

Single Terminal Traveling Wave Fault Location Method Based on SVM

Xinglai Shen¹, Yabo Cui², Qi Cao¹, Rui Liang³

¹Xuzhou Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Corporation, Xuzhou Jiangsu

²Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou Zhejiang

³School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Email: cumtlr@126.com

Received: Aug. 8th, 2016; accepted: Aug. 28th, 2016; published: Aug. 31st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

When single-phase-to-earth fault occurred in radial distribution network supplied by single power, the key problem of the single-ended traveling wave fault location lies in the correct recognition of the second travelling wave head to reach the measuring point. In view of the above problem, this paper introduces single terminal traveling wave fault location method based on SVM. After identifying the fault section by the SVM, the second traveling wave head coming from the fault point or bus at opposite terminal is recognized based on lattice diagram of traveling waves. Electromagnetic coupling effect is eliminated by phase mode transformation. Through the study of relevant knowledge of wavelet transform, the optimal wavelet base is selected for wavelet transform in order to identify the fault traveling wave head. The time corresponding to fault traveling wave modulus maximum is detected and time difference of arrival and velocity of the corresponding wave head is used to achieve fault location.

Keywords

SVM, Single Terminal Traveling Wave Method, Fault Location, Wavelet Transform

基于支持向量机的单端行波故障测距方法

沈兴来¹, 崔亚博², 曹琦¹, 梁睿³

¹江苏省电力公司徐州供电公司, 江苏 徐州

²国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州

³中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州
Email: cumtlr@126.com

收稿日期: 2016年8月8日; 录用日期: 2016年8月28日; 发布日期: 2016年8月31日

摘要

单端辐射状配电网发生单相接地故障时, 单端行波法故障测距的难点在于第二个到达测量点的故障行波波头的正确辨识。针对上述难点, 本文提出了一种基于支持向量机的单端行波故障测距方法。首先, 利用支持向量机正确地识别出故障段, 然后根据行波传播的网格图确定第二个到达测量点的故障行波波头是来自于故障点还是来自于对端母线。通过相模变换消除电磁耦合的影响, 通过对小波变换相关知识的研究, 选择最优小波基进行小波变换, 对故障行波波头进行识别, 检测故障行波波头模极大值对应的时刻, 进而利用相应波头到达测量点的时间差结合波速实现故障点的精确测距。

关键词

支持向量机, 单端行波法, 故障测距, 小波变换

1. 引言

我国中压配电网中, 大多采用中性点非有效接地方式。中性点非有效接地电网中, 单相接地又是最常见的一种故障, 当配电网中发生单相接地故障时, 由于其三相线电压仍然保持对称和大小不变, 故可继续运行 1~2 h, 若不及时找出故障点, 易导致故障扩展为两点或多点接地短路, 破坏系统的安全运行, 因此, 为了防止故障进一步加剧和蔓延, 需要快速、准确地进行故障定位, 以便及时对故障点进行排除, 确保配电网的可靠性和稳定性, 为此提出了针对配电网的单相接地故障定位问题[1]-[3]。

行波测距方法从实现原理上可以划分为单端行波测距法和双端行波测距法。双端行波测距法是在线路的两端均安装测量装置, 利用故障点产生的初始行波波头到达两端测量装置的时间差进行故障距离的计算[4]。由于双端行波法是利用故障点产生的初始行波波头传播到线路两端的时间差进行故障测距, 由于需要对线路两端的电压或电流行波进行同步测量, 因此在母线侧和每条线路的末端均需要设置测量设备, 为了保持测量的同步性, 双端行波法还需要严格的时间同步装置, 对设备要求较高, 实现比较困难, 并且设备投入较多, 显著增加了故障测距的成本, 本文采用单端行波法进行故障测距的研究。单端行波测距法是在线路的一端安装测量装置, 利用故障点产生的初始行波波头和故障点的反射行波波头到达测量装置的时间差进行故障测距, 也可以利用故障点产生的初始行波波头和对端母线的反射行波波头到达测量装置的时间差进行故障测距[5]。单端行波法的难点在于到达测量点的第二个行波波头的辨识问题, 针对上述难点, 本文提出了一种基于支持向量机的单端行波故障测距方法, 即首先利用支持向量机识别出故障段, 在正确识别出故障段的基础之上, 根据行波的网格图确定到达测量点的第二个行波波头是来自于故障点还是来自于对端母线, 然后再利用单端行波法计算出故障点的精确位置。

2. 支持向量机

2.1. 支持向量机简介

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是由 Vapnik 领导的 AT&T Bell 实验室研究小组提出来的

一种两类分类技术,该技术在小样本、非线性以及高维模式识别等多个方面均表现出了一些特有的优势,被广泛地应用于统计分类、模式识别和回归分析等诸多问题中[6]-[8]。

首先,给出训练样本 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\}$, 其中, x_i 为 m 维的输入向量, y_i 表示类别, 并且 $y_i \in \{-1, 1\}$, 代表两个不同的类。支持向量机的目的就是要在 m 维的数据空间中找到一个能够将两个不同的类分开的 $m-1$ 维的超平面(即分离超平面), 该分离超平面的方程可以表示为

$$w^T x + b = 0 \tag{1}$$

式中: w 为权值向量; b 为偏置。

假设训练样本中所有的输入向量均满足如下约束条件:

$$\begin{cases} w^T x_i + b \geq 1 & (y_i = 1) \\ w^T x_i + b \leq -1 & (y_i = -1) \end{cases} \tag{2}$$

上式可以综合改写成如下形式

$$y_i (w^T x_i + b) - 1 \geq 0 \tag{3}$$

以二维特征空间为例,可以得到一种典型的情形如图 1 所示。使得约束条件 $y_i (w^T x_i + b) - 1 \geq 0$ 取等号的一些输入向量(这些输入向量均位于超平面 H_1 或 H_2 上, 如图 1 中圆圈包围的数据点所示)对于支持向量机分离超平面的确立至关重要, 这些输入向量被称为支持向量[9]。

为了使得分类正确的可能性尽可能的大, 我们总是希望分离超平面的分离间距能够最大化, 即

$$\begin{cases} \max \left(\frac{2}{\|w\|} \right) \\ y_i (w^T x_i + b) - 1 \geq 0 \end{cases} \tag{4}$$

式(4)等价于

$$\begin{cases} \min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 \right) \\ y_i (w^T x_i + b) - 1 \geq 0 \end{cases} \tag{5}$$

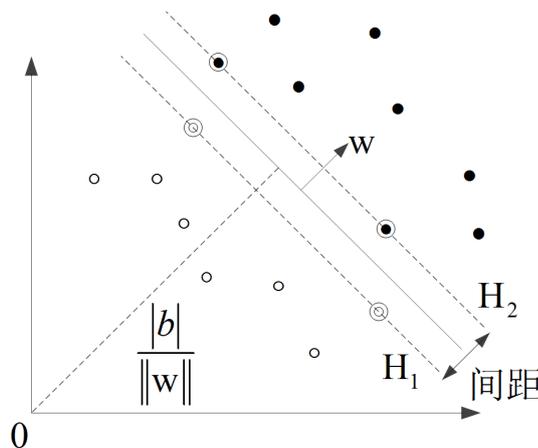


Figure 1. Optimal separating hyper plane for two-dimension linear separable model
图 1. 二维线性可分模式分类最优分离超平面

式(5)是一个凸二次优化问题, 可以应用拉格朗日乘数法将上述凸二次优化问题转化为拉格朗日对偶问题:

$$\begin{cases} L_d = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

假设输入向量中有 n_{sv} 个向量为支持向量, 则可求得 w 和为 b 分别为

$$\begin{cases} w = \sum_{i=1}^{n_{sv}} \alpha_i y_i x_i \\ b = \frac{1}{n_{sv}} \left(\sum_{i=1}^{n_{sv}} y_i - w x_i \right) \end{cases} \quad (7)$$

于是, 可得分类函数为

$$f(x) = w^T x + b = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i \cdot x + b \quad (8)$$

如果训练样本中的数据是非线性的, 一般采取的方法是利用映射 Φ 将非线性数据映射到高维空间中的线性数据。在高维空间中, 决策函数成为

$$f(x) = w^T x + b = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \Phi(x_i) \cdot \Phi(x) + b \quad (9)$$

在高维空间中, 向量之间的点积很难计算, 此时, 可以通过找到一个满足条件 $K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 的核函数 K , 用 $K(x_i, x_j)$ 代替 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$, 而不必过多地了解 Φ 。用 $K(x_i, x_j)$ 替换式(9)中的 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 可得分类函数

$$f(x) = w^T x + b = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x_j) + b \quad (10)$$

常见的核函数有线性核函数、多项式核函数以及高斯径向基核函数等, 其中, 高斯径向基核函数比较常用, 本文采用高斯径向基核函数。高斯径向基核函数表达式为

$$K(x_i, x_j) = e^{-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2} \quad (11)$$

其中, σ 为高斯标准差。通过调整 σ , 高斯径向基核函数可以获得比较高的灵活性, 因此它是使用得最广泛的核函数之一[10][11]。

2.2. 故障特征提取

选取三相和零模下暂态电压小波变换能量和暂态电流量作为支持向量机的输入。特征量提取步骤如下:

- (1) 首先在母线处采集三相信号, 并对采集到的三相电压进行相模变换, 以获得零模电压分量;
- (2) 分别对采集到的三相电压和零模电压分量进行小波变换, 以获得相应的电压小波变换系数;
- (3) 分别计算一个周期内的电压小波系数能量 E_{vk} 和电流量 E_{ik} , 计算方法如下:

$$\begin{cases} E_{vk} = \sum_{m=0}^{M-1} WTC_k^2(m), \quad k \in \{a, b, c, 0\} \\ E_{ik} = \sum_{m=0}^{M-1} I_k^2(m), \quad k \in \{a, b, c, 0\} \end{cases} \quad (12)$$

式中： E_{vk} 是电压小波系数能量； E_{ik} 是电流能量； M 是一个周期内样本的数量。

(4) 为了防止支持向量机的权向量 w 过大和过度拟合，将电压小波系数能量和电流能量进行标准化处理：

$$\begin{cases} E_{NVk} = \frac{E_{V_k}}{E_{V_a} + E_{V_b} + E_{V_c} + E_{V_0}} & k \in \{a, b, c, 0\} \\ E_{NIk} = \frac{E_{I_k}}{E_{I_a} + E_{I_b} + E_{I_c} + E_{I_0}} & k \in \{a, b, c, 0\} \end{cases} \quad (13)$$

式中： E_{NVk} 是标准化的电压小波系数能量； E_{NIk} 是标准化的电流能量。

SVM 需要在一个给定的拓扑结构下，采用不同的故障情况下的特征量构成的训练样本进行训练，支持向量机的训练过程如图 2 所示。

将输入要素 E_{NVk} 和 E_{NIk} 储存在一个 $N \times 8$ 维的训练矩阵中作为支持向量机分类器的训练样本，训练矩阵的每一列代表一种要素，每一行代表一个训练样本点， N 是不同故障情况(如不同故障位置、不同故障电阻和不同故障初始相角等)的总数。

3. 单端行波法测距原理

通过上一部分介绍的利用支持向量机进行故障段的识别，可以准确地确定故障是位于线路的前半段还是后半段，在识别出故障段之后，利用单端行波法进行故障测距，可以有效地解决第二个反向行波波头的正确辨识问题。故障位于线路不同位置时的行波网格图如图 3 所示[12]。

图 3 中： S 为母线， M 为测量点， Z 为线路中点， T 为线路端。 f_A 和 f_B 分别表示位于线路前半段和后半段的故障。根据故障位于线路前半段或后半段，可以分为以下两种情况：

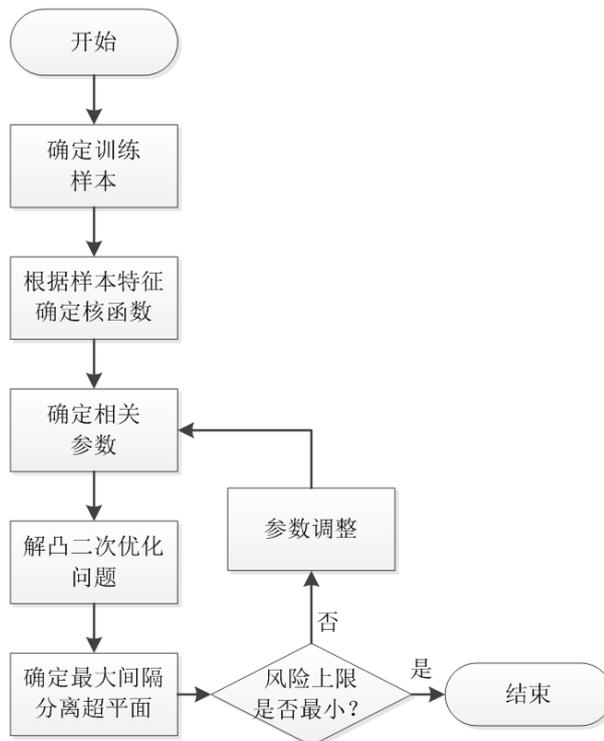


Figure 2. SVM training process
图 2. 支持向量机的训练过程

(1) 当故障位于线路的前半段时(如图 4 中的 f_A)，初始行波波头到达母线 S 的时刻是 t_{A1} ，故障点处的第一个反射行波波头到达母线 S 的时刻是 t_{A2} 。于是，可求出初始行波波头和故障点的反射波波头到达时刻之间的时间差为 $\Delta t_A = t_{A2} - t_{A1}$ ，因此，结合行波的传播速度即可求出故障点距离母线的距离为

$$l_A = \frac{v \times \Delta t_A}{2} \quad (14)$$

式中： l_A 为故障点距离母线的距离； v 为行波在线路中的传播速度； Δt_A 可通过行波小波变换系数在母线处的第一个和第二个峰值之间的时间差求出，这两个峰值分别对应初始行波波头和故障点的反射行波波头。

(2) 当故障位于线路的后半段时(如图 4 中的 f_B)，初始行波波头到达母线 S 的时刻是 t_{B1} ，线路端的第一个反射波波头到达母线 S 的时刻是 t_{B2} 。于是，可求出初始行波波头和线路端的反射波波头到达时刻之间的时间差为 $\Delta t_B = t_{B2} - t_{B1}$ ，因此，结合行波的传播速度即可求出故障点距离母线的距离为

$$l_B = L - \frac{v \times \Delta t_B}{2} \quad (15)$$

式中： L 为线路全长； v 为行波在线路中的传播速度； Δt_B 可通过行波小波变换系数在母线处的第一个和第二个峰值之间的时间差求出，这两个峰值分别对应初始行波波头和线路端的反射行波波头。

4. 仿真分析

采用 PSCAD/EMTDC 和 MATLAB 进行仿真分析，其中 PSCAD/EMTDC 作为仿真平台，仿真数据的后续处理在 MATLAB 中进行。

4.1. 仿真模型的搭建

在 PSCAD 搭建有四条架空出线的 35 kV 单端辐射状配电网模型进行仿真分析，其中，一号到四号

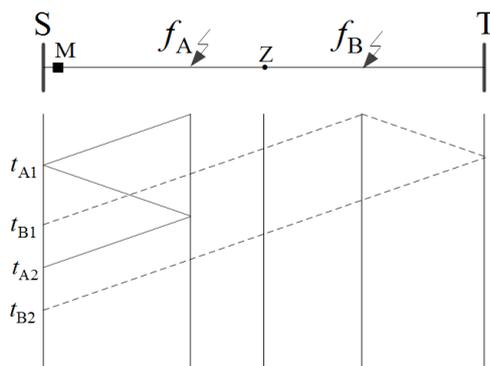


Figure 3. Lattice diagram of traveling waves for different fault locations

图 3. 故障位于线路不同位置时的行波网格图



Figure 4. Single-ended radial distribution network topology

图 4. 单端辐射状配电网拓扑结构

线路的长度分别为 28 km、33 km、36 km 和 42 km，其拓扑结构如图 4 所示。

由于行波是在分布参数电路上形成并传播的，所以线路模型采用基于行波原理的 Bergeron 模型。根据《35~110 kV 输电线路设计》中 35 kV 拔梢单杆模型，建立线路模型，PSCAD/EMTDC 仿真中线路的参数设定如图 5 所示，包括线路高度、相间距离、分裂导线、架空地线以及大地电阻率等参数。

4.2. 仿真算例分析

首先对采集到的故障信号进行相模变换，消除电磁耦合的影响。由于行波零模分量具有较强的依频特性，与行波零模分量相比，行波线模分量参数较稳定，在沿线路传播的过程中衰减较小，因此，本文利用线模分量进行故障测距[13][14]。

行波传播速度的确定，本文利用的是电压行波的线模分量进行故障测距，对于线模分量，正序参数基本上与频率无关，故可忽略频率变化对线模波速的影响[15]，根据行波速度公式有可得

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2.868 \times 10^8 \text{ m/s}$$

式中： $L = 2.96 \text{ mH/km}$ ， $C = 3.86 \text{ nF/km}$ 是在线路模型中设置。

设置两种不同故障条件的仿真算例进行分析，故障条件见表 1。

(1) 算例一：SVM 输出 1，表明故障位于线路的前半段。对线模电压行波分量进行小波变换， $d1$ 层结果如图 6 所示。

由上图可知，到达母线的初始行波波头与故障点的反射行波波头之间的时间差为 $\Delta t_1 = 83.4 \mu\text{s}$ ，结合线模电压行波分量的传播速度 v ，根据式(14)即可计算出故障距离为 11.96 km，误差为 -40 m。

(2) 算例二：SVM 输出 -1，表明故障位于线路的后半段。然后利用单端行波法进行故障定位，在母

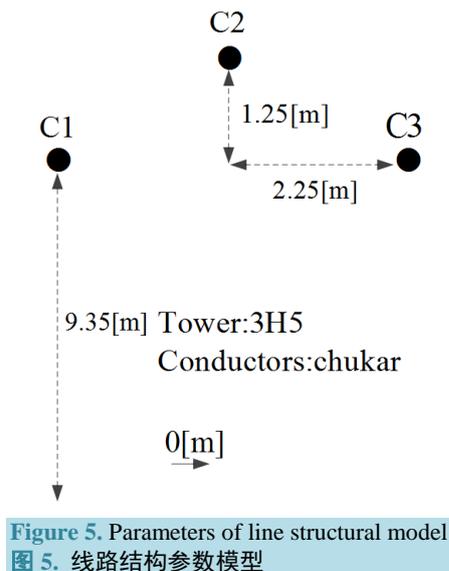


Table 1. Fault condition corresponding to different simulation examples

表 1. 仿真算例故障条件

仿真算例	故障距离/km	故障电阻/ Ω	故障角/度	SVM
算例一	12	50	45	1
算例二	32	100	90	-1

线侧采集三相电压信号，故障相电压行波如图 7 所示。

由上图可知，到达母线的初始行波波头与故障点的反射行波波头之间的时间差为 $\Delta t_2 = 70.1 \mu\text{s}$ ，结合线模电压行波分量的传播速度 v ，根据式(15)即可计算出故障距离为 31.948 km，误差为 -52 m。

4.3. 不同故障情况的影响

(1) 故障距离的影响

假设单相金属性接地故障分别位于线路四上距离母线 S 5 km、12 km、17 km、24 km、32 km 和 38 km 处。通过小波变换求出每种故障距离下初始行波波头和第二个行波波头之间的时间差，利用支持向量机分类器 SVM 进行故障段的识别，然后结合行波的传播速度，根据相应公式计算出故障距离，结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，针对不同的故障距离，本文所采用的故障定位方法均能实现故障测距，并且都达到了一定的精度，因此，证明了该方法不受故障距离的影响。

(2) 故障电阻的影响

假设单相接地故障分别位于线路四上距离母线 S 5 km、17 km 和 32 km 处，对应每种故障距离分别设置四种不同的故障电阻，即 0Ω 、 50Ω 、 100Ω 和 200Ω 。通过小波变换求出每种情况下初始行波波头和第二个行波波头之间的时间差，利用支持向量机分类器 SVM 进行故障段的识别，然后结合行波的传播速度，根据相应公式计算出故障距离，结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出，在不同的故障电阻下，本文所采用的故障定位方法均实现了故障测距，并且都达到了一定的精度，因此，该方法不受故障电阻的影响。

(3) 故障初始相角的影响

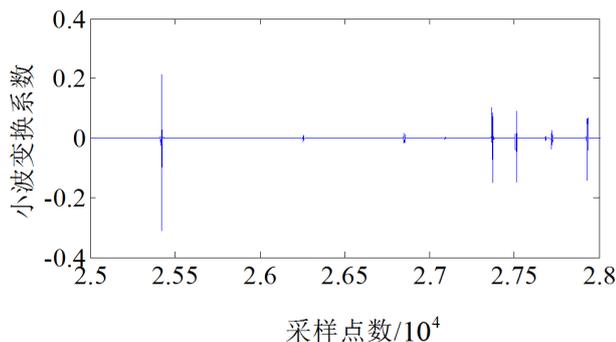


Figure 6. Wavelet analysis result for example one
图 6. 算例一小波变换结果

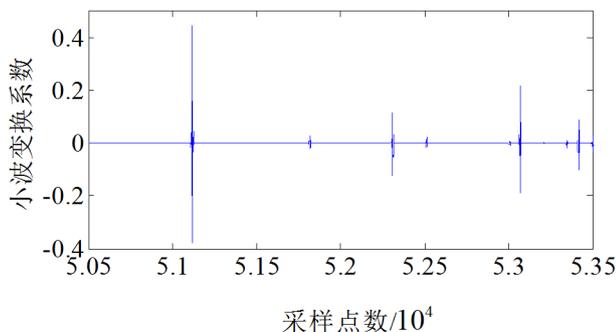


Figure 7. Wavelet analysis result for example two
图 7. 算例二小波变换结果

假设单相接地故障分别位于线路四上距离母线 S 12 km、24 km 和 38 km 处, 对应每种故障距离分别设置两种不同的故障初始相角, 即 0° 和 18° 、 36° 和 54° 、 72° 和 90° 。不同故障初始相角下的定位结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 在不同的故障初始相角下, 本文所采用的故障定位方法同样都能实现故障测距,

Table 2. Fault location result corresponding to different fault distance

表 2. 不同故障距离时的定位结果

故障距离/km	SVM	波头时间差/ μs	测距结果/km	测距误差/m
5	1	34.6	4.962	-38
12	1	83.4	11.96	-40
17	1	118.8	17.036	36
24	-1	125.8	23.961	-39
32	-1	70.2	31.934	-66
38	-1	27.9	37.999	-1

Table 3. Fault location result corresponding to different fault resistance

表 3. 不同故障电阻时的定位结果

故障距离/km	接地电阻/ Ω	SVM	波头时间差/ μs	测距结果/km	测距误差/m
5	0	1	34.6	4.962	-38
	50	1	34.6	4.962	-38
	100	1	34.6	4.962	-38
	200	1	34.5	4.947	-53
17	0	1	118.8	17.036	36
	50	1	118.7	17.021	21
	100	1	118.8	17.036	36
	200	1	118.9	17.05	50
32	0	-1	70.2	31.934	-66
	50	-1	70.2	31.934	-66
	100	-1	70.1	31.948	-52
	200	-1	70.3	31.919	-81

Table 4. Fault location result corresponding to different fault inception angles

表 4. 不同故障初始相角时的定位结果

故障距离/km	故障角/度	SVM	波头时间差/ μs	测距结果/km	测距误差/m
12	0	1	83.5	11.974	-26
	18	1	83.6	11.988	-12
24	36	-1	125.8	23.961	-39
	54	-1	125.8	23.961	-39
38	72	-1	27.9	37.999	-1
	90	-1	27.8	38.013	13

并且都达到了一定的精度，因此可知，该方法也不受故障初始相角的影响。

5. 结论

1) 单端行波法测距的难点在于第二个到达测量点的行波波头的辨识问题，本文利用的支持向量机可以可靠地识别故障段，在正确识别故障段的基础上根据行波的网格图辨识行波波头，有效地解决了第二个行波波头的辨识问题；

2) 通过仿真分析，验证了本文采用的方法的有效性和测距精度，并且在各种不同的故障情况下(包括不同的故障位置、故障电阻和故障初始角)对提出方法的性能进行了测试，都得到了令人满意的结果；

3) 本文仅对典型的单端辐射状配电网结构进行了研究分析，对于复杂结构配电网中存在的测量点布置、测量信号的特征随电网结构的不同而发生变化的问题未做深入探讨，有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 束洪春, 邬乾晋, 张广斌, 等. 基于神经网络的单端行波故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 85-92.
- [2] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化[J], 2001, 25(23): 62-65.
- [3] 刘健, 董新洲. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 季涛. 中性点非有效接地系统行波故障测距技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [5] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障下第 2 个反向行波识别的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 41-45.
- [6] Burges, C.J.C. (1998) A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in The Netherlands.
- [7] Deng, X.T., Yuan, R.X. and Xiao, Z.F. (2015) Fault Location in Loop Distribution Network Using SVM Technology. *Electrical Power and Energy Systems*, **65**, 254-261.
- [8] 卢占庆. 基于支持向量和小波变换的配电网单相接地故障分析及系统设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [9] 郑蕊蕊, 赵继印, 赵婷婷, 等. 基于遗传支持向量机和灰色人工免疫算法的电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 56-63.
- [10] Parikh, U.B., Das, B. and Maheshwari, R.P. (2008) Combined wavelet-SVM Technique for Fault Zone Detection in a Series Compensated Transmission Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 1789-1794.
- [11] Livani, H. and Evrenosoglu, C.Y. (2012) A Hybrid Fault Location Method for Overhead Lines Combined with Underground Cables Using DWT and SVM. 2012 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, 22-26 July 2012, 1-6. <http://dx.doi.org/10.1109/pesgm.2012.6345578>
- [12] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
- [13] 和敬涵, 张飏, 范瑜, 等. 解耦变换在电力系统暂态保护中的应用研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(5): 101-104.
- [14] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 赵兴兵. 配电网电缆-线混合线路故障选线的可拓融合方法[J]. 电工技术学报, 2008, (11): 146-152.
- [15] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 699-706.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>