

基于电压差网络映射和后验概率校核的 低压配电网故障定位方法

李青杉¹, 徐凤乾¹, 赖秀炎¹, 冯洋¹, 伊长春¹, 郭建峰²

(1. 浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000; 2. 武汉大学 电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 针对低压配电网拓扑复杂而导致故障区段定位精度不高的问题, 提出了一种基于电压差网络映射和后验概率校核的故障区段定位方法。首先构造可达矩阵描述配电网拓扑结构, 以准确反映网络各节点的连通性; 根据故障前后节点电压的变化, 计算节点故障电压差并利用 K 均值聚类算法对故障电压差进行聚类, 得到故障电压差矩阵; 通过推导可达矩阵和故障电压差矩阵的关系计算线路区段状态矩阵, 最后采用马尔可夫链蒙特卡罗 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 算法计算各区段故障的后验概率, 对所得故障区段判定结果进行校核。多个配电网中算例结果表明, 所提方法在不同配电网拓扑结构下的单一故障识别率达 100%, 在相同条件下相较于传统方法收敛速度提高了 40%, 显著提高了故障区段定位的准确性和可靠性。

关键词: 低压配电网; 故障区段定位; 电压差网络映射; K 均值聚类算法; 马尔可夫链蒙特卡罗算法

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.015

中图分类号: TM726

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0146-12

Fault localization method for low-voltage distribution network based on voltage difference network mapping and posterior probability verification

LI Qingshan¹, XU Fengqian¹, LAI Xiuyan¹, FENG Yang¹, YI Changchun¹, GUO Jianfeng²

(1. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, Zhejiang, China. 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the problem that the topology of low-voltage distribution network is complex and leads to low fault segment localization accuracy, a fault segment localization method based on voltage difference network mapping and a posterior probability checking is proposed. Firstly, a reachable matrix is constructed to describe the topology of the distribution network to accurately reflect the connectivity of each node of the network; according to the change of the node voltage before and after the fault, the node fault voltage difference is calculated and clustered using the K -mean clustering algorithm to obtain the fault voltage difference matrix; the line segment state matrix is calculated by deducing the relationship between the reachable matrix and the fault voltage difference matrix. Finally, the Markov chain Monte Carlo (MCMC) algorithm is used to calculate the a posterior probability of faults in each segment, and the results of fault segment determination are checked. The results of several examples in distribution network show that the proposed method achieves a single fault recognition rate of 100% under different distribution network topologies. Under the same conditions, compared with the traditional methods, the convergence speed is increased by 40%, significantly improving the accuracy and reliability of fault segment localization.

Keywords: low-voltage distribution network, fault segment localization, voltage difference network mapping, K -mean clustering algorithm, Markov chain Monte Carlo algorithm

0 引言

随着经济的持续发展和人民生活水平的提升, 电力需求日益增加, 作为电网中的“最后一公里”环

节, 配电系统肩负着保障安全稳定供电的重要责任^[1-2]。当配电网发生故障后, 需要尽快抢修恢复供电。但是由于目前 380 V 低压配电网的复杂性, 用户数量庞大且分支线路众多, 不能快速定位短路故障点, 而配电网单相接地故障占配电网故障的绝

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211QZ240006)

大多数^[3],其中大部分故障点隐秘难寻,这不仅降低了抢修效率,延长了用户停电时间,还会对用户的生活质量和生产秩序产生影响^[4]。

分布式电源(distributed generation, DG)的分散接入促使低压配电网从传统的被动配电系统逐步转型为更具主动性的有源配电网。该类型配电网的特点包括拓扑结构的复杂性、运行方式的灵活性、潮流的双向多变性以及DG出力的不确定性。这些特性使得其故障特征与传统配电网相比存在显著差异,从而使得现有的配电网继电保护更容易发生误动或拒动^[5-8]。通过合理应用智能故障区段定位技术,运行人员能够迅速确定故障位置,从而快速恢复受损电力线路的正常运行。随着线路终端单元(line terminal unit, LTU)等终端设备在配电网中的日益普及,系统主站能够实时查看并分析配电网的运行数据。国内外研究者也围绕基于终端反馈信息的故障区段定位展开了广泛的研究^[9-14]。

当前,低压故障区段定位研究主要包括传统理论模型和智能优化模型两大类,分别在低压配电网中发挥了重要作用。传统理论模型如模糊集理论和证据融合理论通过理论分析和数据融合提高了故障检测的准确性。文献[1]运用了模糊集理论,计算了与报修客户相关的低压开关的开断概率,在低压故障信息漏报和误报的情况下,实现了低压故障定位。文献[2]采用了基于全电流方向特征的低压配电网故障定位方法,利用电流全波有效值和故障电流相位对故障判据进行了改进,提高了判定故障信息的快速性和抗干扰性。文献[4]采用证据融合理论,分析LTU和配变告警信息,动态生成关联矩阵,利用遗传算法求解实现故障定位。文献[5]采用了一种适用于低压有源配电网的在线故障区间定位与识别方法,根据测量所得电流相角差值实现故障区段快速定位。文献[15]采用正序电压差作为故障定位判据,引入DG输出电流作为辅助判据提出了含DG配电网的断线接地复合故障定位方法。

与传统方法相比,智能优化模型通过先进的计算和优化技术在提高定位精度和效率方面取得了显著进展。文献[9]基于现有的有源配电网故障定位模型,利用商业求解器求解增加了信号丢失约束的适应度函数,改善故障定位方法。文献[10]采用基于时间递归神经网络长短期记忆(long short-term memory, LSTM)的深度学习筛选法对告警数据进行

预处理和分析,并将结果输入到故障定位模型中进行精确定位,提升了故障研判准确度和配网故障抢修效率。文献[12]通过采用极点分解(extreme-point symmetric mode decomposition, ESMD)算法对获取的故障行波信号进行处理,并利用Teager能量算子对分解后的信号进行差分分析,从而实现故障行波波头的精确识别。该文提出了一种基于故障行波折射和反射信号的定位方法,有效提升了配电网多分支线路的故障定位准确性。文献[14]提出了基于径向基函数(radial basis function neural network, RBF)神经网络的配电网故障诊断模型,并采用改进的D-S证据理论对模糊结果进行融合确定故障相。文献[16]提出了基于拓扑邻接矩阵的低压配电网故障区段定位方法,使用粒子群优化算法进行最短路径模型求解,能够有效提高故障定位的效率和准确度。

以上方法虽然在处理标准故障定位问题上表现良好,但往往在处理复杂动态系统和监测数据不确定性时仍存在局限性。为此,文中在传统理论模型和智能优化模型的基础上,提出了一种基于可达矩阵和K均值聚类算法的综合故障区段定位方法,结合马尔可夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)算法进行动态后验概率估计。该方法利用电压差的变化与节点连通性相结合来定位故障区段。电压差的显著变化可以反映节点与故障点的关联程度,而可达矩阵用于描述系统中各节点之间的拓扑关系,以此来识别并定位可能发生故障的区段。结合电压差矩阵,可进一步通过K均值聚类算法对电压差进行聚类分析,从而有效区分出受故障影响严重的区域与正常区域。最终,本文通过矩阵运算得出的线路区段状态矩阵L反映了每一个区段是否处于故障状态,并通过多个算例验证了文中所提故障区段定位方法的正确性和有效性。

1 故障区段定位系统

故障区段定位系统是一个综合性的电力监控与诊断平台,旨在实时检测、分析和定位配电网中的故障。系统架构包括数据采集、数据处理和故障诊断三大模块,各模块紧密协作,实现从数据收集到故障区段定位的全过程自动化。系统框架采用Spring Boot和Spring Cloud,以实现微服务架构。Spring Boot提供快速构建和配置服务的能力,Spring Cloud提供分布式系统的解决方案,如服务注册与发现、负载均衡、配置管理等。系统部署在云平台

上,具备高可用性和良好的扩展能力。系统数据通过调用云平台接口进行更新,各模块会定期或在特定事件发生时,向外部数据源发出请求以获取最新数据。这些数据经过数据采集与处理模块的处理,确保其准确和及时,然后交由故障诊断模块进行分析。故障诊断模块借助配电自动化主站系统平台,构建了一套基于多源数据的配电网故障诊断体系。通过融合馈线信息、母线数据、故障指示器信息以及配变信息等多种数据源,实现配电网故障区段的

准确定位^[15-18]。

图 1 为配电自动化主站低压故障区段定位系统的界面,包括实际总负荷、正常运行线路、故障线路等关键监测数据,以及不同区域的故障和订单统计图表。这些数据通过调取云平台接口实现更新,确保系统能够实时反映配电网的运行状态和故障情况。系统还支持自定义报警设置,当检测到异常情况时,能够及时向运维人员发出报警通知,进一步保障了配电网的安全稳定运行。

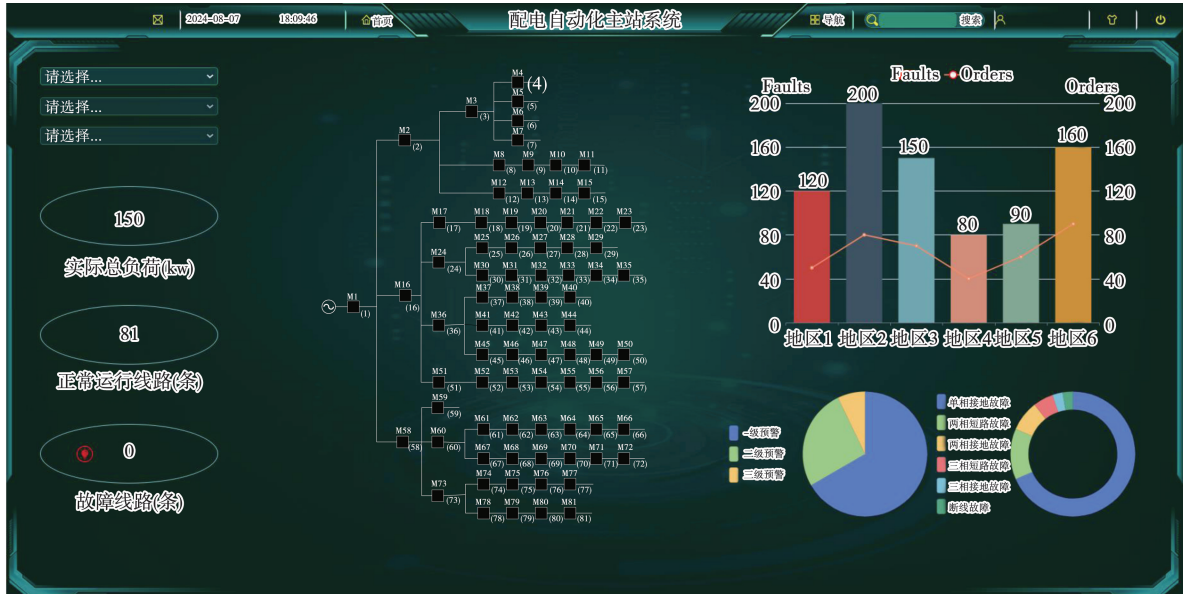


图 1 低压配电网故障区段定位系统界面

Fig. 1 Interface of low voltage distribution network fault segment localization system

图 2 为故障区段定位的流程图,用于描述从数据输入到最终确定故障区段的计算步骤,直观地展示了故障定位过程的各个关键步骤及其相互关系。主要包括输入配电网参数、构建可达矩阵和电压差矩阵、进行故障电压差分析、应用马尔可夫链蒙特卡罗算法计算后验概率,最后确定故障区段的位置。

2 故障区段定位算法

文中首先利用电压差网络映射进行故障区段定位,即通过分析电压差变化来构建配电网故障区段定位模型。其中,可达矩阵用于描述网络节点之间的连通性,而电压差矩阵则用于描述同一节点在故障前后的电压变化及其与故障区段的关联性。通过结合这两种矩阵,电压差网络映射可直观地识别和定位故障区段。

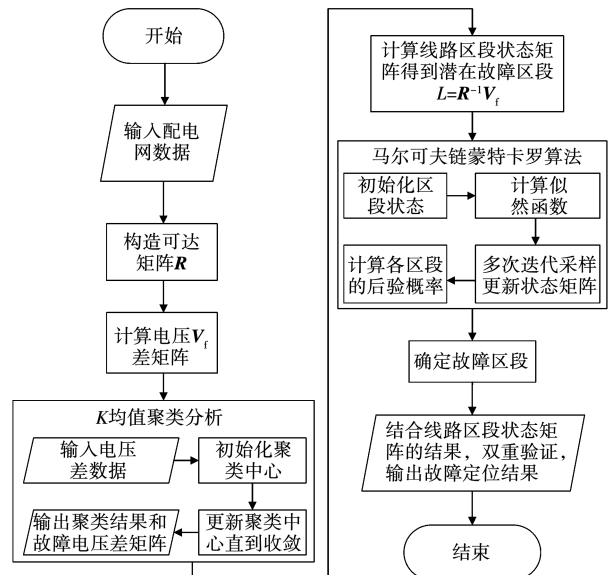


图 2 故障区段定位流程图

Fig. 2 Fault segment location flowchart

2.1 可达矩阵

可达矩阵用于表示拓扑图中各节点之间的可达关系^[19],而在配电网中,该矩阵可直观展示各节点(如变压器、配电箱、用户等)之间的连通情况。当网络中某个区段发生故障时,通过分析可达矩阵可确定可能受到影响的节点,以缩小故障区段定位的范围。规定主电源向系统供电的潮流方向为正方向,可达矩阵元素的定义如下:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 沿正方向到达节点 } j \text{ 或 } i=j \\ 0, & i \text{ 沿正方向无法到达节点 } j \end{cases} \quad (1)$$

在图 3 所示简单配电网中,共有 10 个节点和 10 条线路区段,区段(10)接入了分布式电源,各节点均配置了 LTU。

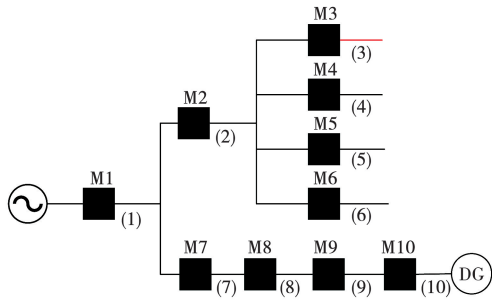


图 3 简单配电网拓扑图

Fig. 3 Simple distribution network topology

图 3 的可达矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 故障电压差矩阵

配电线路发生故障时,故障点附近的节点电压将异常,因此可通过监测这些电压的变化来确定故障位置。设配电网某处发生故障,使用智能电能表和相量测量单元(phasor measurement units, PMU)收集数据,可得到各节点在故障前后的电压差值^[20-21]:

$$\Delta V_{i, \text{fault}} = V_{\text{pre-fault}, i} - V_{\text{post-fault}, i} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{pre-fault}, i}$ 为故障前节点 i 的电压; $V_{\text{post-fault}, i}$ 为故障后节点 i 的电压。

在低压配电网故障区段定位过程中,由于故障模式复杂多样,传统定位方法往往效率不高且适应性差,尤其在数据缺乏、环境噪声干扰大、故障类型多样时。文中采用 K 均值聚类算法对故障数据进行分析 and 处理。聚类分析是数据挖掘的重要任务之一,属于无监督学习,无需训练过程且高效直观,具体实现步骤如下:

1) 以监测到的各节点故障电压差值 $\Delta V_{i, \text{fault}}$ 作为 K 均值聚类算法的输入;

2) 设置聚类数目 $K=2$,将区段划分为潜在的故障区段和非故障区段;故障电压差数据中取最小值为 ΔV_{\min} ,取最大值为 ΔV_{\max} ,在 $[\Delta V_{\min}, \Delta V_{\max}]$ 区间内随机生成两个值作为初始聚类中心,分别是 u_1 和 u_2 ,表示故障电压差值在两类区段中的初始聚类中心。

3) 找出距离每个故障电压差值最近的聚类中心,并将其归类。

$$d(\Delta V_i, u_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\Delta V_{ik} - u_{jk})^2} \quad (4)$$

式中: ΔV_{ik} 为节点 i 在第 k 个维度的故障电压差值; u_{jk} 为第 j 个聚类中心在第 k 个维度的值; $d(\Delta V_i, u_j)$ 表示第 i 个故障点与第 j 个聚类中心之间的距离。

对于一维数据,距离公式简化为:

$$d(\Delta V_i, u_j) = |\Delta V_i - u_j| \quad (5)$$

式中: ΔV_i 为节点 i 的故障电压差值; u_j 为第 j 个聚类中心值。

4) 更新聚类中心:计算归类后每个聚类的所有故障电压差值的平均值,形成新的聚类中心。

$$u_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{\Delta V_i \in C_j} \Delta V_i \quad (6)$$

式中: C_j 指第 j 个聚类(即簇), $|C_j|$ 为簇 C_j 中的数据点数量。

5) 迭代计算:继续进行数据聚类,更新聚类中心,直到聚类中心数值收敛。

$$\|u_j^{(t+1)} - u_j^{(t)}\| < \epsilon \quad \forall j \quad (7)$$

式中: $u_j^{(t+1)}$ 和 $u_j^{(t)}$ 分别表示第 $t+1$ 次迭代和第 t 次迭代时第 j 个聚类中心的位置; ϵ 为一个非常小的正数,表示收敛阈值。

6) 输出结果:聚类中心收敛后,计算两个聚类中心的中点作为阈值。

$$\theta = \frac{|u_1| + |u_2|}{2} \quad (8)$$

7) 输出电压差矩阵:根据阈值 θ ,将各节点故障电压差值 ΔV_i 转化为二值矩阵,也就是故障电压差矩阵。

$$V_f = \begin{cases} 1 & \text{若 } |\Delta V_i| \geq \theta \\ 0 & \text{若 } |\Delta V_i| < \theta \end{cases} \quad (9)$$

2.3 线路区段状态矩阵 L

以 $L = [L_1 L_2 L_i L_n]^T$ 列矩阵表示线路区段状态矩阵^[22-23], L_i 的定义为:

$$L_i = \begin{cases} 1 & \text{线路区段故障} \\ 0 & \text{线路区段正常} \end{cases} \quad (10)$$

L_i 表示第 i 个线路区段,式(10)中表示线路区段故障状态定义为1,线路区段正常状态定义为0。文中通过推导 R 、 V_f 、 L 之间的关系,得出线路区段状态矩阵 L 的表达式,从而进行故障区段定位^[13]。

若线路区段 L_i 出现故障,其他正常线路区段的状态值均为0,它们分别与可达矩阵中对应元素之积也为0;只有沿正方向可到达节点 i 的节点 j 对应的可达矩阵元素 R_{ij} 与故障区段的状态值 L_i 乘积为1,故实际上是反映节点 j 的下游是否有线路区段发生故障^[13],因此可以总结出:

$$\begin{cases} R_{11}L_1 + R_{12}L_2 + R_{13}L_3 + \dots + R_{1i}L_i + \dots + R_{1n}L_n = V_1 \\ R_{21}L_1 + R_{22}L_2 + R_{23}L_3 + \dots + R_{2i}L_i + \dots + R_{2n}L_n = V_2 \\ R_{31}L_1 + R_{32}L_2 + R_{33}L_3 + \dots + R_{3i}L_i + \dots + R_{3n}L_n = V_3 \\ \vdots \\ R_{i1}L_1 + R_{i2}L_2 + R_{i3}L_3 + \dots + R_{ii}L_i + \dots + R_{in}L_n = V_i \\ \vdots \\ R_{n1}L_1 + R_{n2}L_2 + R_{n3}L_3 + \dots + R_{ni}L_i + \dots + R_{nn}L_n = V_n \end{cases} \quad (11)$$

基于可达矩阵 R 和故障电压差矩阵 V_f ,将式(11)转换为矩阵运算,建立关系式:

$$RL = V_f \quad (12)$$

由于:

$$\det(R) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0 \quad (13)$$

故可达矩阵可逆。对式(12)左乘可达矩阵 R 的逆阵得到线路区段状态矩阵 L ^[24]:

$$R^{-1}RL = R^{-1}V_f \quad (14)$$

$$L = R^{-1}V_f \quad (15)$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot V_f \quad (16)$$

3 容错处理

在配电网故障区段定位中,由于运行环境的复杂和数据的不确定性,仅依靠单一的分析方法无法确保区段定位的准确性。文中通过采用后验概率验证的手段来进一步提高系统的容错性和鲁棒性。

3.1 后验概率

后验概率验证是一种基于统计学原理的方法,通过结合先验信息和观测数据来推断故障发生的可能性,尤其是在配电网存在复杂性和数据不确定性的情况下,提供更可靠的故障区段定位结果。文中采用下式计算后验概率:

$$P(L_i | V_f) = \frac{P(L_i)P(V_f | L_i)}{\sum_{L_k \in \Omega, L_i=1} P(L_k)P(V_f | L_k)} \quad (17)$$

其中,后验概率 $P(L_i | V_f)$ 表示在观测到电压差矩阵 V_f 后,某个区段 L_i 属于故障区段的概率; $P(L_i)$ 为先验概率,表示直接判断区段 L_i 属于故障区段的概率; $P(V_f | L_i)$ 为条件概率,表示在区段 L_i 属于某个特定状态时观测到 V_f 的概率,同时也在贝叶斯推断中作为似然函数使用; $\sum_{L_k \in \Omega, L_i=1} P(L_k)P(V_f | L_k)$ 表示所有可能区段状态的似然函数和先验概率的乘积的总和,称为边缘似然^[25-27]。

在故障区段定位中, L 表示某个线路区段发生故障, V_f 表示终端设备反馈的信息。通过后验概率计算,可以根据终端设备反馈的信息动态调整节点发生故障的概率,从而提高故障区段定位的准确性。

由于 $\sum_{L_k \in \Omega, L_i=1} P(L_k)P(V_f | L_k)$ 表示所有可能的

区段状态下观测到 V_f 的总概率,对于所有可能的 L_i 都相同,其结果是一个常数,只影响比例关系,不影响最终判断, $\sum_{L_k \in \Omega, L_i=1} P(L_k)P(V_f|L_k)$ 可以忽略,后验概率简化为比例关系:

$$P(L_i|V_f) \propto P(L_i)P(V_f|L_i) \quad (18)$$

又设 n 个区段发生故障的先验概率为均匀分布,即 $P(L_i) = 1/n$,在相对比较时可忽略相同的先验概率,进一步简化后验概率为比例关系:

$$P(L_i|V_f) \propto P(V_f|L_i) = \left(\prod_{j=1}^n P(V_{fi}|L_i) \right) \quad (19)$$

式(19)提供了计算各区段后验概率的直接方法,后验概率与条件概率成正比,因此可通过不同区段 L_i 对 V_f 影响的条件概率来判断故障区段。然而,直接计算受限于模型复杂性和计算量,通常将条件概率简化为固定值,如式(20)。这种简化降低了计算复杂度,但可能导致不同区段间的后验概率差异不明显,难以准确区分故障区段。

因此,在处理复杂的故障定位问题时,引入 MCMC 算法,通过动态迭代逼近全局最优解,更准确地定位故障区段。

3.2 MCMC

MCMC 算法^[28-31]作为一种有效的贝叶斯后验概率推断工具,能够在复杂系统中逐步逼近真实的后验概率分布。

MCMC 算法的核心思想是通过构建一个马尔可夫链,从目标分布(即后验分布)中抽样。它通过一个随机状态 x 作为起始点,通过迭代不断更新状态 x 。最终, x 成为一个从目标分布 $p(x)$ 中抽出的(接近)接近目标真实分布的样本。在这个过程中,虽然 DG 输出的不确定性会使系统节点电压会出现随机波动,但在构建故障电压差矩阵 V_f 时,这些波动已被包含在测量数据中,反映了故障和 DG 出力共同引起的电压变化。

在配电网故障区段定位中,目标函数是估计每个区段发生故障的后验概率。MCMC 算法通过构建一个马尔可夫链,通过随机初始化线路状态,每次随机选择线路区段并进行状态切换,计算似然比决定是否接受新状态。经过足够的迭代后,马尔可夫链趋于稳定,其生成的样本逼近系统的后验概率分布,从而得到每个区段的故障概率。具体步骤如下:

1) 初始数据:输入得到的故障电压差矩阵 V_f 、随机初始化区段状态 L 。

2) 定义条件概率:

$$\begin{cases} P(V_{fi}=1|L_i=1) = 0.9 \\ P(V_{fi}=1|L_i=0) = 0.1 \\ P(V_{fi}=0|L_i=1) = 0.1 \\ P(V_{fi}=0|L_i=0) = 0.9 \end{cases} \quad (20)$$

式中: L_i 表示第 i 个区段的状态;1 表示该区段发生故障;0 表示该区段未发生故障^[32]; V_{fi} 表示第 i 个节点的故障电压差转化为二值矩阵后的值, P 表示概率。

尽管这里设定的条件概率反映不同区段 L_i 对 V_f 的影响是固定的,但是 MCMC 的优势在于它通过状态转移和多次迭代,能够在全局范围内优化后验概率估计。

3) 计算似然函数:似然函数 $P(V_f|L)$ 表示在给定区段状态 L 下观测到故障电压差矩阵 V_f 的概率。根据条件概率,可以写成:

$$P(V_f|L) = \prod_{i=1}^n P(V_{fi}|L_i) \quad (21)$$

4) MCMC 迭代过程:每次迭代,随机选择一个区段切换状态(从 0 变为 1,或从 1 变为 0),计算当前状态和新状态的似然函数,计算似然比 r :

$$r = \frac{P(V_f|L_{\text{new}})}{P(V_f|L_{\text{current}})} \quad (22)$$

根据 r 决定是否接受新状态。如果 $r \geq 1$,接受新状态;否则,以概率 r 接受新状态。

5) 统计样本:通过记录每个区段 L_i 状态为 1 的次数,计算各个区段的后验概率,根据各个区段后验概率的大小比较来验证前面得到的线路区段状态矩阵 L 中判断出的故障区段是否正确。

4 算例分析

以如下多个不同复杂程度的低压配电网拓扑作为算例,文中通过线路区段状态矩阵 L 判断故障区段位置,通过目标函数后验概率验证故障区段位置是否判断准确。

4.1 算例 1

算例 1 配电网拓扑如图 3 所示,各节点故障前后电压差如表 1 所示。

随机选择初始聚类中心为 $\mu_1^{(0)} = 5 \text{ V}$ 和 $\mu_2^{(0)} = 15 \text{ V}$,由式(5)计算得各节点电压差与初始聚类中心的距离如表 2 所示。

表 1 故障前后的节点电压

Tab. 1 Pre-fault and post-fault node voltage

节点	故障前电压/V	故障后电压/V	故障电压差/V
M1	383.45	388.68	5.23
M2	381.23	395.68	14.45
M3	384.56	401.45	16.89
M4	386.78	394.45	7.67
M5	380.12	375.78	-4.34
M6	382.23	378.56	-3.78
M7	377.89	372.33	-5.56
M8	388.45	395.34	6.89
M9	385.67	391.12	5.45
M10	384.23	381.31	-2.92

表 2 各节点电压差值到聚类中心的距离

Tab. 2 Distance between each node voltage difference and the clustering centroid

ΔV_i	$d(\Delta V_i, \mu_1^{(0)})$	$d(V_i, \mu_2^{(0)})$
5.23	0.23	9.77
14.45	9.45	0.55
16.89	11.89	1.89
7.67	2.67	7.33
-4.34	9.34	19.34
-3.78	8.78	18.78
-5.56	10.56	20.56
6.89	1.89	8.11
5.45	0.45	9.55
-2.92	7.92	17.92

根据表 2 计算结果对两个初始聚类中心分配数据,并根据分配的数据更新聚类中心,直至聚类中心收敛得, $\mu_1^{(2)} = 1.08$ V 和 $\mu_2^{(2)} = 15.67$ V,并可计算阈值 $\theta = 8.375$ V。

由式(9)将故障电压差值 ΔV 转化为故障电压值矩阵 V_f ,如表 3 所示。

将故障电压差矩阵 V_f 代入式(16),计算得到线路区段状态矩阵 $L = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$,可知 $L_3 = 1$ 为可能故障区段。

配电网故障定位中,传统的确定性方法虽然能够快速定位故障区段,但在噪声环境下容易产生误判。为提高复杂环境下故障诊断的可靠性,本文在融合先验知识和实时观测数据的基础上,通过 MC-MC 算法对后验概率进行采样计算,能够在一定程度上弥补传统确定性方法在不确定环境下的不足,

提高故障区段定位的鲁棒性和精度。

表 3 电压差值及故障判断表

Tab. 3 Voltage difference and fault determination table

$\Delta V/V$	$ \Delta V /V$	V_f
5.23	5.23	0
14.45	14.45	1
16.89	16.89	1
7.67	7.67	0
-4.34	4.34	0
-3.78	3.78	0
-5.56	5.56	0
6.89	6.89	0
5.45	5.45	0
-2.92	2.92	0

将随机生成的一个线路区段状态矩阵 $L = [0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]^T$ 与故障电压差矩阵 $V_f = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 代入式(21),计算得 $P(V_f | L) = 0.1^3 \times 0.9^7 = 0.000\ 478\ 296\ 9$,再根据式(22)迭代,记录每次迭代后区段的状态,统计各区段状态为 1 的次数,所得后验概率如表 4 所示。

表 4 区段后验概率

Tab. 4 Line segment posterior probability

节点	后验概率
M1	0.099 6
M2	0.892 4
M3	0.893 2
M4	0.099 5
M5	0.108 5
M6	0.104 2
M7	0.094 0
M8	0.110 4
M9	0.095 5
M10	0.090 0

根据 MCMC 算法所得的后验故障概率分布,区段 3 的故障概率值达到 0.893 2,高于其余区段的概率水平,表明区段 3 是最有可能发生故障的区段。这一结果与线路区段状态矩阵中的状态一致,表明线路区段状态矩阵 L 判断的故障区段正确,验证了文中故障区段判断方法的有效性。

4.2 算例 2

算例 2 系统拓扑如图 4 所示,包括 81 个节点和 81 条线路区段,区段(15)、(50)、(77)接入了分布式电源,各节点均配置了 LTU。

表 5 算例 2 各节点后验概率

Tab. 5 Posterior probability of each node in example 2

节点	概率	节点	概率	节点	概率	节点	概率	节点	概率	节点	概率
M1	0.067 7	M15	0.199 7	M29	0.064 1	M43	0.059 2	M57	0.091 5	M71	0.117 3
M2	0.106 3	M16	0.161 6	M30	0.108 8	M44	0.121 7	M58	0.102 0	M72	0.165 7
M3	0.150 2	M17	0.072 4	M31	0.092 9	M45	0.095 8	M59	0.191 2	M73	0.129 2
M4	0.098 3	M18	0.098 9	M32	0.061 1	M46	0.080 6	M60	0.150 1	M74	0.196 8
M5	0.115 7	M19	0.038 5	M33	0.131 9	M47	0.136 9	M61	0.200 2	M75	0.101 4
M6	0.069 3	M20	0.110 8	M34	0.073 6	M48	0.911 8	M62	0.141 3	M76	0.135 6
M7	0.067 2	M21	0.107 3	M35	0.041 7	M49	0.928 8	M63	0.173 0	M77	0.056 7
M8	0.106 5	M22	0.176 6	M36	0.100 9	M50	0.102 5	M64	0.187 8	M78	0.075 2
M9	0.130 9	M23	0.103 8	M37	0.128 9	M51	0.138 2	M65	0.099 9	M79	0.078 2
M10	0.081 5	M24	0.027 2	M38	0.082 8	M52	0.100 9	M66	0.103 2	M80	0.116 3
M11	0.032 5	M25	0.158 4	M39	0.071 3	M53	0.045 1	M67	0.097 0	M81	0.205 2
M12	0.101 2	M26	0.126 5	M40	0.063 3	M54	0.088 2	M68	0.051 7		
M13	0.071 0	M27	0.098 8	M41	0.138 8	M55	0.088 0	M69	0.049 5		
M14	0.078 7	M28	0.083 8	M42	0.194 4	M56	0.076 4	M70	0.072 3		

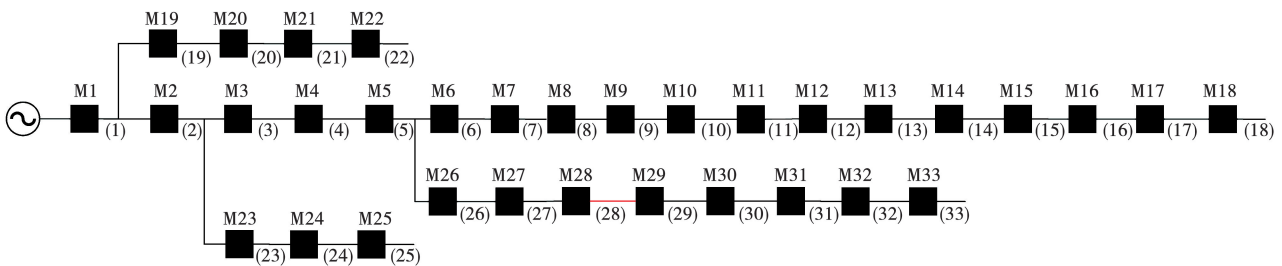


图 5 IEEE-33 节点系统拓扑图

Fig. 5 IEEE-33 node system topology

表 6 算例 3 各节点后验概率

Tab. 6 Posterior probability of each node in example 3

节点	概率	节点	概率	节点	概率
M1	0.096 4	M12	0.098 7	M23	0.101 2
M2	0.095 4	M13	0.092 9	M24	0.081 6
M3	0.102 7	M14	0.098 9	M25	0.106 7
M4	0.092 8	M15	0.094 9	M26	0.894 1
M5	0.098 3	M16	0.098 5	M27	0.106 2
M6	0.103 9	M17	0.092 0	M28	0.901 7
M7	0.102 5	M18	0.098 9	M29	0.102 8
M8	0.105 1	M19	0.101 2	M30	0.095 5
M9	0.100 8	M20	0.114 8	M31	0.091 6
M10	0.108 2	M21	0.093 0	M32	0.095 5
M11	0.090 9	M22	0.093 4	M33	0.091 6

其中区段 28 的后验概率 $P(L_{28} | V_f) = 0.901 7$ 最大,进一步验证了线路区段状态矩阵 L 对故障区段判断的准确性。

图 6 展示了传统的粒子群算法的计算结果。粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法的适应度在迭代过程中呈现出明显的阶梯式增长,最终在第 80 次迭代时逐渐趋于平稳,适应度值为 0.875 89。这表明 PSO 在迭代初期能够快速找到较优的解,但由于适应度函数未能有效区分唯一的故障区段,导致最终的最优解包含多个潜在故障区段,存在故障区段定位的不确定性。

表 7 对 PSO 算法与文中方法在故障定位性能上的主要指标进行了对比,包括标记故障节点数、单一故障识别率和迭代次数。

PSO 算法在多次实验中标记了 7 个故障区段,单一故障识别率为 14.3%,表现出定位不确定性。相比之下,文中所提算法在单电源辐射状配电网以及少数分布式电源接入的配电网的所有实验中均唯一确定故障区段,单一故障识别率达 100%,显著优于 PSO 算法。

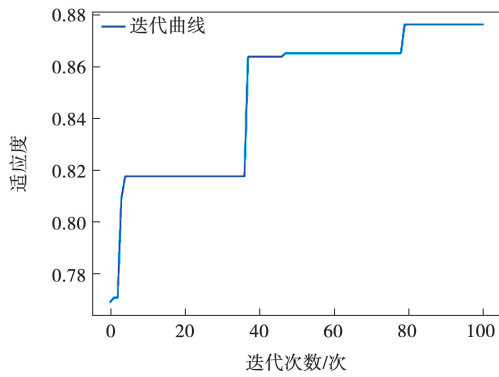


图 6 PSO 算法在算例 3 中的适应度收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of fitness for PSO algorithm in case 3

表 7 PSO 算法与本文方法的故障定位结果对比
Tab. 7 Comparison of fault location results between PSO algorithm and the proposed method

指标	PSO 算法	本文算法
标记故障的节点数/个	7	1
单一故障识别率/%	14.3	100
最优节点后验概率	—	0.901 7
迭代次数/次	87	35

综上,文中提出的算法在唯一性、准确性和计算效率方面均优于 PSO 算法,具有显著的应用潜力。

5 结 论

文中为解决配电网故障区段定位中的复杂动态系统处理和系统不确定性问题,通过综合运用可达矩阵、K 均值聚类算法以及 MCMC 算法,提出了一种创新的故障区段定位方法。

1) 文中提出的故障区段定位方法采用了蕴含信息量更大的可达矩阵而非传统的邻接矩阵,以更全面、全局可观的方式描述网络拓扑。结合 K 均值聚类算法对电压差数据进行处理,使得故障电压差二值矩阵的构建更加准确,显著提升了故障区段定位的精度和可靠性;

2) 引入 MCMC 算法进行后验概率评估,马尔可夫链蒙特卡罗采样通过生成一个平稳分布为目标后验分布的马尔可夫链来实现参数抽样,并用抽样生成的离散样本来近似目标后验分布,这是一种用于逼近目标后验分布的算法。MCMC 算法通过生成大量样本并不断迭代更新,能够动态调整模型以适应系统状态的变化,从而有效应对系统中的不确定性和复杂性,并提供更加可靠的故障区段定位

结果;

3) 将故障区段定位方法的算法设计融合到故障定位系统模块中,部署到 PMS3.0 系统,进一步开展工程化平台的实现工作,故障定位系统模块获取数据信息,通过本文算法分析得出结果,最后在平台界面进行可视化展示。

参 考 文 献

- [1] 周静, 张兴, 贾晨. 基于多源故障信息的故障定位方法在配网抢修中的应用[J]. 华北电力技术, 2015(4): 25-29.
ZHOU Jing, ZHANG Xing, JIA Chen. Application of fault location method based on multi-source fault information in repair of distribution network[J]. North China Electric Power, 2015(4): 25-29.
- [2] 刘文军, 李帅虎, 马瑞, 等. 低压配电台区柔性互联系统多目标 DDPG 优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 62-70.
LIU Wenjun, LI Shuaihu, MA Rui, et al. Multi-objective DDPG optimal dispatch for low-voltage distribution station area flexible interconnection system[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 62-70.
- [3] 黄劼, 汪逸帆, 林叶青, 等. 基于 K 均值聚类算法的谐振接地系统故障区段定位方法[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 24-37.
HUANG Jie, WANG Yifan, LIN Yeqing, et al. Fault section location method in resonant grounding systems based on K-means clustering algorithm[J]. Electrical Engineering, 2024, 25(3): 24-37.
- [4] 郭上华, 王钢. 融合 FTU 和配变告警信息的有源配网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 92-99.
GUO Shanghua, WANG Gang. An active distribution network fault location method based on FTU and transformer alarm information[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 92-99.
- [5] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2525-2539.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2525-2539.
- [6] 向真, 李振聪, 谈赢杰, 等. 计及能量共享的多微电网与配电系统两层协同优化调度方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 42-49.
XIANG Zhen, LI Zhencong, TAN Yingjie, et al. Bi-level collaborative optimal scheduling method for multiple microgrids and distribution system considering energy sharing

- [J]. *Smart Power*, 2024, 52(8): 42-49.
- [7] 季亮, 殷佳明, 姜恩宇, 等. 基于混合量测状态估计的配电网故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 58-68.
JI Liang, YIN Jiaming, JIANG Enyu, et al. A fault location method based on hybrid measurement state estimation for a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 58-68.
- [8] 徐良德, 黄馨仪, 郭挺, 等. 考虑分布式光伏不确定性的输配电系统供电能力评估[J]. *广东电力*, 2024, 37(6): 11-20.
XU Liangde, HUANG Xinyi, GUO Ting, et al. Evaluation of power supply capacity of integrated transmission and distribution systems considering distributed photovoltaic uncertainty[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(6): 11-20.
- [9] 黄牧涛, 周胡钧, 卢明, 等. 考虑FTU信号丢失的有源配电网故障区段定位方法[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(9): 212-216.
HUANG Mutao, ZHOU Hujun, LU Ming, et al. Fault Section location method for active distribution network considering FTU signal loss[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(9): 212-216.
- [10] 陈一丰, 黄铭浩, 董树锋. 计及配电侧分布式电源的输配协同高收敛性最优潮流研究[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 36-44.
CHEN Yifeng, HUANG Minghao, DONG Shufeng. Research on improving the convergence of optimal power flow of transmission-distribution-coupled networks[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 36-44.
- [11] 曾瑶, 徐玉韬, 熊炜, 等. 计及DSTATCOM和并网逆变器协同的高比例分布式光伏配电网鲁棒控制策略[J]. *广东电力*, 2024, 37(6): 1-10.
ZENG Yao, XU Yutao, XIONG Wei, et al. Robust control strategy for high-proportion distributed photovoltaic distribution network considering coordination of DSTATCOM and grid-connected inverters[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(6): 1-10.
- [12] 谢李为. 配电网故障行波定位与自适应保护新方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
XIE Liwei. Research on method of fault traveling wave location and adaptive protection for distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [13] 郑鹏, 韩鹏程, 王国栋, 等. 中压配电线路断线高阻接地故障精细化诊断方法[J]. *中国电力*, 2024, 57(4): 220-228.
ZHENG Peng, HAN Pengcheng, WANG Guodong, et al. Refined diagnosis method for disconnected high-resistance grounding faults in medium-voltage distribution lines[J]. *Electric Power*, 2024, 57(4): 220-228.
- [14] 吴进伟. 配电网线路故障实时监测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
WU Jinwei. Research on real-time monitoring technology for line fault in distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [15] 杨志淳, 李牧远, 韩佶, 等. 基于多源信息融合告警的微电网故障定位方法研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(6): 45-55.
YANG Zhichun, LI Muyuan, HAN Ji, et al. Research on fault location method for micro-grid based on multi-source information fusion alarm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(6): 45-55.
- [16] 姚永峰, 王启哲, 王慧萍. 基于邻接矩阵的低压配电网故障区段定位方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(11): 91-96.
YAO Yongfeng, WANG Qizhe, WANG Huiping, et al. Faulted line segment location method for low-voltage distribution network based on adjacency matrix[J]. *Electric Power*, 2021, 54(11): 91-96.
- [17] 李竹根, 刘波峰, 张晓飞, 等. 基于改进灰狼算法与隐枚举法的配电网分区故障定位研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(8): 157-165.
LI Zhugen, LIU Bofeng, ZHANG Xiaofei, et al. Research on sub-region fault location of distribution network based on improved grey wolf optimizer and implicit enumeration method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(8): 157-165.
- [18] 陈一丰, 黄铭浩, 董树锋. 计及配电侧分布式电源的输配协同高收敛性最优潮流研究[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 36-44.
CHEN Yifeng, HUANG Minghao, DONG Shufeng. Research on improving the convergence of optimal power flow of transmission-distribution-coupled networks[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 36-44.
- [19] 丛伟, 孔瑾, 赵义术, 等. 基于可达性矩阵的智能配电网分区及孤岛辨识方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(23): 50-55.
CONG Wei, KONG Jin, ZHAO Yishu, et al. Smart distribution network partition and island identification method based on reachability matrix[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(23): 50-55.
- [20] 徐悦, 康乐, 吴宗后, 等. 基于节点电压差值的配电网故障信息传控分析[J]. *中国工程机械学报*, 2024, 22(1): 132-136.
XU Yue, KANG Le, WU Zonghou, et al. Fault information transmission and control analysis of distribution network based on node voltage difference[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2024, 22(1): 132-136.
- [21] 郭饴, 刘永礼, 张媛, 等. 实用化数据同步技术在新型配电系统规划多人协同机制中的应用[J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 363-372.
GUO Lu, LIU Yongli, ZHANG Yuan, et al. Application

- of practical data synchronization technology in multi person cooperation mechanism of new distribution system planning [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 363-372.
- [22] 韦翔, 梁艳, 郭立, 等. 基于 Lambda 算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 71-76.
WEI Xiang, LIANG Yan, GUO Li, et al. Research on fault location method of distribution network based on lambda algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 71-76.
- [23] 李帅. 基于故障状态矩阵的全并联 AT 牵引网故障测距方案[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
LI Shuai. Fault-location scheme for cross-coupling at feeding system based on fault state matrix[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [24] 王巍璋. 含分布式电源的配电网故障区段定位方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
WANG Weizhang. Research on fault section location methods for distribution networks with distributed generation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [25] 全兆景, 荆利菲, 兰孟月. 一种用于变压器故障诊断的贝叶斯网络优化方法[J]. 电子科技, 2024, 37(8): 34-39.
TONG Zhaojing, JING Lifei, LAN Mengyue. A Bayesian network optimization method for transformer fault diagnosis [J]. Electronic Technology, 2024, 37(8): 34-39.
- [26] 赵妍, 孙延, 聂永辉. 基于格拉姆角差场和迁移残差网络的 HVDC 线路故障识别[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 118-127.
ZHAO Yan, SUN Yan, NIE Yonghui. HVDC line fault identification based on the Gram angle difference field and transfer residual network[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 118-127.
- [27] 程辰, 王伟, 宋光明, 等. 基于行波理论的城市配电网故障快速定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3): 43-47.
CHENG Chen, WANG Wei, SONG Guang ming, et al. Fast fault location method of urban distribution network based on traveling wave theory[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(3): 43-47.
- [28] 翟旭鹏. 基于动量的随机梯度马氏链蒙特卡罗方法[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
ZHAI Xupeng. Momentum-based Monte Carlo method for stochastic gradient martensitic chains[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2023.
- [29] 叶圣永, 王晓茹, 周曙. 基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 168-174.
YE Shengyong, WANG Xiaoru, ZHOU Yao. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 168-174.
- [30] 吴金珠, 王天师. 基于动态贝叶斯网络的作业现场风险精细化控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8): 87-90, 153.
WU Jinzhu, WANG Tianshi. Refinement control of job site risk based on dynamic Bayesian network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(8): 87-90, 153.
- [31] 张柏林, 李希德, 魏博, 等. 基于改进的场景分类和去粗粒化 MCMC 的风电出力模拟方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 41-49, 122.
ZHANG Bolin, LI Xide, WEI Bo, et al. Wind power output simulation method based on improved scene classification algorithm and coarse-grained MCMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 41-49, 122.
- [32] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 83-89.
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 83-89.

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2025-07-12

作者简介:

李青杉(1988—),男,通信作者,高级工程师,研究方向为配网运检技术。E-mail:i_am_liqs@163.com

徐凤乾(1989—),男,高级工程师,研究方向为配网运检技术。E-mail:xufengqian418@163.com

赖秀炎(1984—),男,高级工程师,研究方向为配网运检技术。E-mail:sandwish-27@163.com

冯洋(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为配网运检技术。E-mail:willie_feng@163.com

伊长春(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为配网运检技术。E-mail:724684322@qq.com

郭建峰(1998—),男,硕士研究生,研究方向为低压配电网故障定位技术。E-mail:2095775564@qq.com

(编辑 王克祥)