进行传输的策略。虽然 RF 通信方式找到的最优通信路径跳数比双模通信方式要小,但经计

算此路径不满足可靠性要求。15 节点配电场域网同时传输 14 个控制类业务,分别对 MN 1 到其他子节点搜索最优路径,仿真计算得到配电场域网双模通信方式、RF 通信以及 FHPLC 通信传输成功数分别为 14、2 和 12,本文所提出的基于 Dijkstra 算法的配电场域网高可靠路由优化算法相比单一的通信方式,能够在提高网络节点覆盖率的同时保障业务的可靠性和传输成功率。

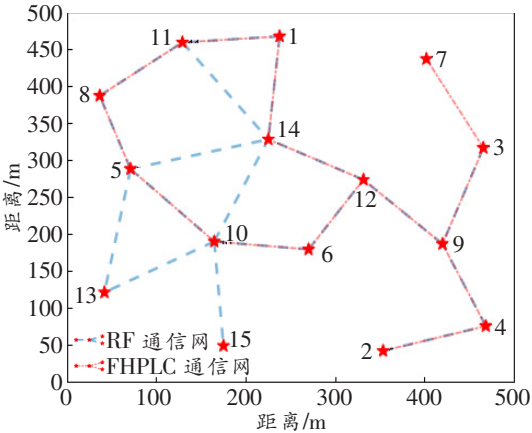


图 2 15 节点配电场域网拓扑图

Figure 2 15-node distributed field area network topology

图 3 对比了配电场域网、RF 通信网络以及 FHPLC 通信网络在不同网络规模情况下能够成功传输的业务数,仿真验证了 10、15、20 以及 25 节点网络拓扑的 NN 1 向所有其他子节点发送控制类业务,即业务数分别为 9、14、19 和 24 的情况下,配电场域网成功传输的业务数总是比单个通信网络要多,这是由于本文所提配电场域网高可靠路由优化算法能够结合 FHPLC 通信网络与 RF 通信网络的优势,确保 MN 能够与所有子节点建立可靠连接。

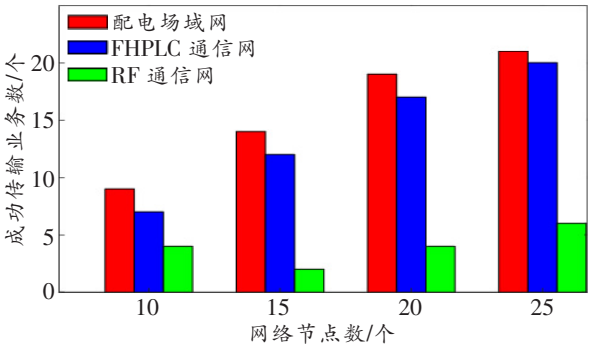


图 3 3 种通信网络在不同网络规模下成功传输的业务数

Figure 3 The number of services successfully transmitted by the three communication networks under different network scales

图 4 对比了配电场域网、RF 通信网络以及 FHPLC 通信网络在不同网络规模情况下找到的业

务路由路径对应的平均跳数变化,由图可知,配电场域网双模通信方式业务路由路径的平均跳数比其他两种单一的通信方式平均跳数要大一些,但都在路由跳数约束范围内。本文所述配电场域网高可靠路由算法在为控制类业务选择最佳路径时,并不是简单的以最小跳数为准则,而是结合混合路由表选择最可靠的路径进行传输,然后对路由路径进行可靠性和跳数约束判断,尽力满足业务可靠性和实时性需求。

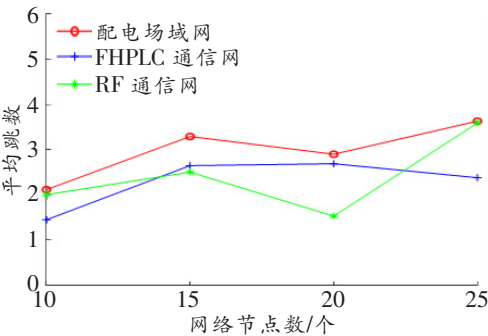


图 4 3 种通信网络在不同网络规模下对应的业务路由平均跳数

Figure 4 Average hops of service routes corresponding to three communication networks under different network scales

图 5 对比了配电场域网、RF 通信网络以及 FHPLC 通信网络在不同网络规模情况下业务路由路径对应的平均可靠性变化,从图可知,本文所提配电场域网高可靠路由优化算法找到的业务路由路径的平均可靠性总是比其他两种单一通信方式要高,这是因为本文所提路由算法在选择链路时总是选择最可靠的 FHPLC 链路进行传输,同时将 RF 链路作为互补通信方式,从而最大程度保证控制类业务的高可靠需求。单一的通信方式路由路径的可靠性

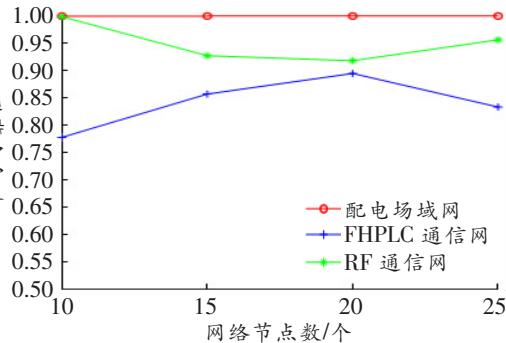


图 5 3 种通信网络在不同网络规模下对应的业务路由平均可靠性

Figure 5 Average reliability of service routing corresponding to three communication networks under different network scales

之所以会产生波动,是因为随着网络规模的增加,路由路径的跳数也会增加,因此路由路径的平均可靠性会呈下降趋势;但是在固定区域内随着网络规模的增加,节点分布密度会变大,孤立节点的数目会减少,路由路径的平均可靠性会增加,由于下降和增加的程度不一,造成了整体平均可靠性的波动变化。

图 6 所示为不同网络规模下高可靠路由优化算法与传统 Dijkstra 算法成功传输业务数对比图,由图可知,不同网络规模下本文所提高可靠路由优化算法比传统 Dijkstra 算法成功传输的业务数要多。这是由于该算法在每一步选择链路的时候都遵循最可靠的原则,这样就能够最大程度满足成功传输业务的可靠性约束条件。

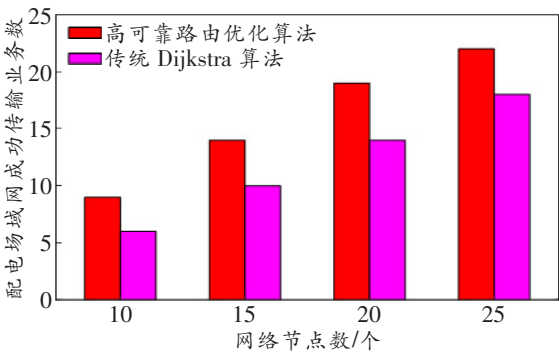


图 6 不同网络规模下高可靠路由优化算法与传统 Dijkstra 算法成功传输业务数

Figure 6 The number of services successfully transmitted by the high-reliability routing optimization algorithm and Dijkstra algorithm under different network scales

图 7 所示为不同网络规模下高可靠路由优化算法与传统 Dijkstra 算法平均可靠性对比图,由图可知,不同网络规模下本文所提高可靠路由优化算法比传统的 Dijkstra 算法寻找到的业务路由路径平均

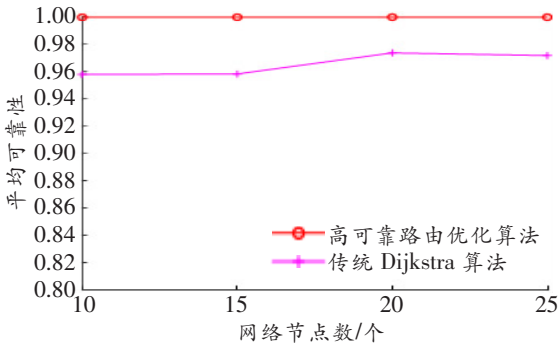


图 7 不同网络规模下高可靠路由优化算法与传统 Dijkstra 算法平均可靠性

Figure 7 Average reliability of highly reliable routing optimization algorithm and Dijkstra algorithm under different network scales

可靠性要高,这是因为本文所提算法首先将不可靠的链路筛选掉,其次优先选择 FHPLC 链路,保证了路由可靠性。可见无论是成功传输业务数还是业务平均可靠性,本文所提算法都是优于传统的 Dijkstra 算法的。

5 结束语

配电场域网通过 FHPLC 和 RF 两种通信方式进行通信,能够提高网络的连通能力、覆盖能力以及可靠性。本文提出了一种基于 Dijkstra 算法的高可靠、快速的路由优化算法,节点通过混合路由表自适应选择最可靠的通信链路传输数据。仿真结果表明,通过两种通信方式的优势互补,提高了配电场域网的覆盖能力、业务的传输成功率以及路由路径的平均可靠性。下一步应该结合配电场域网的多种业务类型进行可靠路由的研究。

参考文献:

- [1] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术,2019,43(5):1575—1585.
Wang Y, Chen Q X, Zhang N, et al. Fusion of 5G Communication and Ubiquitous Power Internet of Things: Application Analysis and Research Prospects[J]. Power Grid Technology, 2019, 43(5): 1575—1585.
- [2] 吕军,栾文鹏,刘日亮,等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. 电网技术,2018,42(10):3108—3115.
Lü J, Luan W P, Liu R L, et al. Architecture of Power Distribution Internet of Things based on Comprehensive Perception and Software Definition[J]. Power Grid Technology, 2018, 42(10): 3108—3115.
- [3] Selga J M, Zaballos A, Navarro J. Solutions to the Computer Networking Challenges of the Distribution Smart Grid[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3):588—591.
- [4] Lü P, Wang X, Yang Y, et al. Network Virtualization for Smart Grid Communications[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2):471—482.
- [5] Dib L, Fernandes V, Filomeno M, et al. Hybrid PLC/Wireless Communication for Smart Grids and Internet of Things Applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(2):655—667.
- [6] Stiri S, Chaoub A, Grilo A, et al. Hybrid PLC and LoRaWAN Smart Metering Networks: Modeling and Optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3):1572—1582.
- [7] 严佳慧. 电力线通信系统中多中继及电力线—无线协作通信技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2018.
Yan J H. Research on Multi-relay and Power Line-

- wireless Cooperative Communication Technology in Power Line Communication System [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [8] Kiedrowski P. Toward More Efficient and More Secure Last Mile Smart Metering and Smart Lighting Communication Systems with the Use of PLC/RF Hybrid Technology[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 2015(ID 675926):1—9.
- [9] Salvadori F, Gehrke C S, De Oliveira A C, et al. Smart Grid Infrastructure Using a Hybrid Network Architecture[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1630—1639.
- [10] Dubey A, Kundu C, Ngatched T, et al. Incremental Relaying for Power Line Communications: Performance Analysis and Power Allocation[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4):4236—4247.
- [11] Zheng L, Lu N, Cai L. Reliable Wireless Communication Networks for Demand Response Control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1):133—140.
- [12] 马立贤. 电力线载波与无线融合多信道传输技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
Ma L X. Research on Power Line Carrier and Wireless Converged Multi-channel Transmission Technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [13] 罗玄,补黔江,曾庆波,等. 用电采集系统微功率无线通信信道建模研究综述[J]. 电子设计工程,2018,26(23):130—133.
Luo X, Bu Q J, Zeng Q B, et al. Review of Research on the Micro-power Wireless Communication Channel Modeling for Power Acquisition Systems[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(23):130—133.
- [14] Müller C, Georg H, Putzke M, et al. Performance Analysis of Radio Propagation Models for Smart Grid Applications[C]//2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels, Belgium: IEEE, 2011:96—101.
- [15] Dubey A, Mallik R K. PLC System Performance with AF Relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6):2337—2345.
- [16] Hooijen O G. A Channel Model for the Residential Power Circuit Used as a Digital Communications Medium[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4):331—336.
- [17] Ma Y H, So P L, Gunawan E. Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):674—682.
- [18] 申敏,毛文俊,袁一铭,等. 基于 MIMO 电力线信道的定时同步算法[J]. 光通信研究,2022(2):18—21.
Shen M, Mao W J, Yuan Y M, et al. Timing Synchronization Method in MIMO Power Line Channel Communications[J]. Study on Optical Communications, 2022(2):18—21.