

基于分布式智能监测装置的配电网低压电缆故障定位方法

王国鸿 宁楠 蔡宇宁 陶钢 何先奎
(贵州电网公司贵安供电局)

摘要：配电网低压电缆的广泛分布是实现电力传输的重要通道，受环境、人为等因素的影响，电缆易发生绝缘破损、短路、断路等故障，使电力供应质量下降。为快速实现低压电缆故障定位、故障识别，本文提出一种基于分布式智能监测装置的低压电缆故障定位方法。首先，阐述了基于智能监测装置的分布式监测系统架构；其次，提出用于描述监测节点关联关系的矩阵分析方法，并对矩阵复杂度进行分析；然后，基于节点关系矩阵复杂度变化情况实现电缆的快速故障定位；最后，算例验证了针对电缆漏电流等问题也可实现电缆的故障定位，具有重要的工程应用价值。

关键词：电缆；智能监测装置；分布式监测系统；故障定位；矩阵分析

0 引言

目前，配电网低压线路常用电缆进行电能的传输，而电缆线路因其所处环境、面临的人为因素等，使电缆易发生绝缘破损、断线等故障，严重将引起恶性事件^[1-3]。因此，快速判断电缆故障类型与实现故障精准定位，对降低电缆故障带来的运行风险、提高供电可靠性、预防事故发生具有重要作用。

而随着新型电力系统的发展^[4-5]，新型智能装置的应用得到快速发展。智能装置具备功能可扩展、软硬件分离、多端通信等特点，可针对不同场景设计出具有较优性能的应用软件^[6-8]。且智能分布式监测装置彼此通信，在满足本地数据的处理之外，可作为相邻智能装置的后备资源，分布式协同方式使任务处理更具灵活性。

如今，关于电缆故障定位的研究，文献[9-10]阐述了当前电缆的故障原因包括绝缘故障、超负荷故

障、短路故障、闪络故障等。文献[11]提出一种中压电缆的电缆在线监测装置的研制方法，该方法对基于智能装置的分布式监测系统具有启发作用。针对智能装置在电缆监测的研究，文献[12]提出利用边缘计算对电缆的运行状态监测分析，启发智能装置在电缆监测中的应用。文献[13-14]提出一种利用智能装置的分布式任务协同处理架构与方法，为本文的监测装置协同、跨区域节点连接情况识别提供借鉴作用。

因此，本文提出一种利用智能监测装置的电缆分布式监测系统的故障定位方法。首先阐述智能监测装置架构，以及由监测装置构建的分布式监测系统；其次，提出了分布式监测系统架构下的监测节点关联关系分析方法，该方法既实现监测装置的跨区域节点连接情况识别，又可用于本地节点连接变化情况。再次，提出基于节点关系矩阵的电缆故障定位方法，该方法有效

求解了电缆故障类型与故障位置。最后，算例验证了本文所提方法的适用性，具有较高工程应用价值。

1 分布式监测装置协同架构

1.1 分布式监测装置构成

如图 1 所示为面向配电网低压交流电力电缆泄漏电流的监测装置的构成图，其主要由三个层面组成：一是功能层，根据监测装置的应用场景进行相应功能的配置，包括高精度数据同步合成、监测数据曲线查看、输出月/年度运行报告、共零回路灵活配置、故障录波在线读取、联动跳闸控制、采集方案灵活选择、固有漏电补偿、CT断线短线监测；二是操作系统层，其主要实现对硬件资源的管理，包括容器管理、资源虚拟化、镜像构建、容器引擎、进程管理等^[15-16]；三是通信层，通信层主要实现了对被监测点数据的采集、监测数据的上传以及与其他装置的通信等。



图 1 监测装置架构图

1.2 纵向协同

利用智能监测装置对电缆各种信息进行监测，且智能监测装置一般可采集监测多个节点，即监测装置与采集点呈现一对多关系，在通信上形成了不同层级的节点间的关联关系，如图 2 中一台监测装置管理一个虚线框中的节点，本文将称之为纵向协同。根据电缆节点的地理分布、节点的通信条件差异，不同监测装置管辖范围内的节点数量有所不同，且不同监测装置的管辖区域存在一定的重叠区域。

进一步地，本文刻画了纵向协同中各个节点间关联关系如下：

$$f(p,a_i)=\begin{cases} 0 & a_i \notin p \\ 1 & a_i \in p \end{cases} \quad (1)$$

式中， a_i 为监测节点， $i \in \mathbb{N}^+$ ； p 为监测装置编号；若装置 p 监测节点 a_i ，则 $f(p, a_i) = 1$ ，反之 $f(p, a_i) = 0$ 。

1.3 横向协同

在如图 2 所示的分布式监测系统中，监测装置除监管本地电缆节点之外，还与相邻的监测装置进行通信^[17]，如图中的双实线所示。此外，电缆节点间也存在相互关联关系。因此，本文提出横向协同对上述属于同一层级节点的关联关系进行刻画。在横向协同中，利用变量 c_{ij} 刻画节点 a_i 与节点 a_j 的关联关系，如下所述：若节点 a_i 、 a_j 间存在直接相连的关系，则 $c_{ij}=1$ ，否则 $c_{ij}=0$ 。

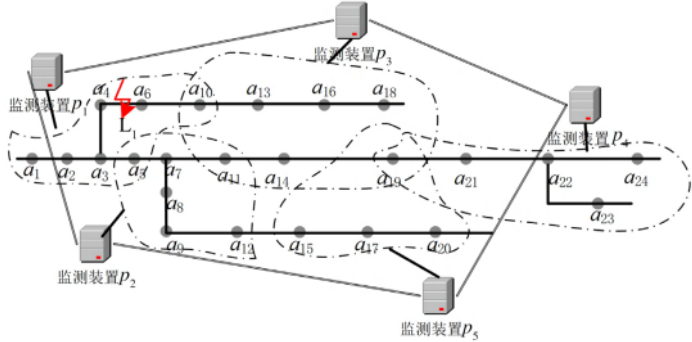


图 2 基于监测装置的分布式监测系统架构

2 监测节点关系矩阵及其复杂度计算

2.1 监测节点关系矩阵

本文在 1.2 节中利用 $f(p, a_i)$ 描述了监测装置 p 与监测节点 a_i 间的关系, 当确定所有满足 $f(p, a_i) = 1$ 的 i 即可确定监测装置 p 所监测的节点。在 1.3 节中对监测节点间的关系进行了相关描述, 进一步地, 本文将 c_{ij} 所构成的矩阵 C 称为监测节点关系矩阵, 基于纵向协同架构与横向协同, 关系矩阵又可根据监测装置的不同划分为若干子矩阵, 如 C_{p1} 、 C_{p2} 等, 用下标 p_1 、 p_2 表示监测装置 p_1 与 p_2 。节点关系矩阵如下所示:

$$C = \begin{bmatrix} C_{p1} & & & 0 \\ & C_{p2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & C_{p5} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在图 2 所示的架构图中, 相邻两台监测装置所管控的区域存在一定的重叠区域, 即重叠区域内的节点 a_i 同时满足 $f(p_1, a_i) = 1$ 、 $f(p_2, a_i) = 1$ 。横向协同架构中相邻的监测装置彼此进行数据交互, 本地的节点关系矩阵中阐述了包含重叠区域节点的各节点间的关联关系, 故在获取相邻监测装置的节点关系矩阵后, 本地监测装置即实现了对跨区域的节点连接关系的获取, 即重叠区域内的节点联系了相邻的两台监测装置。

2.2 监测节点关联关系分析

节点关系矩阵直观阐述了监测节点的相连关系, 为了使监测装置更好地掌控本区域、跨区域节点的关联关系, 本节基于节点关系矩阵进一步分析了各监测节点的关联关系。

首先, 本文定了节点间的层级关联以描述不同节点之间的联系, 层级关联包括一级关联、二级关联等。其中, 一级关联表示监测节点在电缆线路上是直接相连的; 二级关联表示两个电缆监测节点 a_i 、 a_j 之间无线路上的直接连接关系, 但这两者均与第三个节点 a_k 存在一级关联, 则节点 a_i 、 a_j 之间存在二级关联; 以此类推, 若两个节点存在 $(n+1)$ 级关联, 则说明这两

个节点需要经过 n 个节点构成关联。

对于监测节点的层级关联, 本文提出利用如下方法进行计算得到。对节点关系矩阵 C 进行 n 次 Boolean 矩阵运算即可得到两个节点的 $(n+1)$ 级关系矩阵 $C^{(n)}$, 以上标 $^{(n)}$ 表示 n 级关联。矩阵 $C^{(n+1)}$ 中的每个元素通过式 (3) ~ 式 (5) 确定, 若 $C^{(n)}_{ij} = 0$ 且 $C^{(n+1)}_{ij} = 1$, 则说明节点 a_i 、 a_j 之间存在 n 级关联。对节点关系矩阵 C 的进行多次的 Boolean 矩阵运算, 实际是在动态计算中确定监测节点处于与参考节点间的层级关联, 即:

$$\forall k \in [1, m], \exists [C^{(n)}_{(i,k)} \wedge C_{(k,j)} = 1] \quad (3)$$

$$c^{(n+1)}_{ij} = 1 \quad (4)$$

$$C^{(n+1)} = [c^{(n+1)}_{ij}]_{m \times m} \quad (5)$$

式中, m 为电缆监测系统中总的监测节点数量; 式

(3) 表示矩阵 $C^{(n+1)}$ 中各元素的计算方法, 以 $C^{(n+1)}_{ij}$ 为例, 其由 $C^{(n)}_{ij}$ 的第 i 行中的元素依次与 C 的第 j 列中的元素进行 Boolean 逻辑运算, 当第 i 行、第 j 列中同时存在元素为 1 时, 则该 Boolean 逻辑运算的值结果为 1, 矩阵 $C^{(n+1)}_{ij}$ 中的对应元素将被赋值为 1。

2.3 关系矩阵复杂度计算

通过节点关系矩阵分析电缆节点间的关联关系, 该过程的计算复杂度随 Boolean 矩阵运算次数的增加而增加^[18], 本文对节点关系矩阵的生成过程的计算复杂度分析如下。

节点关系矩阵 C 由若干子矩阵组成, 且各子矩阵存在一定的关联关系, 因此对子矩阵进行复杂度即可完成对矩阵 C 的分析, 本节以子矩阵 C_{p1} 与 C_{p2} 进行复杂度的分析。首先, 生成矩阵 $C^{(n)}_{p1}$ 时进行的逻辑运算次数与监测装置 p_1 管控区域具有的节点数量有关, 当有 x (p_1) 个节点时, 矩阵 $C^{(n)}_{p1}$ 的复杂度如式 (6) 所示:

$$Q(p_1) = \frac{x^2(p_1) \times [x(p_1) - 1]^2}{2} \quad (6)$$

式中, $Q(p_1)$ 为生成矩阵 $C^{(n)}_{p1}$ 的复杂度, 同理可计算矩阵 $C^{(n)}_{p2}$ 的复杂度 $Q(p_2)$ 。

另外，在横向协同架构中，监测装置 p_1 与 p_2 通过节点 a_3 进行跨区域节点的识别，则在本地监测装置 p_1 获取相邻监测装置 p_2 的节点关系矩阵后， p_1 进一步综合本地节点与跨区域节点的关联关系，则监测装置 p_1 的复杂度变为：

$$Q'(p_1) = Q(p_1) + x(p_1) \times x(p_2) \quad (7)$$

所以矩阵 C 的复杂度 Q' 为：

$$Q' = Q'(p_1) + Q'(p_2) + \dots + Q'(p_s) \quad (8)$$

3 基于节点关系矩阵的故障定位方法

低压电缆的常见故障包含了短路、断路等，故障发生的位置可分为监测节点所在位置故障、两个节点中间的线路位置故障。对于监测装置而言，短路或断路故障在两个相邻监测节点间将呈现一定的差异，以相邻节点的关联关系进行体现。

当电缆线路发生接地短路故障时，故障点与地的电气距离将缩小至零，若故障发生于监测节点 a_i ，则在节点关系矩阵中与 a_i 具有一级关联、但彼此为二级关联的若干节点，将转变为一级关联，则在计算关系矩阵复杂度过程中，若有层级关联关系发生改变的节点，即可判断其具备一级关联的共同节点发生短路故障。若故障发生于两个监测节点 a_i 、 a_j 间的线路，则节点关系矩阵中将新增一个接地节点，故节点 a_i 、 a_j 将从一级关联变为二级关联，其他节点与 a_i 、 a_j 的层级关联也将发生相应变化。

当电缆线路发生断线故障时，该故障一般发生于两个监测节点的中间位置，由于在纵向协同架构下发生断线故障区域的节点数量不发生变化，故子矩阵的关系矩阵复杂度不发生变化。监测装置对该故障的反应将体现于节点关系矩阵的前后两次计算中发生较大变动，如使断线位置的两个节点从一级关联关系变为该区域下的最大层级关联。

基于节点关系矩阵的电缆监测系统故障定位方法

如图 3 所示。

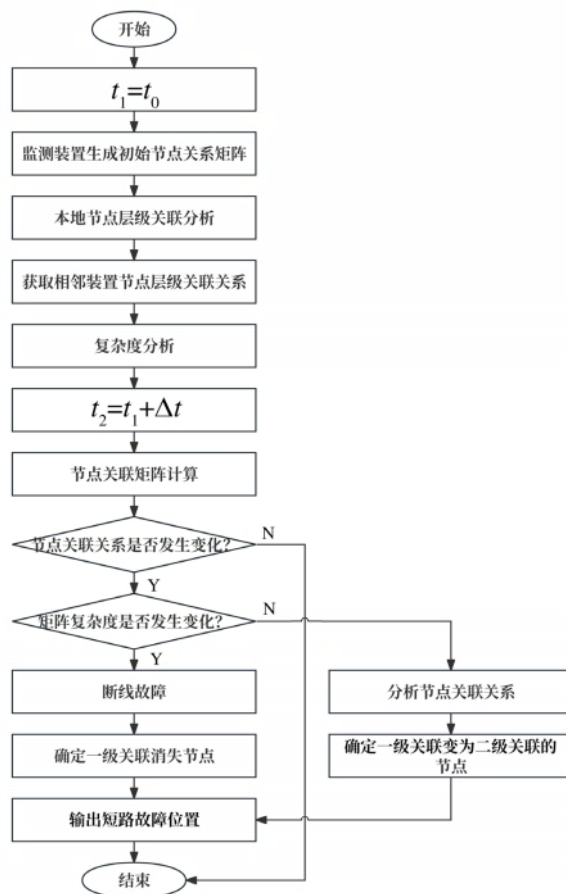


图 3 分布式监测系统故障定位方法

4 算例分析

以如图 2 所示的电缆系统的拓扑结构为例，系统内共包含 24 个节点，由 5 台监测装置构成分布式监测系统，每台智能监测装置的监测节点如图 1 所示，则 $x(p_1) = 7$ 、 $x(p_2) = 6$ 、 $x(p_3) = 7$ 、 $x(p_4) = 5$ 、 $x(p_5) = 4$ 。

以纵向协同架构中装置 p_1 的管控范围为例，各节点的关系矩阵 C_{p1} 、以及层级关联计算过程中的矩阵 $C^{(4)}_{p1}$ 如下所示：

$$C_{p1} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_{10} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_{10} \end{matrix} \quad (9)$$

$$C_{p1}^{(4)} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_{10} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_{10} \end{matrix} \quad (10)$$

监测装置 p_1 在进行 4 次 Boolean 矩阵运算后的结果如 $C_{p1}^{(4)}$ 所示, 当再进行一次 Boolean 矩阵运算后监测装置 p_1 的节点关联矩阵 $C_{p1}^{(5)}$ 变为单位矩阵。

当在如图 2 所示的电缆监测系统中的 L_1 位置发生短路故障、断线故障时, 监测装置 p_1 管控范围内的节点关系矩阵变化为:

$$C_{p1\text{短}} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & L_1 & a_6 & a_{10} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ L_1 \\ a_{10} \end{matrix} \quad (11)$$

$$C_{p1\text{断}} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_{10} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_{10} \end{matrix} \quad (12)$$

矩阵 C_{p1} 在故障前后的复杂度如下表所示, 由表可知计算节点关系矩阵的复杂度为仅进行不超过 2000 次的逻辑运算, 对于智能监测装置而言可以快速求解出节点关系矩阵。

表 故障前后 C_{p1} 的复杂度变化情况

故障类型	故障前复杂度/次	故障后复杂度/次
短路故障	966	1664
断路故障	966	966

所以基于图 3 所示的分布式监测系统故障定位方法, 当监测装置识别、计算出节点关系矩阵的复杂度、层级关联关系发生变化时, 根据变化情况可以快速准确定位故障的类型与故障位置。

若复杂度发生变化, 则说明该系统发生故障, 根据节点关系矩阵变化情况, 计算得 $C_{p1\text{短}}$, 比较 $C_{p1\text{短}}$ 与 C_{p1} 得到节点 a_4 和 a_6 从一级关联关系变为二级关联关系, a_4 和 a_{10} 从二级关联关系变为三级关联关系, a_5 与 a_6 从二级关系变为三级关系, 所以判断出短路故障位于节点 a_4 和 a_6 之间的电缆线路上。同理, 若节点关系矩阵复杂度未变, 需进一步判断节点关联关系的变化情况, 通过计算节点关联关系矩阵得到 $C_{p1\text{断}}$, 比较 $C_{p1\text{断}}$ 与 C_{p1} , 可以发现节点 a_4 与 a_6 从一级关联变为没有关联, a_4 与 a_{10} 从二级关联变为没有关联。 a_5 和 a_6 从二级关联变为没有关联, 则说明为断路故障, 且故障位于节点 a_4 与 a_6 之间的线路上。同理, 可以用相同的方法分析其他区域内的故障定位。

5 结束语

针对电缆易发的故障如短路、断路故障, 本文提出一种基于智能监测装置的分布式监测系统的故障定位方法。智能监测装置通过管控多个监测节点, 并与相邻的监测装置进行数据交互, 通过重叠区域内的

节点分析跨区域的节点连接情况，并利用节点关系矩阵的复杂度、节点层级关联关系的变化情况，可快速判断电缆的故障类型与故障位置，为实际工程应用解决电缆故障问题提供了有效手段。

参考文献

- [1] Wang Xuewen, Zhang Hengxu, Shi Fang, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11 (1) : 774-785.
- [2] 李浩, 宋国兵, 樊艳芳, 等. 利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (5) : 11-21.
- [3] 董章, 李思尧, 陈雅旋, 等. 基于组合赋权的电缆风险评估可视化[J]. 电气技术, 2023, 24 (6) : 57-63.
- [4] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47 (9) : 3021-3035.
- [5] 郑玉平, 吕鹏飞, 李斌, 等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (22) : 3-15.
- [6] 刘媛媛, 蔡泽祥, 陈元桦, 等. 基于容器的配电网保护控制终端业务调度模型与策略分析[J]. 电力建设, 2023, 44 (10) : 95-106.
- [7] 袁燕岭, 李世松, 董杰, 等. 电力电缆诊断检测技术综述[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11) : 1-7.
- [8] 郭自刚, 徐天乐, 陈玉林, 等. 配电网电缆故障在线监测及定位系统[J]. 电气技术, 2022, 23 (11) : 74-79.
- [9] 李刚. 探讨电力电缆故障相关的原因与检测[J]. 中国设备工程, 2022 (9) : 169-171.
- [10] 戴列峰, 刘浩, 俞波. 新型电力系统保护测控装置硬件平台的研制[J]. 微型机与应用, 2007, (S1) : 225-228.
- [11] 刘骥, 宗榜旭, 张大宁, 等. 中压电缆终端故障在线监测装置研制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23 (1) : 93-98, 104.
- [12] 曹培, 徐鹏, 高凯, 等. 基于边缘计算的电缆接头运行状态智能传感与监测[J]. 高压电器, 2020, 56 (9) : 26-32.
- [13] 陈元桦, 蔡泽祥, 岑伯维, 等. 考虑任务耦合的配电网边缘计算终端部署与任务分配方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (22) : 32-40.
- [14] 陈元桦, 蔡泽祥, 孙宇嫣, 等. 电力物联网边缘计算终端部署与业务分配优化方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16 (3) : 100-107.
- [15] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (3) : 154-161.
- [16] 陶宇航, 张熹, 宫祥龙. 10kV 电缆故障测距及定位典型案例[J]. 电气技术, 2022, 23(2) : 88-93.
- [17] 林细玲. 配电网故障的自动定位与判断技术分析[J]. 科学技术创新, 2019 (33) : 195-196.
- [18] 徐波, 冯山. 基于邻域关系矩阵的属性约简算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40 (8) : 1595-1600.

(收稿日期: 2023-12-20)