

引用格式:李航,曾海燕,喻 锐,等.基于多端行波频率矩阵的复杂配电网故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):19-30.

Citation: LI Hang, ZENG Haiyan, YU Kun, et al. A novel fault location method for complex distribution network based on multi-terminal traveling wave frequency matrix[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 19-30.

基于多端行波频率矩阵的复杂配电网故障定位方法

李 航¹, 曾海燕¹, 喻 锐², 陈 爽¹, 曾举鹏², 张钟毓¹, 曾祥君², 杨 玺¹

(1. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430000; 2. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对配电网线路参数受频变影响导致现有故障定位方法实现复杂以及行波传输速度无法准确计算的问题, 基于多端行波频率矩阵, 提出一种不依赖波头时间信息的复杂配电网故障定位方法。通过对故障行波固有频率主成分与传输距离的关系进行分析, 定义各分支节点的参考端, 并计算真实故障发生前的基准固有频率矩阵与真实故障发生后的故障固有频率矩阵之间的差值, 最终得到相应的故障分支判定原理。在判定故障分支的基础上, 按照故障点到参考端的路径不经过分支节点或经过分支节点数量最少为原则选取参考端, 同时计算对应参考端故障固有频率主成分下的波速度, 进而对故障点位置实现精确定位。仿真结果表明, 所提方法无须检测行波波头时间, 通过构建多端频率矩阵准确刻画配电网拓扑任一分支发生故障的情形, 在保证故障分支可靠判定的同时实现了频率分量与波速度相互匹配, 大大提高了故障定位精度, 且定位结果不受故障位置、类型、过渡电阻、初相角影响。

关 键 词: 复杂配电网; 故障行波定位; 多端频率矩阵; 频变变化特性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.003

中图分类号: TM773

文章编号: 1673-9140(2024)03-0019-12

Fault location method for complex distribution networks based on multi-terminal traveling wave frequency matrix

LI Hang¹, ZENG Haiyan¹, YU Kun², CHEN Shuang¹, ZENG Jupeng²,
ZHANG Zhongyu¹, ZENG Xiangjun², YANG Xi¹

(1. Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the difficulties that the existing fault location methods are complex to implement and the traveling wave transmission speed cannot be accurately calculated due to the influence of frequency-dependent changes in distribution network line parameters, a fault location method for complex distribution networks is proposed based on the multi-terminal traveling wave frequency matrix, which does not rely on wavefront time information. By analyzing the relationship between the inherent frequency principal component of the fault traveling wave and the transmission distance, the reference terminals of each branch node are defined, and the difference between the benchmark inherent frequency matrix before the actual fault occurs and the fault inherent frequency matrix after the actual fault occurs is calculated, ultimately obtaining the corresponding fault branch determination principle. Based on the determination of the fault branch, the reference terminal is selected according to the principle that the path from the fault point to the reference terminal does not pass through branch nodes or passes through the fewest number of branch nodes, and the wave speed under the principal component of the fault inherent frequency of the corresponding reference terminal is calculated, thereby accurately locating the fault point. Simulation results show that the proposed method does not require detecting the wavefront time of the traveling wave, accurately describes the situation of any branch fault in the distribution network topology by constructing a multi-terminal frequency matrix, ensures reliable determination of the

收稿日期: 2022-11-25; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 国网湖北省电力有限公司专项成本科技项目(B315A0229843)

通信作者: 喻 锐 (1989—), 男, 副教授, 主要从事电力系统保护与控制研究; E-mail: zengjupeng1224@qq.com

fault branch, and achieves matching between the frequency component and the wave speed, greatly improving the accuracy of fault location. Moreover, the location results are not affected by the fault location, type, transition resistance or initial phase angle.

Key words: complex distribution networks; fault traveling wave location; multi-terminal frequency matrix; frequency-dependent characteristics

随着中国能源互联网逐步发展,风力、光伏发电等新能源以分布式电源的形式大规模纳入配电网,导致配电网运行复杂化程度加深^[1-6]。此外,与输电网相比,配电网的结构更加复杂,架空线—电缆混合,分支线众多,所处环境更为恶劣,更容易发生各种类型故障,使得在输电网中成熟运用的故障定位技术难以在配电网中实施,导致配电网故障准确定位较为困难^[7-10]。而配电网故障精确定位是加快线路修复、减少停电时间和快速恢复供电的主要方法,也是进一步提升新能源分布式接入配电网自动化水平和供电可靠性的关键技术,一直是重点关注和亟待解决的技术难题,目前已被纳入国家重点研发计划项目^[11-16]。

常见的配电网故障定位方法包括故障分析法和行波法。但随着分布式电源在配电网的渗透率逐渐提高,故障分析法易受大量电力电子设备接入影响,导致其定位方法失效。而行波法以其原理简单以及受系统运行方式、分布式电源接入影响小等特点,在理论研究和实际应用方面获得了迅速发展^[17-18]。目前,基于行波原理的故障定位方法主要包括时域分析法和频域分析法^[19]。

时域分析法主要分为单端行波法和双端行波法。单端行波法通过测量故障初始波头与反射波头之间的反射时间实现故障定位,但是故障行波在配电网的众多分支线路传输时会经历多次折反射,这给捕获故障点反射行波波头带来了较大的干扰。文献[20-21]提出一种不受分支线路影响的配电网故障行波单端定位方法,其核心在于利用行波线模和零模分量速度差以及时间间隔,无须识别故障点反射行波波头,实现故障定位,但定位结果受零模分量波速影响较大,鲁棒性较差。双端行波法则是通过捕获线路两端故障行波进行故障定位,只需要记录初始行波到达线路检测端的时刻,而不必对故障行波的复杂折反射进行分析。文献[22]基于小波包变换和相关性分析实现故障行波双端定位。文献[23]利用二进小波变换将双端测量中的滤波消噪,实现了单相接地故障的精准定位。但文献[22-23]均未给出波速的精准测量法,这对故障行波

定位误差影响较大。文献[24]通过在配电网的馈线末端精准测量故障行波波头到达时间建立到达时间差(time difference of arrival, TDOA)矩阵,根据双端测量原理实现故障测距,但此算法并不适用于结构复杂的实际配电网。此外,利用双端行波原理确定最终的故障距离对于全球定位系统时间同步装置的要求较为严格。

基于此,为了消除来自行波波头时间标定错误造成的故障定位误差,近年来部分学者通过提取行波固有频率对线路故障进行定位。文献[25]基于离散傅里叶变换,完成了对行波固有频率主成分的提取,从频域的角度实现了双端电力线路故障定位。文献[26]在文献[25]的基础上,分析了固有频率、线路长度和边界条件之间的关系。之后,基于行波固有频率的故障定位方法逐渐在除双端线路之外的同杆并架线路^[27]、架空—电缆线路^[28-29]以及多端线路^[30-34]中实现了成熟的运用,然而,对于结构复杂的配电网却鲜有人研究。

为了解决上述问题,本文提出一种复杂配电网故障定位方法,该方法基于多端行波频率矩阵,且不需要依赖波头时间信息。通过分析故障行波固有频率主成分与传输距离之间的关系,建立真实故障发生前的基准固有频率矩阵和真实故障发生后的故障固有频率矩阵。然后,通过联立这2个矩阵以得到故障判定矩阵,并提出相应的故障分支判定原理。在判定故障分支的基础上,按照故障点到参考端的路径不经过分支节点或经过分支节点数量最少为原则选取参考端,同时计算对应参考端故障固有频率主成分下的波速度,进而对故障点位置实现精确定位。仿真结果表明,所提方法无须检测行波波头时间,通过构建多端频率矩阵在保证故障分支可靠判定的同时实现频率分量与波速度相互匹配,大大提高故障定位精度,且定位结果不受故障位置、类型、过渡电阻、初相角影响。

1 行波固有频率主成分与传输距离关系分析

通常研究行波的传输过程不再考虑集中参数

模型,而是考虑单根有损传输线路模型:把传输线路和大地认为是分布参数组成的回路,即电阻、电感、电导和电容沿着传输线路均匀分布。由于有损配电路参数存在依频特性,所以在线路发生故障后,周期性故障行波分量在频域内会呈现特定频率的谐波形式,这种形式被称为行波固有频率。固有频率本质上是行波在线路波阻抗不连续处多次反射和在有限长度线路延时效应下同时影响的结果^[35]。在故障行波频谱中,第一个峰值所对应的频率是固有频率的主要成分,即主成分频率最低。

为避免故障行波在配电网传输过程中造成频谱混叠现象,在提取行波固有频率主成分之前会对原始故障行波信号进行数据预处理,预处理包括:采用凯伦贝尔(Karenbauer)相模变换提取故障行波线模分量进行分析,减少故障行波的相间耦合;采用经验模态(empirical mode decomposition, EMD)和快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)对故障行波的线模分量进行频谱分析,准确提取固有频率主成分^[28]。由于本文研究的主要目标是提出一种可用于配电网故障定位的方法,关于具体的信号处理流程将不再赘述。图1为配电网故障行波频谱示意图,其呈现谐波形式的固有频率显而易见。

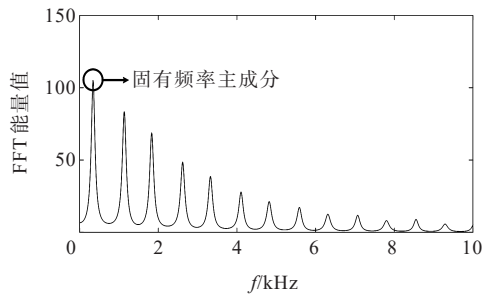


图1 固有频率主成分示意图

Figure 1 Sketch of natural frequency principal component

文献[26]在开路和短路条件下分析了线路固有频率形成的原因:对于发生在距离某一单一配电路一端R侧L km处的故障,故障产生的初始行波沿线路向系统方向传播,并在系统侧和故障点处多次发生反射,从而产生一系列具有固有频率的高频分量。固有频率的大小计算如下:

$$1 - \Gamma_R \Gamma_F e^{-2sL/v_i} = 0 \quad (1)$$

$$G_R = \frac{Z_C - Z_R}{Z_C + Z_R} \quad (2)$$

$$\Gamma_F = \frac{Z_C - Z_F}{Z_C + Z_F} \quad (3)$$

式(1)~(3)中, Γ_R 、 Γ_F 分别为系统侧和故障点处的电流行波反射系数; s 的实部对应衰减系数,虚部对应固有频率的角频率; v_k 为行波在不同固有频率下的传播速度; $Z_F = Z_C // R_F$, Z_C 为线路特征阻抗, R_F 为故障点的过渡电阻; Z_R 为线路R端系统侧阻抗。

令 $\Gamma_R = |\Gamma_R|e^{j\theta_R}$, $\Gamma_F = |\Gamma_F|e^{j\theta_F}$, 则式(1)可改写为

$$|\Gamma_R||\Gamma_F|e^{j\theta_R}e^{j\theta_F} = e^{2sL/v_i} \quad (4)$$

式中, θ_R 、 θ_F 分别为系统侧和故障点处的反射系数角。由欧拉公式可知,式(4)有无穷多解,表明固有频率为无穷多个频率成分组成的频谱,即

$$s = \frac{v_k}{2L} (\ln |\Gamma_R \Gamma_F| + j(\theta_R + \theta_F + 2kp)) \quad (5)$$

由于 s 的虚部对应固有频率的角频率,因此总结出故障行波传输距离 L 与固有频率 f_k 、系统侧反射角 θ_R 和故障点反射角 θ_F 四者之间的关系为

$$L = \frac{(\theta_R + \theta_F + 2kp)v_k}{4\pi f_k}, k = 0, \pm 1, \dots, n \quad (6)$$

由式(6)可知,在系统边界条件一定时,传输距离越长,固有频率主成分就越小,即故障行波传输距离与固有频率主成分呈反比例关系。

2 基于多端频率矩阵的故障定位方法

2.1 故障分支判定矩阵的构建

在图论中,配电网和输电网的拓扑结构不受线路参数不同等因素的影响。因此,在本质上,它们的行波装置配置方法并没有太大区别。就拓扑结构而言,输电网通常具有多环网结构,而配电网则主要采用分层树状辐射结构,其中存在着许多分支线路。图2为某简单配电网,各线路长度已知,各线路末端 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 和 E_6 均安装了故障行波采集设备,分支线路 E_2P_1 、 E_4P_2 、 E_5P_4 与主馈线 E_1E_6 的分支节点分别由 P_1 、 P_2 和 P_4 表示,分支线路 E_4P_2 与子分支线路 E_3P_3 的分支节点由 P_3 表示。定义 P_1 的参考端为 E_1 和 E_2 , P_4 的参考端为 E_5 和 E_6 , P_2 和 P_3 的参考端分别为 E_4 和 E_3 。

由文1.1分析可知,一般而言,固有频率主成分大小仅与线路参数和长度有关,而在配电网拓扑结构(包括线路末端的行波采集设备)已知的情况下,各参考端与所有分支节点间的距离是一定的,即分支节点故障时各参考端检测到的行波固有频率主成分是一定的。因此,不妨设各分支节点 P_j ($j=1, 2, 3, 4$) 分别发生虚拟故障时,对应参考端 E_i ($i=1,$

2,3,4,5,6)分别检测到的基准固有频率主成分为 $f_{E_i P_j}^B$;当配电网发生真实故障 F 时,各端分别检测到的故障固有频率主成分为 $f_{E_i P_j}^R$ 。进一步结合式(6)对传输距离 L 的公式进行分析,为了让固有频率能更好地表征距离,计算参考端 E_i 的 $f_{E_i P_j}^B$ 倒数与光速的积,再计算其他端 $E_k(k=1,2,3,4,5,6,k \neq i)$ 的 $f_{E_i P_j}^B$ 倒数与光速的积,最后作差得到:

$$f_{E_i E_k}^B = \frac{v_{\text{light}}}{f_{E_i P_j}^B} - \frac{v_{\text{light}}}{f_{E_i P_j}^R} \quad (7)$$

式中, v_{light} 为光速,取值一般为 3×10^5 km/s; E_i 为各分支节点 P_j 分别对应的参考端。

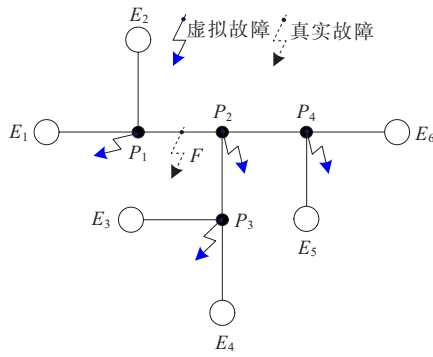


图2 简单配电网

Figure 2 Simple distribution network

据此,对于一个含有 m 个分支节点和 n 个端点的多分支配电网,其基准频率矩阵为

$$f^B = \begin{bmatrix} 0 & f_{E_2 E_1}^B & f_{E_3 E_1}^B & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_1}^B & f_{E_n E_1}^B \\ f_{E_1 E_2}^B & 0 & f_{E_3 E_2}^B & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_2}^B & f_{E_n E_2}^B \\ f_{E_1 E_3}^B & f_{E_2 E_3}^B & 0 & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_3}^B & f_{E_n E_3}^B \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ f_{E_1 E_{(n-1)}}^B & f_{E_2 E_{(n-1)}}^B & f_{E_3 E_{(n-1)}}^B & \cdots & 0 & f_{E_n E_{(n-1)}}^B \\ f_{E_1 E_n}^B & f_{E_2 E_n}^B & f_{E_3 E_n}^B & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_n}^B & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, f^B 为 $n \times n$ 矩阵,每一列每一行元素对应配电网各端点,其元素大小与各分支节点对应的参考端设定有关。

通过对固有频率和传输距离之间的关系进行分析,可以针对配电网中不同位置的故障情况求出相应的故障分支判定原理。需要强调的是,因为矩阵 f^B 的大小只与分支线路的结构相关,所以从减少在线运行的计算负担和时间消耗角度出发,可以在实际故障发生之前通过离线计算得到 f^B 。

真实故障发生后,计算参考端 E_i 的 $f_{E_i P_j}^B$ 倒数与光速的积,再计算其他端 E_k 的 $f_{E_i P_j}^R$ 倒数之间的差值,

最后作差得到:

$$f_{E_i E_k}^F = \frac{v_{\text{light}}}{f_{E_i P_j}^F} - \frac{v_{\text{light}}}{f_{E_i P_j}^R} \quad (9)$$

同理,对于一个含有 m 个分支节点和 n 个端点的多分支配电网,其故障频率矩阵为

$$f^R = \begin{bmatrix} 0 & f_{E_2 E_1}^R & f_{E_3 E_1}^R & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_1}^R & f_{E_n E_1}^R \\ f_{E_1 E_2}^R & 0 & f_{E_3 E_2}^R & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_2}^R & f_{E_n E_2}^R \\ f_{E_1 E_3}^R & f_{E_2 E_3}^R & 0 & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_3}^R & f_{E_n E_3}^R \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ f_{E_1 E_{(n-1)}}^R & f_{E_2 E_{(n-1)}}^R & f_{E_3 E_{(n-1)}}^R & \cdots & 0 & f_{E_n E_{(n-1)}}^R \\ f_{E_1 E_n}^R & f_{E_2 E_n}^R & f_{E_3 E_n}^R & \cdots & f_{E_{(n-1)} E_n}^R & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

计算基准频率矩阵 f^B 和故障频率矩阵 f^R 的差值,得到故障分支判定矩阵 V 为

$$V = f^R - f^B \quad (11)$$

2.2 故障分支判定原理

1) 分支节点 P_j 故障。

当配电网分支节点 P_j 发生故障时,存在2种情况。第1种情况是发生故障的分支节点有多个参考端。当图2所示故障发生在分支 $E_1 P_1$ 和 $E_2 P_1$ 的公共分支节点 P_1 时,根据式(7)~(11),可以观察到故障分支判定矩阵 V 中的元素具有如下特性:

$$\begin{cases} V(:,1) = [0]_n^T \\ V(:,2) = [0]_n^T \end{cases} \quad (12)$$

式中, $V(:,1)$ 和 $V(:,2)$ 分别为故障判定矩阵 V 中第1列和第2列的所有元素, $[0]_n^T$ 表示矩阵某列元素大小全为0。

第2种情况是发生故障的分支节点只有1个参考端:比如当故障发生在分支节点 P_2 时,基于式(7)~(11)可得故障分支判定矩阵 V 中的元素存在如下特性:

$$V(:,4) = [0]_n^T \quad (13)$$

式中, $V(:,4)$ 为故障判定矩阵 V 中第4列的所有元素。

综上,如果矩阵 V 中第 i 列的所有元素均为零,则可以推断故障发生在以端点 E_i 为参考端的分支节点 P_j 上,即

$$V(:,i) = [0]_n^T \quad (14)$$

式中, $V(:,i)$ 为故障判定矩阵 V 中第 i 列的所有元素。

2) 分支 $E_i P_j$ 故障。

当分支 $E_i P_j$ 发生故障时,考虑故障距离与固有频率主成分成反比的关系,同样可以推断此时故障

判定矩阵 V 的元素特征为:第 i 列的所有元素均不大于零,并且第 i 行的所有元素均不小于零,即

$$\begin{cases} V(i, \max) \leq 0 \\ V(i, \min) \geq 0 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中, $V(i, \min)$ 为故障判定矩阵中第 i 行元素中的最小值; $V(i, \max)$ 为故障判定矩阵中第 i 列元素中的最大值。因此,当故障分支判定矩阵 V 中的元素符合式(15)的条件时,可以推断故障发生在分支 $E_i P_j$ 上。

3) 分支节点 $P_j P_s$ 之间故障。

当配电网任意2个相邻分支节点 P_j 和 P_s (其参考端分别为 E_i 和 E_k) 之间发生故障时,结合故障距离与固有频率主成分成反比这一特性,同理可得此时故障判定矩阵 V 的元素特征为:第 i 列的所有元素与第 k 列的元素的点乘结果为零,即

$$V(i, \cdot) \cdot V(\cdot, k) = 0 \quad (16)$$

式中, $V(\cdot, k)$ 为故障判定矩阵 V 中第 k 列的所有元素。因此,如果故障分支判定矩阵 V 的元素符合式(16),则可以判定故障发生在分支节点 P_j 和 P_s 之间。

4) 故障分支判定矩阵的修正。

由于在实际操作中,提取固有频率主成分可能存在误差,导致 V 中计算值为0的元素有可能不会等于0,还需进一步对该元素计算值进行修正。

假设 V 中某元素计算值为 λ ,误差裕度为 ϵ 。在实际计算故障判定矩阵时,矩阵中若元素取值为 $-\epsilon \leq \lambda \leq \epsilon$ 时,修正 $\lambda = 0$ 。结合式(7)、(11)分析,考虑 λ 误差不大于100 m,误差裕度 ϵ 的取值为0.01。

2.3 故障精确定位方法

通过多端行波频率矩阵对故障分支判定后再对故障点进行精确定位,可以有效避免配电网多分支线路“伪故障点”问题。因此,根据式(6)可知,在理论上,可以利用故障发生后任一参考端检测到的固有频率主成分来实现行波的单端故障定位。然而,故障行波经过分支节点时会发生折反射,导致行波能量损失,进而影响固有频率主成分的提取精度。为此,为了减少故障定位误差,在判定故障分支后,参考端的选择应以故障点到参考端的路径不经过分支节点或经过分支节点数量最少为原则。具体如下。

1) 分支节点 P_j 故障或分支 $E_i P_j$ 故障时均选取 E_i 为参考端,其中如果分支节点 P_j 故障并且 P_j 存在多个 E_i 则选取故障点到参考端不经过其他分支节点的 E_i 为参考端,利用其检测到的固有频率主成分结合式(6)计算故障距离。

2) 分支节点 $P_j P_s$ 之间故障时,选取故障点到任一末端路径经过分支节点数量最少的末端为参考端,如果存在多个参考端则选取检测到固有频率主成分较大的为参考端,利用其检测到的固有频率主成分结合式(6)计算故障距离。

由式(6)可知,行波波速实际是具有依频特性的,原因在于故障行波可以被看作是由低频到高频等各种不同频率的波形分量叠加而成,对配电线路中不同频率的行波分量来说,其运动过程中的传输函数 $T(f_k, L)$ 与传输距离 L 和行波频率 f_k 有关,具体计算如下:

$$T(f_k, L) = e^{-\xi(f_k)L} \quad (17)$$

$$\xi(f_k) = \sqrt{Z_0 Y_0} =$$

$$\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = A(f_k) + jB(f_k) \quad (18)$$

式(17)、(18)中, $\xi(f_k)$ 为线路传输系数; Z_0 、 Y_0 分别为线路单位长度的阻抗和导纳; R_0 、 L_0 、 G_0 和 C_0 分别为线路单位长度电阻、电感、电导和电容; ω 为固有频率对应的角频率; $A(f_k)$ 为衰减系数,表示不同频率行波分量沿线路的幅值衰减特性; $B(f_k)$ 为相位系数,表示不同频率行波分量沿线路的相位变化特性。根据式(17)得到传输函数 $|T(f_k, L)|$ 随传输距离和行波频率变化的关系如图3所示。

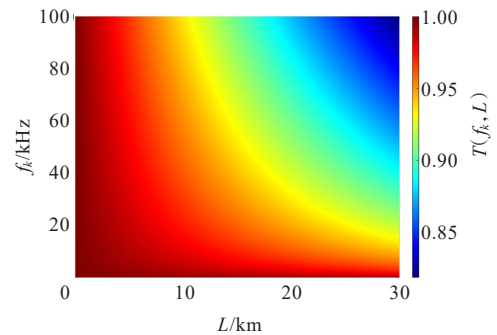


图3 不同频率和传输距离下传输函数衰减示意图

Figure 3 Schematic diagram of transmission function decay at different frequencies and transmission distances

由图3可知,当频率一定时,故障行波传输距离越长,衰减就越明显;同理,当传输距离一定时,故障行波频率越高,衰减就越明显。其中,传输函数 $T(f_k, L)$ 在频率为0~30 kHz时变化不大,而当频率大于30 kHz时, $T(f_k, L)$ 随传输距离的增加,衰减变得越明显,甚至衰减到接近0。可以发现,30 kHz以下的故障行波受频率和传输距离的影响较小。据此,行波波速 v_k 可进一步表示为

$$v_k = \frac{2\pi f_k}{B(f_k)} = \frac{2\pi f_k}{\text{Im} \sqrt{(G_0 + j\omega C_0)(R_0 + j\omega L_0)}} \quad (19)$$

根据式(19),可以绘制行波频率与波速的关系曲线,如图4所示,可以观察到不同频率的行波分量具有明显的波速差异。然而,目前许多故障行波定位方法中,波速度的选择往往依赖于历史经验值,或者忽略线路参数的频率相关特性,仅基于某一固定线路参数计算得到的固定值。利用这2种方式获取的波速度进行故障定位,其定位结果具有较大的任意性,原因是波速度与真实值存在偏差,降低了故障定位精度。由图4可知,线模分量在1~100 kHz频带内行波信号波速度取值为 $2.915 \times 10^5 \sim 2.9677 \times 10^5$ km/s。在此范围内波速最大偏差为 0.0521×10^5 km/s,如果固有频率主成分为1 kHz,则最大定位误差为260.5 m,这是由波速度计算误差引起的;若采用时域双端行波定位法,假设用于故障定位的两端传输时差为150 μ s,则由波速度计算误差导致的最大定位误差为390.75 m。因此,某一经验波速或固定波速很难保证故障定位精度。

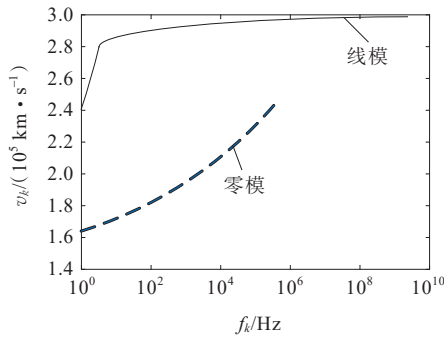


图4 波速度频率特性曲线

Figure 4 Frequency-dependent characteristic curve of wave velocity

本文所提方法刚好可以在确定固有频率主成分大小的基础上,计算与该频率主成分相匹配的波速度,实现故障距离计算与波速度计算的有机统一,提高配电网故障行波定位的可靠性和精度。

综上所述,基于多端行波频率矩阵的复杂配电网故障定位方法的流程如图5所示,具体步骤如下。

1) 在配电网各分支线路安装故障行波采集设备,定义其各分支节点对应的参考端。

2) 真实故障发生前,假设各分支节点 P_j 分别发生虚拟故障,对原始故障行波进行数据预处理,提取各端的基准固有频率主成分,基于配电网拓扑结

构和式(8)建立基准频率矩阵,为后面构造故障分支判定矩阵奠定基础,减少方法在线运行时的计算量和时间。

3) 真实故障发生后,同样对原始故障行波进行数据预处理,提取各端的故障固有频率主成分,基于式(10)建立故障频率矩阵,再基于式(11)得到故障判定矩阵 V 。

4) 若故障判定矩阵 V 满足式(14),则判定分支节点 P_j 发生故障。

5) 若故障判定矩阵 V 满足式(15),则判定分支 $E_i P_j$ 发生故障。

6) 若故障判定矩阵 V 满足式(16),则判定分支节点 P_j 和 P_s 之间发生故障。

7) 在判定故障分支的基础上,按照故障点到参考端的路径不经过分支节点或经过分支节点数量最少为原则确定参考端,选取步骤3)已经提取的参考端检测到的故障固有频率主成分。

8) 计算出与步骤7)选取的固有频率主成分相匹配的故障行波波速,结合式(6)输出故障点位置。

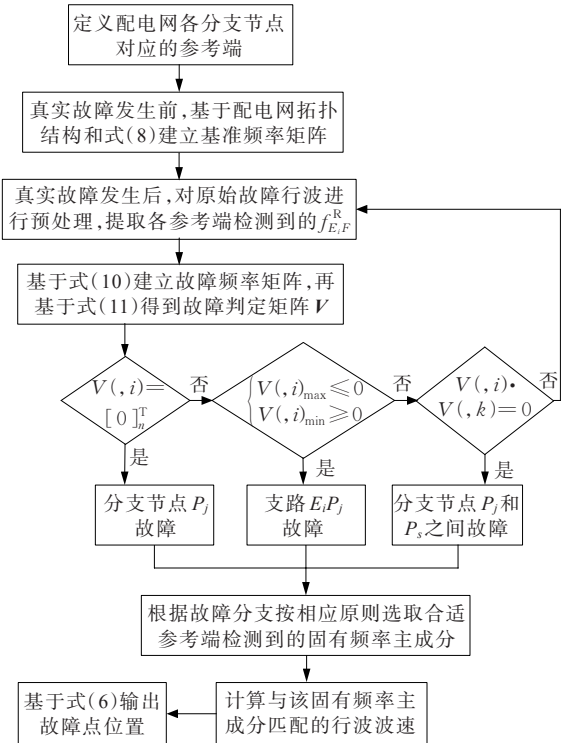


图5 故障定位流程图

Figure 5 Fault location flowchart

3 仿真实验

3.1 仿真模型

利用PSCAD/EMTDC对所提故障定位方法进行

行验证,搭建 10 kV 配电网仿真模型如图 6 所示, $E_1 \sim E_8$ 为各线路末端,均安装故障行波采集设备,采集故障发生前 0.2 ms 和故障发生后 0.8 ms 共 1 ms 的电压行波信号,采样频率为 100 kHz。定义分支节点 P_1 的参考端为 E_1 和 E_2 , 分支节点 P_6 的参考端为 E_7 和 E_8 , 分支节点 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 的参考端分别为 E_3 、 E_4 、 E_5 和 E_6 。 P_1P_3 和 E_5P_4 为架空—电缆混合线路,线路 E_3P_2 为电缆线路,其余的线路均为架空线路。同一类型线路参数一致,均采用分布参数频率相关模型。在分支节点 P_1 处接入一台 3 MW 的逆变型分布式电源,各支路末端都接有 Dyn 型配电变压器,变比为 10/0.4 kV。考虑配电网运行环境较为复杂,加入 50 dB 白噪声。

在分支节点 P_1 处设置故障 F_1 ;在分支节点 P_6 距离 E_7 端 2.4 km 处设置故障 F_2 ;在分支节点 P_4 和 P_5 之间距 P_4 点 2.9 km 处设置故障 F_3 ;3 个故障点的故障参数一致,均为 A 相接地故障,过渡电阻 200 Ω ,故障

初相角 30°。在真实故障发生之前,对配电网线路进行归一化处理^[30]。因此,即使故障发生在混联线路或电缆上,也能等效转化为故障发生在架空线上的情形。据此,基于配电网拓扑结构和式(8)建立基准频率矩阵 f^B 。

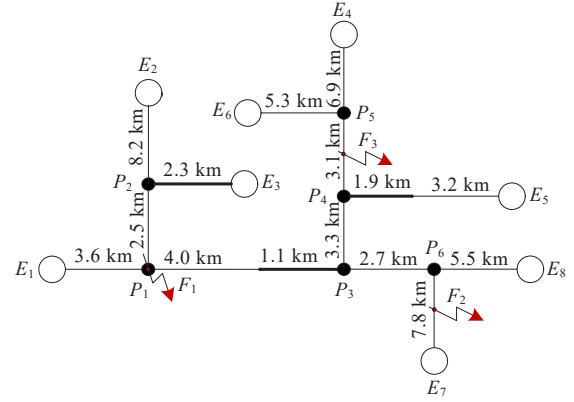


图6 10 kV 配电网仿真模型

Figure 6 Simulation model of 10 kV distribution network

$$f^B = \begin{bmatrix} 0 & 14.53 & -4.71 & 7.98 & -12.89 & -21.48 & -8.80 & -13.50 \\ -14.53 & 0 & -9.00 & -6.55 & -27.42 & -36.01 & -23.33 & -28.03 \\ -5.52 & 9.00 & 0 & 2.45 & -18.41 & -27.01 & -14.32 & -19.03 \\ -31.72 & -17.19 & -36.42 & 0 & -7.37 & -3.27 & -16.78 & -21.48 \\ -24.35 & -9.82 & -29.06 & 7.37 & 0 & -8.59 & -9.41 & -14.12 \\ -28.44 & -13.92 & -33.15 & 3.27 & -4.09 & 0 & -13.50 & -18.21 \\ -25.99 & -11.46 & -30.69 & 5.73 & -15.14 & -23.73 & 0 & -4.71 \\ -21.28 & -6.75 & -25.99 & 10.43 & -10.43 & -19.03 & 4.71 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.2 典型故障案例分析

对上述 3 个故障点分别进行仿真,采集其原始故障行波的线模信号,利用 EMD 和 FFT 对故障行波的线模分量进行频谱分析,提取各端不同故障时检测到的故障固有频率主成分 $f_{E_iP_j}^R$,如表 1 所示。

表1 不同故障下各端检测到的故障固有频率主成分
Table 1 Natural frequency principal components of faults detected at each end under different faults

端点	故障固有频率主成分/Hz		
	故障 F_1	故障 F_2	故障 F_3
E_1	40 728	8 378	9 399
E_2	13 703	5 960	6 459
E_3	23 273	7 258	8 012
E_4	7 676	6 851	20 651
E_5	9 459	8 237	15 766
E_6	8 378	7 405	26 658
E_7	8 995	61 092	8 780
E_8	10 473	13 451	10 182

限于篇幅,只给出故障 F_1 发生时各端的故障行

波固有频率主成分检测图,如图 7 所示,第一个峰值对应的横坐标大小为各端的故障固有频率主成分。

1) 故障 F_1 。

结合表 1 中故障 F_1 的故障固有频率主成分和式(10),可以得到故障频率矩阵 f^F 。通过式(11)将故障频率矩阵 f^F 减去基准频率矩阵 f^B ,从而获得故障 F_1 修正前的分支判定矩阵 V_{F_1} ,按照矩阵修正原则进行修正,修正后的分支判定矩阵 V'_{F_1} 为

$$V'_{F_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 10.23 & 23.74 & 37.24 & 49.92 & 34.79 & 34.78 \\ 0 & 0 & 0 & 23.74 & 37.24 & 49.93 & 34.79 & 34.78 \\ 0 & 0 & 0 & 23.74 & 37.24 & 49.93 & 34.78 & 34.78 \\ 0 & 0 & 10.23 & 0 & 0 & 0 & 11.05 & 11.04 \\ 0 & 0 & 10.23 & 0 & 0 & 12.68 & 11.05 & 11.05 \\ 0 & 0 & 10.23 & 0 & 0 & 0 & 11.04 & 11.05 \\ 0 & 0 & 10.23 & 0 & 13.50 & 26.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.24 & 0 & 13.50 & 26.19 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

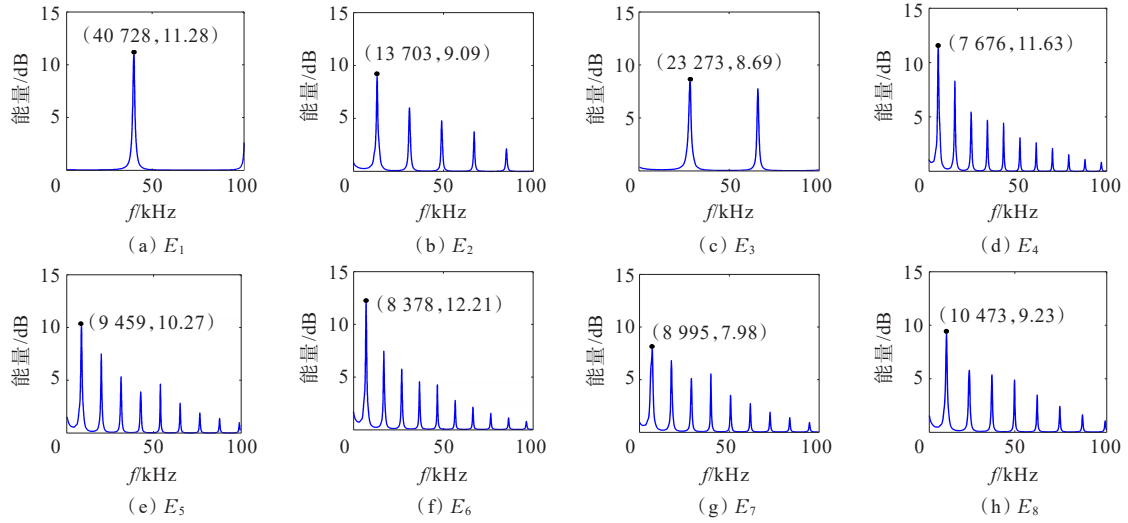


图7 F_1 故障时各端检测到的故障行波固有频率主成分

Figure 7 Natural frequency principal components of fault traveling wave detected at each end during F_1

根据对 V'_{F_1} 中元素特性的分析,可以观察到矩阵的第1列和第2列元素均为0,符合式(14)的条件。因此,可以推断故障 F_1 发生在以 E_1 和 E_2 为参考端的分支节点 P_1 上。进一步对故障位置进行精确定位,由于 P_1 到 E_1 的路径无分支节点, P_1 到 E_2 的路径经过分支节点 P_2 ,根据故障定位参考端确定原则,选用 E_1 为参考端计算故障距离。由表1可知,在

故障 F_1 发生时, E_1 检测到的故障固有频率主成分为 40 728 Hz, 相应的行波波速为 2.9391×10^5 km/s, 应用式(6)计算出故障 F_1 距离 E_1 的距离为 3.608 km。与实际故障距离相比,绝对误差仅为 8 m。

2) 故障 F_2 。

结合表1中故障 F_2 的故障固有频率主成分,同理可得到修正后的分支判定矩阵 V'_{F_2} 为

$$V'_{F_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 10.24 & 0 & 13.50 & 26.19 & -22.10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 13.51 & 26.19 & -22.09 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 13.50 & 26.19 & -22.10 & 0 \\ 23.74 & 23.74 & 33.96 & 0 & 0 & 0 & -22.10 & 0 \\ 23.74 & 23.74 & 33.97 & 0 & 0 & 12.68 & -22.10 & 0 \\ 23.73 & 23.74 & 33.97 & 0 & 0 & 0 & -22.10 & 0 \\ 56.89 & 56.88 & 67.11 & 33.15 & 46.65 & 59.33 & 0 & 22.10 \\ 34.78 & 34.78 & 45.02 & 11.06 & 24.55 & 37.24 & -22.10 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

经过对 V'_{F_2} 的元素特性进行分析,可以得知矩阵中的元素不符合分支节点发生故障时的特征。但是矩阵中第7列元素全部不大于0,第7行元素全部不小于0,满足式(15),可判断以 E_7 为参考端的分支节点与 E_7 所连分支发生故障,即故障 F_2 发生在分支 E_7P_6 上。进一步对故障位置进行精确定位,根据故障定位参考端确定原则,选用 E_7 为参考端计算故障距离。由表1可知,

在故障 F_2 发生时, E_7 检测到的故障固有频率主成分为 61 092 Hz, 相应的行波波速为 2.9458×10^5 km/s, 应用式(6)计算出故障 F_2 距离 E_7 的距离为 2.411 km。与实际故障距离相比,绝对误差仅为 11 m。

3) 故障 F_3 。

结合表1中故障 F_3 的故障固有频率主成分,同理可得到修正后的分支判定矩阵 V'_{F_3} 为

$$V'_{F_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 10.24 & -25.37 & 0 & 0.82 & 11.05 & 11.05 \\ 0 & 0 & 0 & -25.37 & 0 & 0.82 & 11.05 & 11.05 \\ 0 & 0 & 0 & -25.37 & 0 & 0.82 & 11.04 & 11.05 \\ 49.11 & 49.11 & 59.34 & 0 & 11.87 & 0 & 36.42 & 36.42 \\ 37.24 & 37.24 & 47.48 & -11.87 & 0 & 0.82 & 24.55 & 24.56 \\ 49.10 & 49.11 & 59.34 & -11.87 & 11.86 & 0 & 36.41 & 36.42 \\ 23.74 & 23.74 & 33.97 & -25.37 & 0 & 0.82 & 0 & 0 \\ 23.73 & 23.73 & 33.97 & -25.37 & 0 & 0.82 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

经过对 V_{F_i} 的元素特性进行分析,可知矩阵中的元素不符合分支节点发生故障时的特征。但是矩阵中第 4 列元素全部不大于 0,第 4 行元素全部不小于 0,满足式(15),可判断以 E_4 为参考端的分支节点与 E_4 所连分支发生故障,即故障 F_3 发生在分支 E_4P_3 上。此外,第 5 列元素和第 6 列元素点乘的结果为 0,满足式(16),可对故障区段进一步缩小,判断以 E_5 为参考端的分支节点与以 E_6 为参考端的分支节点之间发生故障,即故障 F_3 发生在分支节点 P_4 和 P_5 之间。进一步对故障位置进行精确定位,根据故障定位参考端确定原则,可选用 E_4 、 E_5 或 E_6 作为参考端,但由表 1 可知, E_6 相比于 E_4 和 E_5 ,在故障 F_3 发生时检测到故障固有频率主成分最大。因此,选用 E_6 为参考端计算故障距离,其固有频率主成分为 26 658 Hz,对应行波波速为 2.9246×10^5 km/s,应用式(6)计算出故障 F_3 距离 E_6 的距离为 5.485 km。与实际故障距离相比,绝对误差仅为 15 m。

3.3 不同故障工况下算法适应性分析

为探究所提故障定位方法在其他不同场景下的适应能力,分别在不同故障位置、故障类型、过渡电阻和故障初相角情况下对配电网故障进行仿真。值得说明的是,在不同故障工况下行波频谱波形的幅值会有所改变,但固有频率主成分大小基本不会发生变化,只与线路参数和配电网拓扑结构有关。因此,对于图 6 所示的配电网模型,不论发生何种故障,真实故障发生前基准频率矩阵仍然可以如式(20)所示。故障参数具体设置如下。

1) 为验证不同故障位置的影响,在 A 相接地故障、过渡电阻 50 Ω 、故障初相角 30° 的情况下,继续设置故障 F_4 、 F_5 、 F_6 ,其中 F_4 发生在分支节点 P_5 处, F_5 发生在分支 E_3P_2 距 E_3 端 1.7 km 处, F_6 发生在分支节点 P_1 和 P_3 之间距 P_1 点 0.4 km 处。将本文所提故障定位方法与文献[37]所提方法(利用图论和行波头时间信息实现故障分支判定和故障定位,波速度选取经验波速 3×10^5 km/s)进行对比分析,故障 $F_1 \sim F_6$ 的定位结果如表 2 所示。

2) 为验证不同故障类型的影响,在过渡电阻 50 Ω 、故障初相角 30° 的情况下,对 F_1 、 F_2 和 F_3 分别设置 A 相接地故障(AG)、AB 相间故障(AB)、BC 相间接地故障(BCG)和 ABC 三相故障(ABC)。按照本文所提故障定位方法,定位结果如表 3 所示。

表 2 不同故障位置下不同方法的故障定位结果

Table 2 Fault location results of different methods under different fault locations

故障位置	所提方法	判定结果	定位参考端	固有频率/Hz	波速/(km·s ⁻¹)	定位距离/km	绝对误差/m
F_1	本文	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	文献[37]	P_1	E_1		300.0	3.683	83
F_2	本文	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	文献[37]	E_7P_6	E_7		300.0	2.455	55
F_3	本文	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	文献[37]	E_4P_3	E_4		300.0	7.272	127
F_4	本文	P_5	E_6	27 664	292.5	5.286	14
	文献[37]	P_5	E_4		300.0	7.022	122
F_5	本文	E_3P_2	E_3	86 247	296.0	1.716	16
	文献[37]	E_3P_2	E_3		300.0	1.739	39
F_6	本文	P_1P_3	E_1	36 655	293.7	4.007	7
	文献[37]	P_1P_3	E_1		300.0	4.092	92

表 3 不同故障类型下故障定位结果

Table 3 Fault location results under different fault types

故障位置	故障类型	判定结果	定位参考端	固有频率/Hz	波速/(km·s ⁻¹)	定位距离/km	绝对误差/m
F_1	AG	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	AB	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	BCG	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	ABC	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
F_2	AG	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	AB	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	BCG	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	ABC	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
F_3	AG	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	AB	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	BCG	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	ABC	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15

3) 为验证不同过渡电阻的影响,在 A 相接地故障、故障初相角 30° 的情况下,对 F_1 、 F_2 和 F_3 分别设置 0.1、50、1 000、5 000 Ω 的过渡电阻。按照本文所提故障定位方法,定位结果如表 4 所示。

4) 为验证不同故障初相角的影响,在 A 相接地

故障、过渡电阻 $50\ \Omega$ 的情况下,对 F_1 、 F_2 和 F_3 分别设置 5° 、 30° 、 60° 、 90° 的故障初相角。按照本文所提故障定位方法,定位结果如表5所示。

表4 不同过渡电阻下故障定位结果

Table 4 Fault location results under different transition resistances

故障位置	过渡电阻/ Ω	判定结果	定位参考端	固有频率/Hz	波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	定位距离/km	绝对误差/m
F_1	0.1	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	50	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	1 000	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	5 000	P_1	E_1	40 729	293.9	3.608	8
F_2	0.1	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	50	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	1 000	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	5 000	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
F_3	0.1	P_4P_5	E_6	26 657	292.5	5.486	14
	50	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	1 000	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	5 000	P_4P_5	E_6	26 659	292.5	5.485	15

表5 不同故障初相角下故障定位结果

Table 5 Fault location results under different fault initial phase angles

故障位置	故障初相角/($^\circ$)	判定结果	定位参考端	固有频率/Hz	波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	定位距离/km	绝对误差/m
F_1	5	P_1	E_1	40728	293.9	3.608	8
	30	P_1	E_1	40 728	293.9	3.608	8
	60	P_1	E_1	40 729	293.9	3.608	8
	90	P_1	E_1	40 731	293.9	3.608	8
F_2	5	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	30	E_7P_6	E_7	61 092	294.6	2.411	11
	60	E_7P_6	E_7	61 093	294.6	2.411	11
	90	E_7P_6	E_7	61 093	294.6	2.411	11
F_3	5	P_4P_5	E_6	26 659	292.5	5.486	15
	30	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	60	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15
	90	P_4P_5	E_6	26 658	292.5	5.485	15

综合表2~5可知,本文所提故障定位方法对于不同位置、类型、过渡电阻、初相角均能可靠判定

故障分支,定位精度高且具有较强的适应性,定位结果绝对误差不超过 20 m。特别是由表2可知,文献[37]所提方法故障定位误差均大于本方法,原因在于该方法没有将分支节点之间故障特性考虑到故障判定原则中,导致存在“伪故障点”问题,并且在故障定位时过于依赖固定的经验波速。而本方法无须检测行波波头时间,仅利用行波固有频率主成分信息,通过构建多端频率矩阵准确刻画了配电网拓扑任一分支发生故障的情形,在保证故障分支可靠判定的同时实现了频率分量与波速度相互匹配,大大提高了故障定位精度。

4 结语

本文聚焦于复杂配电网故障分支的准确判定和波速度的准确选择,基于多端行波频率矩阵,提出一种不依赖波头时间信息的复杂配电网故障定位方法。通过对故障行波固有频率主成分与传输距离的关系进行分析,定义各分支节点的参考端,并计算真实故障发生前的基准固有频率矩阵与真实故障发生后的故障固有频率矩阵之间的差值,最终得到相应的故障分支判定矩阵,利用该矩阵中的元素特征实现复杂配电网故障分支的判定。在判定故障分支的基础上,按照故障点到参考端的路径不经过分支节点或经过分支节点数量最少为原则选取参考端,同时计算对应参考端故障固有频率主成分下的波速度,进而精确定位故障点位置。

仿真结果表明所提方法无须检测行波波头时间,仅利用行波固有频率主成分信息,通过构建多端频率矩阵准确刻画了配电网拓扑发生任一分支发生故障的情形,在保证故障分支可靠判定的同时实现了频率分量与波速度相互匹配,大大提高了故障定位精度。对于不同位置、类型、过渡电阻、初相角,所提故障定位方法均能可靠判定故障分支,定位精度高且具有较强的适应性,在论文给定的配电网案例中,定位结果绝对误差不超过 20 m。

参考文献:

- [1] 魏亚军,李开灿,董振.含逆变型分布式电源的配电网故障暂态分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):102-108+125.
WEI Yajun,LI Kaican,DONG Zhen.Transient analysis of faults in the distribution networkswith inverter interfaced

- distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(3):102-108+125.
- [2] 邵华,贺春光,安佳坤,等.基于线性约束的有源配电网规划研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):66-74.
SHAO Hua, HE Chunguang, AN Jiakun, et al. Active distribution network planning model based on linearized constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):66-74.
- [3] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022,43(3):476-484.
- [4] 陈宁铤,黄文焘,杨欢红,等.多端环型海底观测网供电系统故障主动定位方法[J].电力系统自动化,2023,47(19):147-155.
CHEN Ningting, HUANG Wentao, YANG Huanhong, et al. Active fault location method for power supply system of multi-terminal undersea observation ring networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(19):147-155.
- [5] 邓丰,徐帆,曾哲,等.基于多源暂态信息融合的单端故障定位方法[J].电工技术学报,2022,37(13):3201-3212.
DENG Feng, XU Fan, ZENG Zhe, et al. Single-ended fault location method based on multi-source transient information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(13):3201-3212.
- [6] 黄鸣宇,祁升龙,芦翔,等.基于轨迹去伪的输电线路故障定位方法[J].电测与仪表,2022,59(7):85-90.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. A novel trajectory purification based fault location method for transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(7):85-90.
- [7] 贾清泉,郑旭然,刘楚,等.基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5933-5941.
JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(20):5933-5941.
- [8] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2180-2191
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(7):2180-2191,
- [9] 陈海东,蒙飞,赵磊,等.利用分布式电源注入信号的配电网故障性质识别技术[J].高压电器,2022,58(12):123-129+146.
CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al. Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(12):123-129+146.
- [10] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等.基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control,2022,50(3):140-147.
- [11] 何正友,李波,廖凯,等.新形态城市电网保护与控制关键技术[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6193-6206.
HE Zhengyou, LI Bo, LIAO Kai, et al. Key technologies for protection and control of novel urban power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(19):6193-6206.
- [12] 于力,焦在滨,王晓鹏,等.基于PMU的中压配电网精确故障定位方法及关键技术[J].电力系统自动化,2020,44(18):30-38.
YU Li, JIAO Zaibin, WANG Xiaopeng, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(18):30-38.
- [13] 董旭柱,黄邵远,陈柔伊,等.智能配电网自愈控制技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):17-21.
DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012, 36(18):17-21.
- [14] 白星振,宋昭杉,葛磊蛟,等.含分布式电源的复杂配电网相间故障定位等效解耦模型[J].电力建设,2022,43(2):45-53.
BAI Xingzhen, SONG Zhaoshan, GE Leijiao, et al. An equivalent decoupling model for fault location in complex distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Construction,2022,43(2):45-53.
- [15] 麦章渠,曾颖,张禄亮,等.基于改进哈里斯鹰优化算法的有源配电网故障定位[J].智慧电力,2022,50(11):104-111.
MAI Zhangqu, ZENG Ying, ZHANG Luliang, et al. Fault location of active distribution network based on improved Harris Hawks optimization algorithm[J]. Smart Power,2022,50(11):104-111.
- [16] 宋连峻,曲霏,廉洪波,等.基于阻抗分析的复杂配电网接地故障定位方法[J].电网与清洁能源,2022,38(8):69-74.
SONG Lianjun, QU Fei, LIAN Hongbo, et al. A grounding fault location method for complex distribution networks

- based on impedance analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 69-74.
- [17] 朱占春, 潘宗俊, 唐金锐, 等. 基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 180-191.
ZHU Zhanchun, PAN Zongjun, TANG Jinrui, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 180-191.
- [18] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409.
- [19] 何正友, 李小鹏, 林圣. 时频联合分析在输电线路继电保护和故障定位中的应用综述[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 3-16.
HE Zhengyou, LI Xiaopeng, LIN Sheng. Application review of time-frequency joint analysis in protective relaying and fault location[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 3-16.
- [20] 张帆, 潘贞存, 马琳琳, 等. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 78-83.
ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Linlin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [21] 宁一, 王大志, 江雪晨, 等. 基于零模行波波速特性的配电网单相接地故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1): 93-98.
NING Yi, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. A single phase-to-ground fault location scheme for distribution networks based on zero-mode traveling wave velocity property[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 93-98.
- [22] 区伟潮, 葛阳, 朱延廷, 等. 基于双端原理的中压电缆潜伏性故障定位方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 84-91.
OU Weichao, GE Yang, ZHU Yanting, et al. Method for locating faults of medium voltage cables based on double-ended principle[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 84-91.
- [23] 王哲, 迟福建, 赵志斌, 等. 基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位[J]. 电气传动, 2021, 51(16): 46-50.
WANG Zhe, CHI Fujian, ZHAO Zhibin, et al. Single-phase ground fault location of hydropower distribution network based on traveling wave detection[J]. Electric Drive, 2021, 51(16): 46-50.
- [24] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115.
LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115.
- [25] WU L Y, HE Z Y, QIAN Q Q. A new single ended fault location technique using travelling wave natural frequencies[C]//2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China. IEEE, 2009: 1-5.
- [26] 郭林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
WU Linyong. Single-ended traveling wave fault location method using natural frequency of fault traveling wave [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [27] 李小鹏, 何正友, 夏璐璐. 同杆双回输电线路的固有频率测距算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 47-51.
LI Xiaopeng, HE Zhengyou, XIA Lulu. Natural frequencies based fault location algorithm for parallel transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 47-51.
- [28] 夏璐璐, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 67-73.
XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [29] 黄忠棋. 采用行波固有频率的混合线路故障测距新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 73-79.
HUANG Zhongqi. New method of fault location for hybrid lines by using traveling wave natural frequencies [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 73-79.
- [30] 林圣, 武骁, 何正友, 等. 基于行波固有频率的电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 270-275.
LIN Sheng, WU Xiao, HE Zhengyou, et al. A power system fault location method based on natural frequencies of traveling waves[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 270-275.
- [31] 李小鹏, 何正友, 武骁, 等. 计及测量装置失效的输电网行波固有频率故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1217-1222.

- 2022,50(4): 110-116.
- [8] 徐波,宋爱国.基于点云配准改进的电力巡检机器人云台伺服技术[J].供用电,2023,40(3): 95-101.
XU Bo, SONG Aiguo. PTZ servo technology of electrical power inspection robot based on point cloud registration ICP algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 95-101.
- [9] 司方远,韩英华,赵强,等.基于AP-LOF离群组检测的配电网连接验证[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(8): 1070-1074.
SI Fangyuan, HAN Yinghua, ZHAO Qiang, et al. Verification of distribution network connectivity based on AP-LOF outlier group detection[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(8): 1070-1074.
- [10] 杨超,伏晓燕.智能变电站继电保护设备全防误状态监测技术研究[J].电网与清洁能源,2023,39(7): 73-79.
YANG Chao, FU Xiaoyan. Research on the full error prevention state monitoring technology of relay protection equipment in intelligent substations[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 73-79.
- [11] 李铁成,刘清泉,任江波,等.基于动态优化马尔可夫链的线路继电保护装置状态预测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(13): 97-106.
LI Tiecheng, LIU Qingquan, REN Jiangbo, et al. State prediction method of line relay protection device based on the Markov chain with dynamic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 97-106.
- [12] 王业,崔玉,陆兆沿,等.基于CNN图像识别算法的保护装置智能巡视技术[J].电力工程技术,2022,41(6): 252-257.
WANG Ye, CUI Yu, LU Zhaoyan, et al. Intelligent inspection technology of protection device based on convolution neural network image recognition algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 252-257.
- [13] HARIRI S, KIND M C, BRUNNER R J. Extended isolation forest[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2021, 33(4): 1479-1489.
- [14] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.
- [15] DAVIS J, GOADRICH M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves[C]//Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. Pennsylvania, ACM, 2006: 233-240.

(上接第30页 Continued from page 30)

- LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao, et al. Natural frequencies based fault location method for transmission network considering measurement device invalidation[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1217-1222.
- [32] 陈双,林圣,李小鹏,等.基于系统阻抗自适应的行波固有频率测距方法[J].电网技术,2013,37(6): 1739-1745.
CHEN Shuang, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. A traveling wave natural frequency-based single-ended fault location method adaptive to system impedance[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1739-1745.
- [33] 张媛媛,朱永利.基于行波固有频率的多分支输电线路故障定位[J].电力科学与技术学报,2016,31(3): 65-72.
ZHANG Yuanyuan, ZHU Yongli. A fault location method for multi-terminal transmission lines based on traveling wave natural frequencies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3): 65-72.
- [34] 鞠玲,黄恽.基于EFPI的数字配电网超声检测传感器[J].中国电力,2023,56(6): 194-201.
JU Ling, HUANG Yi. Ultrasonic detection sensor of digital distribution network based on EFPI[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 194-201.
- [35] 李小鹏.高压输电线路超高速纵联保护方法研究[D].成都:西南交通大学,2015.
LI Xiaopeng. Research on ultra-high speed longitudinal protection method for high voltage transmission lines[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [36] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等.基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3): 140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.
- [37] 王阳,曾祥君,黎锐烽,等.基于图论的配电网故障行波定位新算法[J].电力系统自动化,2012,36(18): 143-147.
WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, et al. A traveling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 143-147.