

DOI: 10.7667/PSPC152143

基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究

陈奎, 陈博博

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 提出了一种综合电弧模型。并针对电弧接地情况复杂的特点, 提出了一种暂态零序电流和两相电流差特征和支持向量机(SVM)相结合的配电网单相电弧故障时的选线方法。研究暂态零序电流和故障相与非故障相两相电流差的关系, 将其用小波分析方法变换到特征频带(625~1 250 Hz)内进行相关分析。将得到的各馈线的相关系数作为特征输入量, 结合支持向量机(SVM)分类算法, 建立了针对配电网单相接地电弧故障的选线流程。在 EMTP 中仿真, 并经 Matlab 中进行数据处理后。结果表明, 该方法对于不同中性点接地方式、不同距离、不同故障时刻发生的电弧故障, 均能正确地选出故障线路。

关键词: 小电流接地系统; 电弧模型; 小波分析; 特征频带; 支持向量机; 故障选线

Research on arc fault line selection based on improved transient correlation analysis and support vector machine

CHEN Kui, CHEN Bobo

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A comprehensive arc model is presented. On account of the complex characteristics of arc grounding, a new method of the fault line selection based on the characteristics of transient zero sequence current and the difference of two-phase current with support vector machine (SVM) is proposed. Besides, the relation between transient zero sequence current and the D-value of fault phase and non-fault phase is studied. Then the wavelet analysis is used to transform the signal into the feature band (625~1250Hz) within the correlation analysis. The correlation coefficients of each feeder can be used as the inputs of SVM classification algorithm, and the line selection process of single phase arc-grounding fault is established. Simulation are performed in the EMTP, the data is processed by Matlab. The results show that this method can correctly select the fault line for different neutral point grounding mode, different distance and different fault time.

Key words: indirectly grounding power system; arc model; wavelet analysis; feature band; SVM; fault line selection

0 引言

在配电网发生的故障中, 大多是单相接地故障^[1], 此时, 系统可以带故障运行 1 至 2 h^[2], 以保证供电的可靠性。但随之而来的问题就是, 容易造成绝缘薄弱处的击穿而发生电弧型接地故障, 由于发生电弧型接地故障时, 情况复杂, 配电网发生单相接地故障时, 故障选线的准确率一直有待提高。

尽管目前对电弧型接地故障选线方法的研究较多, 但存在着选线方法针对不同工况下的电弧故障适用性较差的缺点。文献[3-4]均采用小波分析的方法有效提取暂态信息进行故障选线, 但并未对不同情况时发生的电弧故障进行分析选线, 且所用电弧模型都是用时控开关替代并不能准确地反映实际情

况; 文献[5]提出利用暂态电流极大值进行故障选线, 文献[6]提出利用稳态零序电压和暂态零序电流, 此两种方法对电压过零点时发生的电弧型接地故障适用性有限; 文献[7]提出了用概率神经网络对谐振电弧高阻接地情况进行选线, 虽克服了电弧高阻接地时不易准确选线的难题, 但也限制了此方法的应用范围。文献[8]提出了用暂态零序电流和两相电流差的方法进行选线, 但并未限制特征频段, 由于基波等其他噪声信号的影响可能造成误选。

本文建立了一种综合电弧模型, 使得电弧型接地更符合实际情况, 并从配电网单相接地电弧接地时的暂态故障特征出发, 用小波变换挖掘特征频带内各线路零序电流和故障相与非故障相电流差的关系, 作为故障特征, 结合用于样本分类的支持向量

机(SVM)算法, 不受不同工况的限制, 实现了不同中性点接地方式、不同故障距离、不同故障时刻发生的电弧型接地故障的准确选线。

1 电弧模型

目前, 动态电弧模型主要有 Cassie 模型、Mayer 模型^[9-10]; 而 Cassie 模型适用于低电弧电阻、Mayer 模型适用于高电阻电弧, 而对于电弧型接地故障, 电弧电阻的变化范围是跨越低电阻和高电阻的。

由于 Mayer 和 Cassie 电弧模型均不能完全地描述电弧的特性, 为了使电弧模型更加精确, 需将两者结合起来^[11]。

Mayer 电弧模型为

$$\frac{1}{g_m} \times \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{e \times i}{p_{loss}} - 1 \right) \quad (1)$$

式(1)中: g_m 为电弧动态电导; τ_m 和 p_{loss} 分别表示电弧时间常数和电弧燃烧过程中的耗散功率。

Cassie 电弧模型为

$$\frac{1}{g_c} \times \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (2)$$

式(2)中: g_c 为 Cassie 模型的动态电导; τ_c 和 u_c 分别表示电弧时间常数和电弧电压常数。

以上 Mayer 和 Cassie 电弧模型中的参数在电弧燃烧过程中并不是恒定不变的, 但由于其在电流过零点附近, 变化并不明显, 因此, 可以将这些参数近似为常数, 进而得到 Cassie-Mayer 电弧模型^[12]。

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (3)$$

式(3)中, g 为电弧电导, 当电弧电流较小时, Mayer 电弧模型起着主要的作用, 而在电弧完全燃烧时, 电弧电导较大, 此时, Cassie 模型起主要作用。

如图 1 为电弧模型的框架图。这个框图可用 EMTP-models 来实现, 输入为电弧电流, 经过式(3)的处理得到电弧电导, 进而得到电弧电阻, 送给时控电阻模型, 从而得到电弧模型。

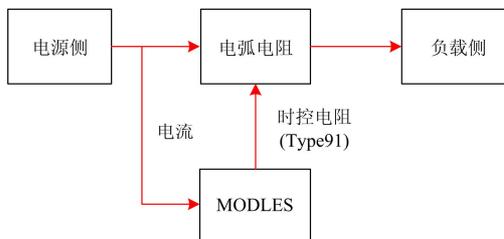


图 1 电弧模型框图

Fig. 1 Diagram of arc model

对如图 1 所示的模型在 EMTP 中搭建模型, 故障点采用如上所述的电弧模型, 假设在 0.015 s 时产生电弧, 此后电弧稳定燃烧, 得到的电弧电压、电弧电流的波形如图 2、3 所示。

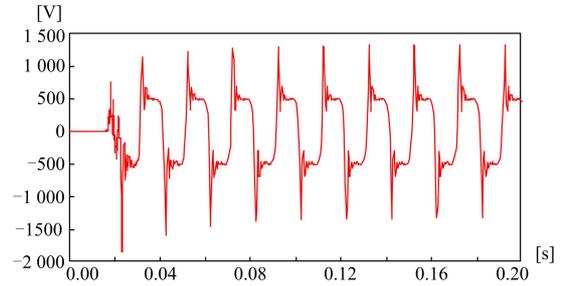


图 2 电弧电压仿真波形

Fig. 2 Simulation of arc voltage

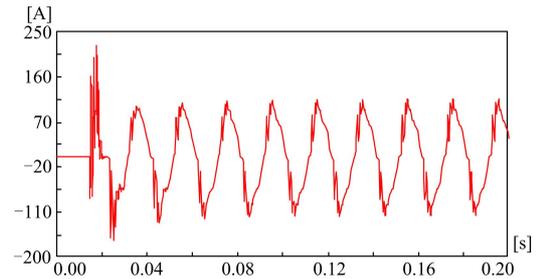


图 3 电弧电流仿真波形

Fig. 3 Simulation of arc current

2 改进暂态相关分析选线原理

当中性点不接地(经消弧线圈接地)电网发生单相接地故障时, 流经故障点的暂态电流为故障线路本身和所有非故障线路的暂态电容性电流之和(若经消弧线圈接地, 还包括其所在支路的暂态电感电流)。

设 A 相为故障相, 由文献[8]可知: 故障线路的故障相与非故障相暂态电流差 i_{fAB}, i_{fAC} 与该线路的暂态零序电流具有明显的相关性, 且接近于 1。

非故障线路的故障相与非故障相暂态电流差 i_{hAB}, i_{hAC} 该线路的暂态零序电流的相关性远离 1。

因此, 可以通过比较各条线路的暂态零序电流与对应线路的两相电流差的相关性来实现故障选线。

但是由于电弧型接地故障时, 暂态信号易受基波、现场噪声等多种信号的影响, 因此需将特征信号提取出来。用 DB15 小波将暂态信号进行 4 层分解, 采样频率为 10 kHz, 由于第四层低频分量 (0~612.5 Hz) 混有工频分量, 可能影响选线结果, 舍弃不用。提取各层高频系数 $D_j(k)$, 计算高频能量

$E_h = \|D_j(k)\|^2$ ，如图 4 和图 5 所示，为各频段所对应的小波能量，可看出，当发生单相电弧型接地故障时，线路中的暂态零序电流能量和两相电流差能量主要集中在 625~1250 Hz。如图 6 和图 7 所示，分别为小波变换后该特征频段内的故障线路与两相电流差波形和非故障线路与两相电流差波形。

对该频段内各线路的零序电流与两相电流差小波系数进行相关分析。

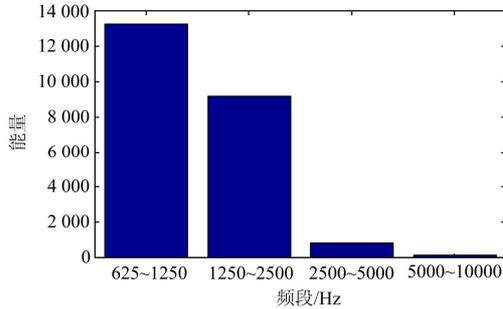


图 4 两相电流差各频段小波能量

Fig. 4 Wavelet energy of the difference of the two phase current

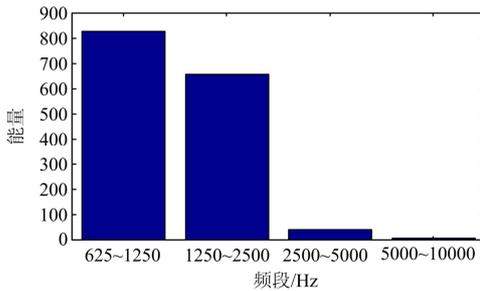


图 5 零序电流各频段小波能量

Fig. 5 Wavelet energy of zero-sequence current

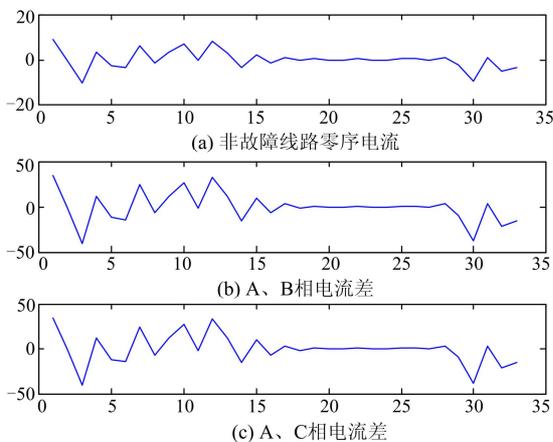


图 6 故障线路零序电流与两相电流差小波波形

Fig. 6 Zero-sequence and phase current's wavelet waveform of fault line

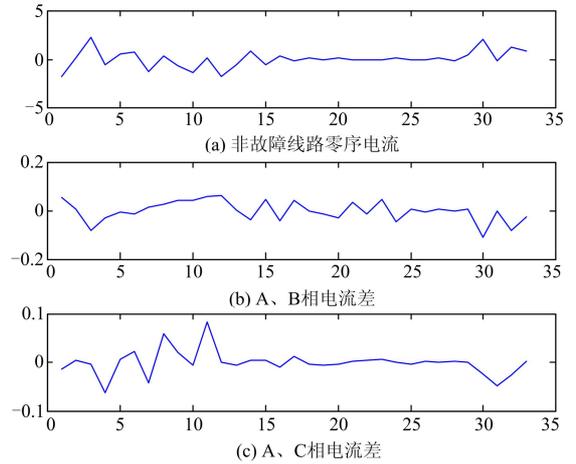


图 7 非故障线路零序电流与两相电流差小波波形

Fig. 7 Zero-sequence and phase current's wavelet waveform of non-fault line

假设故障相为 A 相， $\rho_1(k)$ 和 $\rho_2(k)$ 分别为第 k 条线路暂态 A 相电流 i_A 与 AB 两相电流差 i_{AB} 的相关系数、暂态 A 相电流 i_A 与 AC 两相电流差 i_{AC} 的相关系数。

由相关系数的定义可知：

$$\rho_1(k) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} i_A(n) i_{AB}(n) [\sum_{n=0}^{N-1} i_A^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} i_{AB}^2(n)]^{-1/2}}{\quad} \quad (4)$$

$$\rho_2(k) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} i_A(n) i_{AC}(n) [\sum_{n=0}^{N-1} i_A^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} i_{AC}^2(n)]^{-1/2}}{\quad}$$

式中， N 表示的是采样点数。

定义综合相关系数为

$$\rho(k) = (\rho_1(k) + \rho_2(k)) / 2 \quad (5)$$

由上分析可知，故障馈线综合相关系数接近于 1，而非故障馈线综合相关系数远离 1。但是由于受到故障时刻的影响，故障馈线与非故障馈线在电压过零点附近，暂态特征减小，区别度并不是特别明显。而且，加上噪声、母线故障等不同工况的影响，确定故障与非故障馈线综合相关系数的阈值是非常困难的。因此，这里借助支持向量机来实现故障馈线的判别。

3 SVM 原理

SVM 是基于统计学习理论和结构风险最小化的新型机器学习方法，适用于电力系统故障诊断领域^[13]。

设非线性可分样本集为 (x_i, y_i) ， $i = 1, \dots, m$ ， $x \in R^n$ ，类别符号 $y \in \{1, -1\}$ ，松弛变量 ξ_i 。最优超平面的确定，即求解约束条件下的优化问题：

$$\begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \right\} \\ \text{s.t. } y_i (\omega \cdot \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (6)$$

引入拉格朗日乘子 α_i , 优化问题可以转化为

$$\begin{cases} \max J(\alpha) = \max \left\{ \sum_{i=1}^m \alpha_i - \sum_{j=1}^m \alpha_j y_j y_i (\phi(x_i) \cdot \phi(x_j)) \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \\ 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (7)$$

引入满足 Mercer 条件的核函数:

$$K(x_i, x) = \langle \phi(x_i), \phi(x) \rangle \quad (8)$$

通过求解可知分类决策函数为

$$y(x) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \right] \quad (9)$$

在处理非线性样本时径向基核函数处理效果好, 并且参数设置少, 因此本文选用径向基核函数构造 SVM 分类模型。

$$K(x, x_i) = \exp \left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (10)$$

式中, σ 是一个控制半径的正数, 反映数据集的特性。

4 选线步骤

- (1) 根据母线电压确定故障相;
- (2) 提取故障后 1/2 周期的各线路零序电流信号和两相电流差信号, 并进行小波变换;
- (3) 计算特征频带内的信号的相关系数, 并求取综合相关系数;
- (4) 将综合相关系数作为特征向量对 SVM 分类器进行训练, 得到决策函数, 并以此函数进行故障线路与非故障线路的分类。

如图 8 所示为故障选线算法流程图。

5 仿真验证和结果分析

配电网单相电弧接地故障如图 8 所示, 该系统由一个 110kV/10kV 的变压器和 5 条馈出线组成, 变压器接线为 Y/Y₀。线路的正序参数为: $R_1=0.17 \Omega/\text{km}$, $L_1=1.2546 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1=9.211 \text{ nF}/\text{km}$; 零序参数为: $R_0=0.3949 \Omega/\text{km}$, $L_0=4.6533 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=4.7561 \text{ nF}/\text{km}$, 线路 1 至线路 6 的长度分别为: 20, 10, 13, 14, 15 km, 变压器低压侧中性点可以分为不接地和经消弧线圈接地。

对图 9 所示的 10 kV 配电网进行不同情况下的单相电弧接地故障仿真, 以此得到暂态零序电流和

两相电流差的小波相关系数, 并构成支持向量机所需的训练样本和测试样本。本文所涉及的配电网具有四条馈出线, 因此, 包括母线, 共有 5 种故障类别。在馈出线和母线处分别进行不同故障时刻、不同故障距离、不同中性点接地方式的仿真, 随机选取 35 组仿真数据, 进行样本训练。仿真训练样本如表 1 所示。

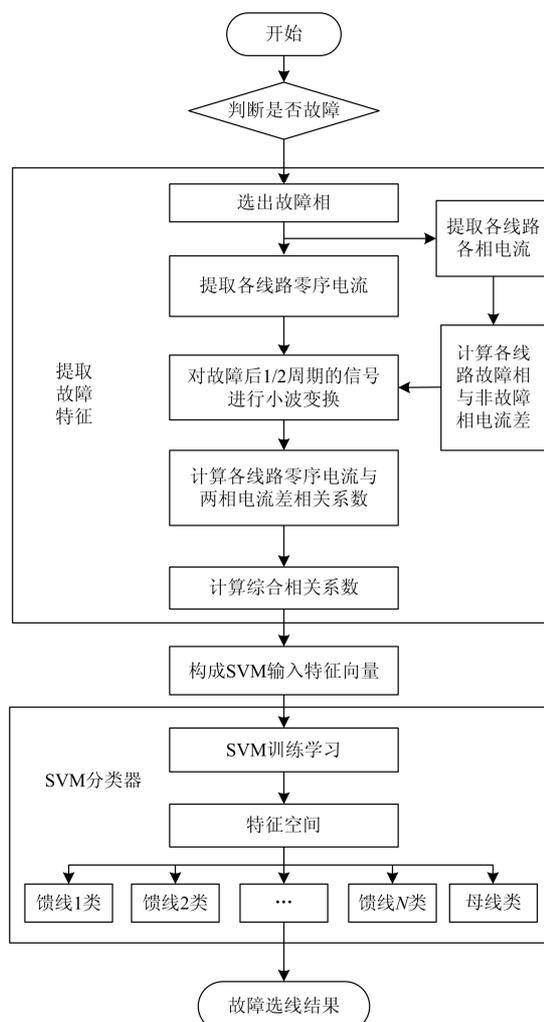


图 8 故障选线算法流程图

Fig. 8 Fault line selection algorithm flow chart

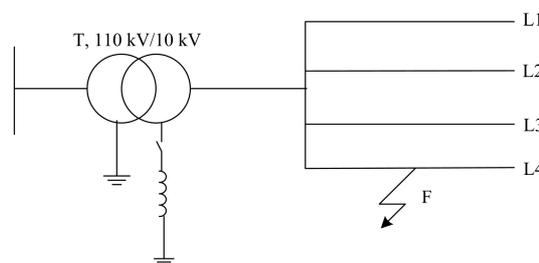


图 9 配电网仿真模型

Fig. 9 Distribution network simulation model

表 1 训练样本
Table 1 Train samples

| 故障馈线 | 故障角/(°) | 故障位置/km | 补偿度 | 各馈线相关系数 | | | |
|------|---------|---------|-----|----------|----------|----------|----------|
| | | | | ℓ_1 | ℓ_2 | ℓ_3 | ℓ_4 |
| 1 | 0 | 4 | 8% | 0.999 8 | -0.363 7 | -0.267 3 | -0.266 9 |
| | 15 | 4 | 0 | 1 | -0.015 3 | 0.012 | 0.0159 |
| | 30 | 4 | -8% | 1 | -0.071 3 | 0.008 4 | 0.038 4 |
| | 45 | 4 | 0 | 1 | -0.300 2 | -0.377 8 | -0.360 6 |
| | 60 | 7 | 8% | 1 | -0.531 3 | -0.480 3 | -0.428 2 |
| | 75 | 7 | 0 | 1 | -0.571 | -0.696 9 | -0.681 1 |
| | 90 | 7 | -8% | 1 | 0.052 2 | -0.909 | -0.922 1 |
| 2 | 0 | 7 | 8% | -0.057 7 | 0.850 9 | -0.046 2 | -0.024 1 |
| | 15 | 7 | 0 | 0.059 2 | 0.816 9 | 0.085 5 | 0.097 8 |
| | 30 | 7 | -8% | -0.260 4 | 0.877 7 | -0.232 6 | -0.205 6 |
| | 45 | 3 | 0 | -0.414 5 | 0.893 | -0.302 3 | -0.258 8 |
| | 60 | 3 | 8% | -0.653 2 | 0.877 7 | -0.840 6 | -0.436 8 |
| | 75 | 3 | 0 | -0.746 6 | 0.606 | -0.645 3 | -0.602 6 |
| | 90 | 3 | -8% | -0.821 2 | 0.954 9 | -0.689 | -0.153 6 |
| 3 | 0 | 4 | 8% | -0.198 2 | -0.269 1 | 0.999 5 | -0.188 |
| | 15 | 4 | 0 | -0.2957 | -0.246 8 | 0.997 4 | -0.121 1 |
| | 30 | 4 | -8% | -0.291 | -0.188 3 | 0.999 9 | -0.243 |
| | 45 | 4 | 0 | -0.230 4 | -0.250 8 | 0.999 8 | -0.106 7 |
| | 60 | 9 | 8% | -0.667 5 | -0.488 3 | 0.999 9 | -0.587 6 |
| | 75 | 9 | 0 | -0.623 4 | -0.594 8 | 0.999 8 | -0.518 2 |
| | 90 | 9 | -8% | -0.846 8 | 0.009 9 | 0.999 9 | -0.898 7 |
| 4 | 0 | 8 | 8% | -0.420 6 | -0.383 7 | -0.419 1 | 0.999 6 |
| | 15 | 8 | 0 | 0.135 6 | 0.041 5 | 0.176 6 | 0.999 8 |
| | 30 | 8 | -8% | -0.022 5 | 0.086 3 | 0.071 | 0.999 9 |
| | 45 | 8 | 0 | -0.301 3 | -0.283 1 | -0.171 3 | 1 |
| | 60 | 6 | 8% | -0.501 3 | -0.238 3 | -0.328 | 0.999 9 |
| | 75 | 6 | 0 | -0.682 | -0.607 8 | -0.546 8 | 1 |
| | 90 | 6 | -8% | 0.099 3 | 0.054 | -0.821 3 | 0.997 6 |
| 0 | 0 | | 8% | -0.270 7 | -0.290 1 | -0.286 1 | -0.239 5 |
| | 15 | | 0 | -0.076 1 | -0.061 2 | -0.022 1 | 0.012 6 |
| | 30 | | -8% | -0.576 5 | -0.53 5 | -0.435 7 | -0.291 5 |
| | 45 | | 0 | -0.807 6 | -0.776 5 | -0.678 | -0.451 7 |
| | 60 | | 8% | -0.893 2 | -0.867 7 | -0.787 1 | -0.540 9 |
| | 75 | | 0 | -0.905 8 | -0.901 9 | -0.823 7 | -0.679 2 |
| | 90 | | -8% | -0.917 5 | -0.903 3 | -0.825 4 | -0.681 6 |

支持向量机(SVM)决策函数的建立需要确定两个重要的参数,即惩罚系数 C 和径向基核函数参数 σ , 这两个参数影响着样本的分类准确率, 因此需要对其进行优化选择。这里使用遗传算法(GA)来对 C 和 σ 进行寻优^[14]。

任意选取不同故障角度、不同故障位置、不同补偿度的 15 组数据作为测试样本, 经过训练后的支持向量机分类器分类后, 得到的分类结果如表

2 所示。

在实际的配电网中往往存在着间歇性电弧故障接地的情况。这里, 根据工频熄弧理论, 仿真间歇性电弧故障^[15]。得到的故障馈线和非故障馈线的零序电流如图 10 所示。

在仿真不同故障条件后, 选取不同的 35 组数据作为间歇性电弧故障时的测试样本, 所得到的分类结果如表 3 所示。

表 2 测试样本
Table 2 Test samples

| 故障馈线 | 故障角/(°) | 故障位置/km | 补偿度 | 各馈线相关系数 | | | | 分类结果 |
|------|---------|---------|-----|----------|----------|----------|----------|------|
| | | | | ℓ_1 | ℓ_2 | ℓ_3 | ℓ_4 | |
| 1 | 15 | 5 | 0 | 0.997 8 | -0.699 8 | -0.428 2 | -0.466 1 | 1 |
| | 45 | 5 | 0 | 1 | -0.309 3 | -0.239 3 | -0.191 7 | 1 |
| | 75 | 6 | 8% | 1 | -0.6767 | -0.646 9 | -0.640 9 | 1 |
| | 90 | 6 | 8% | 1 | 0.035 3 | -0.839 4 | -0.849 1 | 1 |
| 2 | 0 | 2 | -8% | -0.03 | 0.854 7 | -0.021 9 | -0.029 4 | 2 |
| | 30 | 2 | -8% | -0.481 9 | 0.880 1 | -0.437 8 | -0.344 | 2 |
| | 60 | 8 | 0 | -0.756 2 | 0.877 9 | -0.718 4 | -0.494 4 | 2 |
| | 90 | 8 | 0 | -0.745 6 | 0.909 | -0.645 3 | -0.602 6 | 2 |
| 3 | 15 | 5 | 0 | -0.084 9 | -0.050 9 | 0.999 9 | 0.071 2 | 3 |
| | 45 | 5 | 0 | -0.502 3 | -0.348 5 | 0.999 9 | -0.426 3 | 3 |
| | 75 | 8 | 8% | -0.767 2 | -0.586 8 | 0.999 9 | -0.699 9 | 3 |
| | 90 | 8 | 8% | -0.623 4 | -0.594 8 | 1 | -0.518 2 | 3 |
| 4 | 15 | 4 | -8% | -0.539 2 | -0.049 4 | -0.474 9 | 0.988 6 | 4 |
| | 45 | 4 | -8% | -0.265 2 | -0.065 9 | -0.115 9 | 0.999 9 | 4 |
| | 75 | 10 | 0 | -0.644 3 | -0.312 7 | -0.717 4 | 0.999 8 | 4 |
| | 90 | 10 | 0 | -0.844 9 | -0.816 7 | -0.891 9 | 1 | 4 |
| 0 | 0 | | -8% | -0.076 6 | -0.060 3 | -0.020 3 | 0.003 6 | 0 |
| | 45 | | 0 | -0.810 3 | -0.779 6 | -0.681 9 | -0.457 2 | 0 |
| | 90 | | 8% | -0.927 5 | -0.903 3 | -0.825 4 | -0.581 6 | 0 |

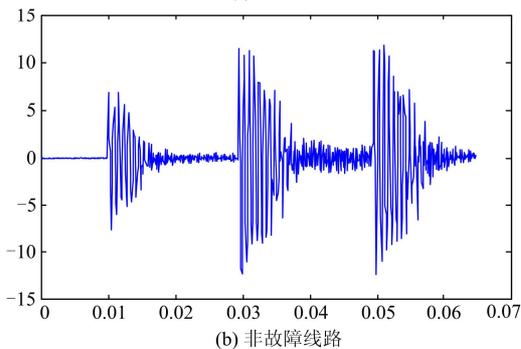
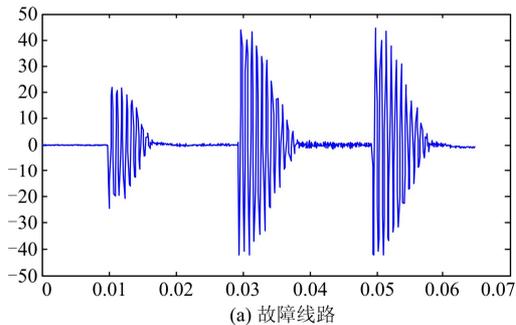


图 10 间歇性电弧接地零序电流波形

Fig. 10 Zero sequence current waveforms of intermittent arc grounding system

表 3 间歇性电弧接地分类结果

Table 3 Classification results of intermittent arc grounding

| 故障线路 | 故障距离/km | 故障角度/(°) | 补偿度 | 选线结果 |
|------|---------|------------|-----|------|
| 馈线 1 | 3 | 0/30/60/90 | 0 | 1 |
| | 8 | 15/45/75 | 8% | 1 |
| 馈线 2 | 4 | 0/30/60/90 | 0 | 2 |
| | 6 | 15/45/75 | 8% | 2 |
| 馈线 3 | 10 | 0/30/60/90 | 0 | 3 |
| | 3 | 15/45/75 | 8% | 3 |
| 馈线 4 | 5 | 0/30/60/90 | 0 | 4 |
| | 9 | 15/45/75 | 8% | 4 |
| 母线 | | 0/30/60/90 | 0 | 0 |
| | | 15/45/75 | 8% | 0 |

对母线零序电压和各线路零序电流施加信噪比为 30 dB 的高斯噪声, 各线路在不同故障条件下的选线结果如表 4 所示, 不难发现, 馈线 1 在故障角为 0 度发生故障时, 暂态零序电流与两相电流差的综合相关系数为 0.500 9; 而馈线 4 此时的相关系数为 0.015 4, 若按照文献[7]所给出的选线方法, 此时的 $\Delta\rho = 0.495 5 < 0.5$, 将很容易出现误判。而本文避免了阈值的确定, 用基于小样本的支持向量机分类算法, 对数据进行分类, 提高了选线的准确性。

表 4 分类结果
Table 4 Classification results

| 故障线路 | 故障角/(°) | 故障距离/km | 各馈线相关系数 | | | | 选线结果 |
|------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|------|
| | | | ℓ_1 | ℓ_2 | ℓ_3 | ℓ_4 | |
| 馈线 1 | 0 | 8 | 0.500 9 | 0.085 5 | -0.216 2 | -0.095 1 | 1 |
| 馈线 2 | 30 | 5 | -0.046 2 | 0.816 9 | -0.256 | -0.065 2 | 2 |
| 馈线 3 | 60 | 3 | -0.024 1 | 0.097 8 | 0.779 6 | -0.161 2 | 3 |
| 馈线 4 | 90 | 7 | 0.015 4 | 0.059 2 | -0.204 6 | 0.874 | 4 |

6 结论

本文针对配电网单相电弧接地故障时, 电弧模型不易确立; 选线准确性易受到故障时刻, 外在因素等情况的影响, 首先建立了一种综合电弧模型, 然后用小波变换挖掘特征频带内各线路零序电流和故障相与非故障相电流差的关系, 并将得到的相关系数作为 SVM 的特征向量, 建立 SVM 分类器, 对不同条件下的电弧故障进行选线。结果表明:

(1) 电弧接地时, 暂态零序电流和故障相与非故障相两相电流差的暂态能量主要集中在 625~1 250 Hz;

(2) 特征频带内, 故障线路暂态零序电流与两相电流差的相关系数接近于 1, 非故障线路暂态零序电流与两相电流差的相关系数远离 1;

(3) 基于小样本的支持向量机算法, 避免了故障线路与非故障线路相关系数阈值的确定, 对于不同距离, 不同中性点接地方式, 发生在不同时刻的电弧故障, 均能正确地选出故障馈线, 具有良好的选线性能。

参考文献

- [1] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的 HHT 变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [2] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20, 43.
ZHANG Shuqing, MA Yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-20, 43.
- [3] 赵新红, 车伟. 基于小波变换的小电流接地系统电弧故障选线[J]. 电力科学与工程, 2003, 22(4): 22-25.
ZHAO Xinhong, CHE Wei. Arc-grounding fault selection for small current neutral grounding systems based on wavelet analysis[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, 22(4): 22-25.
- [4] 赵新红, 袁洪, 车伟, 等. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 18-20.
ZHAO Xinhong, YUAN Hong, CHE Wei, et al. Study of arc-grounding fault selection based on wavelet analysis for the small current neutral grounding system[J]. High Voltage Technology, 2005, 31(10): 18-20.
- [5] 唐轶, 陈奎, 陈庆. 一种新的电弧接地故障选线方法[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(8): 65-69, 112.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing. New wire selection method for arc grounding failure[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8): 65-69, 112.
- [6] 陈奎, 程天华, 彭伟光, 等. 馈电开关用电弧性单相接地保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 107-111.
CHEN Kui, CHENG Tianhua, PENG Weiguang, et al. Research of arc single-phase earth protection for feed switch protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 107-111.
- [7] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [8] 戴栩生, 黄纯, 叶倩, 等. 基于暂态相关性分析的小电流接地故障选线方法[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 81-86, 141.
DAI Xusheng, HUANG Chun, YE Qian, et al. Fault line selection algorithm based on correlation analysis of transient

- information of fault signal in neutral un-effectual grounded system[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 81-86, 141.
- [9] WU X X, LI Z B, TIAN Y, et al. Investigate on the simulation of black-box arc model[C] // Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on, 2011: 629-636.
- [10] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
- XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [11] MARTINEZ J A, MAHSEREDJIAN J, KHODABAKHCHIAN B. Parameter determination for modeling system transients-part VI: circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2079-2085.
- [12] 李爽, 金鑫, 毕海涛, 等. 可变间隙电弧模型下特高压气体绝缘变电站快速暂态过电压的数值计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1306-1312.
- LI Shuang, JIN Xin, BI Haitao, et al. Numerical calculation on very fast transient overvoltage of UHV gas insulated substation by variable gap arc model[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(4): 1306-1312.
- [13] 王晓卫, 魏向向, 高杰, 等. 基于 EEMD 与 SVM 的配电网故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 55-61.
- WANG Xiaowei, WEI Xiangxiang, GAO Jie, et al. A novel fault line selection method based on EEMD-Hibert and SVM for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(12): 55-61.
- [14] 刘靖洁, 陈桂明, 刘小方, 等. 基于遗传算法的 SVM 参数组合优化[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(4): 94-96, 100.
- LIU Qingjie, CHEN Guiming, LIU Xiaofang, et al. Genetic algorithm based SVM parameter composition optimization[J]. Computer Application and Software, 2012, 29(4): 94-96, 100.
- [15] 王倩, 谭王景, 叶赞, 等. 基于 ATP-EMTP 的电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 16-21.
- WANG Qian, TAN Wangjing, YE Zan, et al. Modeling and simulating of arc grounding fault based on ATP-EMTP[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 16-21.

收稿日期: 2015-11-31; 修回日期: 2016-01-25

作者简介:

陈奎(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: jdbh2001@163.com

陈博博(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网故障选线与定位。E-mail: 1553321327@qq.com

(编辑 姜新丽)