

DOI: 10.7667/PSPC161765

基于波形相似度的小电流接地故障选线

刘柱揆, 曹敏, 董涛

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 提出一种基于零序电流波形相似性的配网小电流接地系统故障选线方法, 以解决小波等暂态方法难以确定能量频段等问题。通过对小电流接地系统零序电流分析, 发现非故障线路零序电流波形相似, 而与故障线路电流波形有明显差别。提出了基于互近似熵的选线方法, 通过直接计算同一母线的两条出线之间零序电流采样值的互近似熵值, 判断两条线路零序电流波形的相识度, 从而筛选出故障线路。仿真结果表明, 该方法实现简单、选线准确率高, 且不易受高电阻接地、电网结构和故障初始条件差异等复杂因素的影响。

关键词: 小电流接地; 选线; 波形; 相似度; 熵

Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity

LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao

(Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: To solve the problem of transient method like wavelet difficult to determine the power frequency, this paper proposes a fault line selection method for neutral indirectly grounding system based on the waveform similarity of zero-sequence current. Based on the analysis of zero-sequence current for neutral indirectly grounding system, zero-sequence current waveform of non-fault lines are similar and very different from the fault line. This paper introduces mutual approximate entropy for fault line selection, by computing the mutual approximate entropy value of zero-sequence current sampling value between two outgoing lines with the same bus. Then the fault line is selected by judging the zero-sequence current waveform similarity of two lines. Simulation result shows the method shares the merit of being easy to implement, almost not effected by the high grounding resistance or power grid structure and fault initial condition, and accurate fault line selection.

Key words: neutral indirectly grounding system; fault line selection; waveform; similarity; entropy

0 引言

我国电网 6~35 kV 系统普遍采用小电流接地系统, 运行规程允许小电流接地系统带接地点运行 2 h, 有利于提高配电网的供电可靠性, 但也存在接地过电压引起事故扩大化等问题。因此, 及时准确的小电流故障检测、故障选线和故障定位, 对于保障配电网长期可靠运行具有重要意义^[1]。

由于小电流接地故障产生的故障电流可能比较小, 故障量不突出, 特别是经消弧线圈补偿后, 故障线路的零序电流甚至比非故障线路还要小^[2]; 另外, 小电流接地系统中, 约 15% 的故障还存在间歇性拉弧现象, 故障电流很不稳定^[3]。这导致小电流接地故障的检测与故障选线等问题一直没有得到根本性的解决, 制约了配电网安全运行水平与供电可

靠性的提高。

我国早期生产的小电流故障选线装置基本都是利用稳态信号, 包括零序电流幅值比较法、零序基波电流相位比较法、零序无功功率方向法、零序电流有功功率法、五次谐波法等经典方法, 但基于稳态信号的故障选线容易受到运行方式、过渡电阻大小、出线长度、互感器不平衡电流等影响, 而且稳态信号的选线方法往往只适用于某一特定类型的接地系统。由于上述的缺点, 基于稳态信号的故障选线, 从原理上就存在灵敏度与可靠性无法很好得到保证等问题^[4]。

随着电力信号采集水平的发展和电力信号处理能力的提高, 基于暂态量或是同时结合暂态量和稳态量的小电流故障选线技术成为可能, 由于暂态方法不需要安装专用的高压设备或改动一次高压系

统，具有投资小、安全性好的优点，特别适用于已经安装了消弧线圈的变电站。因此，基于零序电流暂态量的技术有望更方便、有效地解决小电流故障选线问题^[5]。

1 基于暂态原理的小电流选线分析

1.1 暂态原理

小电流系统发生接地故障时，相当于在故障点增加一个虚拟电源，如图 1 所示。故障所产生的故障分量，包含了工频变化量、故障行波产生的高频分量以及由弧光非线性电阻产生的高频分量等复杂成分。其中，零序电流的暂态分量主要由按指数类型衰减的直流分量和高频分量构成，具体表现为暂态电容电流和暂态电感电流。以自由振荡分量为主的暂态电容电流，其能量主要集中在高频分段。而暂态电感电流主要由非周期分量等构成，在小电流系统发生接地故障刚发生的初始阶段，暂态电感电流数值相对较小。此时，暂态电容电流占据主导地位，暂态零序电流主要体现为暂态电容电流^[6]。

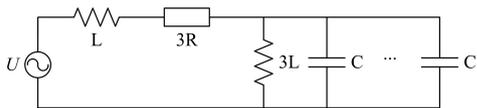


图 1 暂态等效电路

Fig. 1 Transient equivalent circuit

由于零序电流的暂态信号包含了丰富的故障特征，逐步被应用于小电流接地系统的故障选线，基于暂态量的经典故障选线方法包括首半波法、PRONY 算法和小波分析法等^[7]。

首半波法对硬件要求非常高，需要灵敏地捕捉波头，检测不容易实现，也受故障线路长短、过渡电阻、故障初始角的影响。PRONY 算法运算量非常大，在实际选线设备中不容易实现。

小波分析具有很强的时频分析能力，能够从微弱的暂态突变信号中提取所需的故障选线特征，得到了学界深入的研究，但由于小电流接地系统零序电流暂态量的能量，受电网结构、故障时刻等非常复杂因素的影响，导致其集中频段和大小并不固定。不同的电力现场情况，故障选线所涉及的暂态量分化性较大。由于暂态量的特征具有很大的差异性，因此，小波技术应用于故障选线时，存在不容易选择具有适用性的小波基和暂态量比较集中的频段等尚需解决的难题^[8]。

1.2 暂态波形分析

小电流接地系统某线路发生单点接地故障时，由于非故障线路对应相同的零序电压，而各线路的

阻抗分布具有相似性，因此，非故障线路的零序电流波形也具有相似性。

而小电流接地系统的暂态量则由高频分量和衰减的直流分量组成。由于接地系统消弧线圈的作用，故障线路零序电流所含有的衰减直流分量，主要经消弧线圈直接流向接地系统，而非故障线路则几乎不含直流分量。而接地系统的消弧线圈对故障线路零序电流的高频分量呈现为高阻抗作用，此时，零序电流高频分量主要由非故障线路流向故障线路，即故障线路的高频分量是所有非故障线路的零序电流高频分量的总和。从位于线路首端的观测点来说，故障线路与非故障线路暂态分量具有明显差别，故障线路暂态分量和非故障线路暂态分量的方向刚好相反的，如图 2 所示。

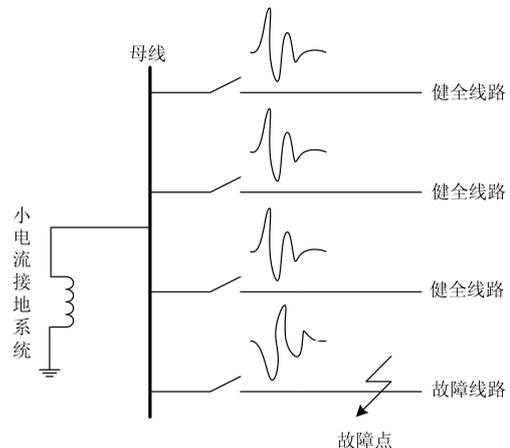


图 2 故障线和非故障线零序电流波形

Fig. 2 Zero-sequence current waveform between the fault line and non-fault lines

由此可见，小电流接地系统某线路发生单点接地故障时，由于暂态分量的作用，故障线路零序电流和其他非故障线路零序电流具有不同的波形特征，非故障线路暂态零序电流波形具有相似性，而且和故障线路暂态零序电流波形在数值和方向上都具有明显的区别。

进一步分析故障电压初始角等因素对故障线路零序电流波形和非故障线路零序电流波形的影响。当故障电压初始角较小时，由于故障线路零序电流具有较强的直流分量，更容易导致故障线路电流互感器的铁心饱和，直接引起选线装置所采集到的零序电流波形严重畸变，这反倒有助于将故障线路零序电流波形和非故障线路零序电流波形区分开来，具有更好的波形识别度。

进一步研究发现小接地电流系统单相接地瞬间在零序电流中包含有瞬时值很大的衰减的暂态自由

振荡分量, 该信号的振荡频率随着故障时网络参数的变化而变化, 变化范围集中在 300~1500 Hz, 最大值可达 3000 Hz^[9], 具有较为稳定的频段范围。同时为了避免白噪声等更高频率的电气噪声干扰, 采用带宽为 300~3000 Hz 的带通滤波器对所采集的小电流接地系统零序电流进行滤波。

因此, 小电流接地系统发生单点接地故障时, 非故障线路零序电流波形具有相似性, 而且与故障线路零序电流波形有着明显差别。利用故障线路和非故障线路零序电流波形的差异性, 采用具有良好区分度的零序电流波形比较方法, 将有助于为小电流接地系统故障选线提供更好的解决方法。而互近似熵作为一种用于比较波形曲线相似度的技术, 在小电流接地系统故障选线应用有其独特优势。

2 互近似熵及其在故障选线的应用

2.1 互近似熵

作为衡量时间系列中信息发生概率的非线性参数, 熵概念已经在热力、机械、医学等学科得到了较为广泛的应用。针对传统熵需要大量原始数据、对噪声敏感和容易不收敛等特点, Pincus 于 90 年代初从条件概率的角度, 提出了近似熵(Approximate Entropy, ApEn)和互近似熵(Cross Approximate Entropy, CApEn)的概念, 通过计算对应的熵值来描述一个时间系列的复杂程度。对于一个具有时间序列的信号, 如果运算得到的近似熵值越大, 则说明该信号越无序和复杂, 该信号的非线性物理过程复杂程度越高^[10]。

近似熵是时间系列曲线对自身复杂性和规律性的描述, 而互近似熵则扩展到两个时间系列曲线相似度的描述, 通过统计量化的方法分析两条时间系列曲线的相似程度, 互近似熵越大, 则说明两时间系列曲线不规则性越大, 即时间系列曲线的相似程度越低^[11]。

互近似熵值定义为

$$CApEn(m, r) = -\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-n} \ln P_i(B | A) \quad (1)$$

式中: N 是样本个数; r 是相似容限, 实际应用中相似容限 r 常选协方差的 0.2 倍; m 是模式维数, 实际应用中 m 通常取 2; B 和 A 分别在容限 r 意义下的相近性, 记为事件 A 和 B , 而 $P_i(B|A)$ 表示在容限 r 意义下的相似的概率。

2.2 应用原理与优点

由于非故障线路零序电流波形具有相似性, 而且与故障线路零序电流波形有着明显差别, 利用小

电流接地系统发生单点接地故障时, 故障线路与非故障线路波形的差异性, 可以识别出故障线路。

而互近似熵专长于两条曲线的相似度识别, 通过对同一母线的出线进行两条线路间的互近似熵值计算, 从而筛选出故障线路。互近似熵值运算过程中, 非故障线路由于零序电流波形的相似性, 其互近似熵值会比较小, 而且数值比较接近; 当故障线路与非故障线路进行近似熵值计算时, 由于两种零序电流波形差别较大, 相识度较低, 其对应的互近似熵值比非故障线路之间的互近似熵值明显偏大, 具有较好的区分度。

由于互近似熵是以统计学的方法研究两条曲线的差异性(或者相识度), 而并不用于描述整个波形的全貌, 因此, 互近似熵方法具有数据窗短等优点, 仅需少量的暂态电流采样数据就能估计出比较稳定的互近似熵值^[12]。

互近似熵具有良好的抗噪能力, 理论上, 数值小于相似容限 r 的噪声都能够被抑制, 尤其适用于现场电磁环境复杂的小电流接地系统, 对于暂态电流采样系统, 具有一定的噪声抑制作用^[13]。

小电流接地系统的线路可能配置不同类型的电流互感器, 导致电流互感器的暂态信号传输特性并不完全一致, 选线装置所采集到的暂态电流可能会有一定程度的畸变^[14-15]。另外, 小电流接地系统发生故障时, 如果过渡电阻较大, 将存在暂态电流较小、不容易检测等缺点。注意到电流互感器特性不同或过渡电阻较大时, 虽然会导致暂态电流会有所畸变, 但互近似熵以统计方法分析暂态电流波形的相似性, 相对于其他以暂态电流的能量大小和频段为特征暂态选线方法, 互近似熵选线方法所受的影响较小。

3 选线实现流程

小电流接地选线装置采集所有线路的零序电流采样值, 每条线路的零序电流按序组成时间系列 $\{i(t)\}$, 进而按以下步骤计算互近似熵值。

Step1: 依序选取其中两条线路的零序电流 $\{i(t)\}$ 进行矢量重构, 得到两条线路零序电流对应的矢量, 分别记为 X_k 和 X_j 。

$$X_k = [i(k), \dots, i(k+m-1)], k=1, \dots, N-m+1 \quad (2)$$

$$X_j = [i(j), \dots, i(j+m-1)], j=1, \dots, N-m+1 \quad (3)$$

Step2: 分别计算 X_k 和 X_j 所对应零序电流的差值, 最大的差值的表达式为

$$d(X_k, X_j) = \max_{0 \leq p \leq m} (i(k+p) - i(j+p)) \quad (4)$$

Step3: 根据所设定的相似容限 r 的阈值, 对每

一个 j 和 k 值, 统计步骤 2 中小于 r 的个数 $N_{m,r}$, 并计算 $N_{m,r}$ 与总的矢量个数 $(N-m+1)$ 的比值, 该值表征序列中相互近似的概率, 具体的表达式为

$$C_{m,r} = (d(X_K, X_j) < r \text{ 的个数}) / (N - m + 1) \quad (5)$$

对获得的 $C_{m,r}$ 求取对数, 进而求其平均值, 从而获得两条曲线之间的互相关程度, 具体的表达式为

$$T_{m,r}(d(X_K, X_j)) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{k=1}^{N-n+1} \ln C_{m,r}(d(X_K, X_j)) \quad (6)$$

Step4: 当嵌入维度变为 $(m+1)$ 时, 重复 Step1—Step3 的运算过程, 得到 $(m+1)$ 维数时的互相关程度数值 $T_{m+1,r}(d(X_K, X_j))$; 进而将 $T_{m,r}(d(X_K, X_j))$ 和 $T_{m+1,r}(d(X_K, X_j))$ 做差值, 得到最终的互近似熵值 $CApEn(m, r)$, 即其中参与运算的两条线路的零序电流的互近似熵值表达式为

$$CApEn(m, r) = T_{m,r}(D(U(i), U(j))) - T_{m+1,r}(D(U(i), U(j))) \quad (7)$$

Step5: 重复上述步骤过程, 不断比较两条线路的互近似熵值。因为非故障线路的波形相似, 对应的互近似熵值也非常接近。因此, 当出现两条线路的互近似熵值很大, 明显异常于其他线路的互近似熵值时, 说明参与这两条线路零序电流的差异性较大, 即可初步判断, 这两条线路中的一条是故障线路。

进而重点考察这两条线路分别与其他线路的互近似熵值情况, 重复 Step1—Step4 的运算过程, 当其中一条线路与其他线路也出现互近似熵值很大的情况时, 可判断该线路是故障线路。为了进一步确认故障线路, 可对于连接到该母线的所有出线都进行两个线路之间的互近似熵值计算, 通过比较更多线路零序电流波形的相似性, 提高选线的正确性。

4 算例

建立 10 kV 小电流接地系统, 简化的仿真图形如图 3 所示。所示其中 G 为电源, T 为变压器, 变比为 110 kV/10 kV, L 为消弧线圈, R 为消弧线圈的电阻。

考虑到实际的配电网络中出线较多, 而且具有线缆混合的情况^[16], 因此构造具有不同长度和类型多样化的 5 条线路。

其中, 线路 1(L1)为架空线路, 长度为 27 km, 线路 2(L2)为架空线路, 长度为 10 km; 线路 3(L3)为电缆线路, 长度为 20 km; 线路 4(L4)为电缆线路, 长度为 5 km; 线路 5 (L5)为 20 km 混合线路, 包括 15 km 的架空线和 5 km 的电缆。小电流接地系统正常运行时, 消弧线圈采取 10%过补偿, 一旦发生故障, 则采取全补偿方式。

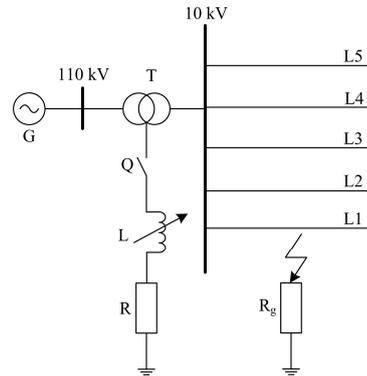


图 3 小电流接地系统仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of neutral indirectly grounding system

采用采样频率为 10 M 的模数转换器进行线路电流采样, 进而采用带宽为 300~3000 Hz 的带通滤波器对所采集的小电流接地系统零序电流进行滤波, 并进一步参与互近似熵算法运算。

为了便于表达, 以下仿真都采用线路 1 的故障情况, 考察 L1 线路在不同短路故障初始角、不同接地过渡电阻和不同短路位置下互近似熵值的情况, 以验证互近似熵方法在零序电流波形相似性应用于小电流接地系统故障选线的适用性。L1 的实验结果也适用于其他线路。

4.1 故障初始角

观察不同故障初始相位对两条线路互近似熵值的影响。在初始角分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 等典型角度时, 观察零序电流波形。通过具体采样值发现不同初始角时波形具有相似性, 选取其中初始角为 30° 时的零序电流波形图分析, 如图 4 所示。图 4 显示了故障线路 L1 与其他非故障线路在波形上具有较明显的差异性。进一步采用互近似熵方法计算两条线路之间的熵值, 如表 1 所示。

表 1 不同初始角下的互近似熵值

Table 1 Value of mutual approximate entropy under different initial angle

初始角	(L1, L2)	(L1, L3)	(L1, L4)	(L1, L5)	(L2, L3)	(L2, L4)	(L2, L5)	(L3, L4)	(L3, L5)	(L4, L5)
0°	0.7053	0.7261	0.7184	0.7148	0.2783	0.2698	0.2694	0.2687	0.2546	0.2694
30°	0.7132	0.7001	0.6934	0.7130	0.2546	0.2563	0.2456	0.2429	0.2487	0.2501
45°	0.6801	0.6798	0.6825	0.6813	0.2364	0.2432	0.2457	0.2563	0.2573	0.2499
60°	0.6651	0.6701	0.6724	0.6750	0.2301	0.2364	0.2398	0.2376	0.2391	0.2453
90°	0.6529	0.6732	0.6543	0.6610	0.2036	0.2016	0.2198	0.2243	0.2254	0.2361

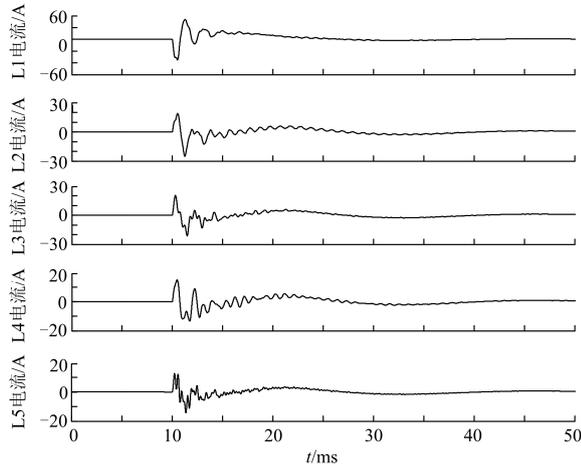


图4 L1线路故障时零序电流波形

Fig. 4 Zero-sequence current waveform on faulted line L1

从表1可以看出,故障线路L1与其他非故障线路之间的互近似熵值都比较大,归一化的互近似

熵值在0.6到0.7附近,明显高于非故障线路之间的互近似熵值(0.2到0.3附近)。同时从仿真计算数据来看,不同故障初始相对互近似熵值的影响并不明显。

4.2 短路过渡电阻

观察L1短路时刻,不同接地过渡电阻对两条线路互近似熵值的影响。选取短路过渡电阻分别为0Ω、30Ω、50Ω、100Ω和300Ω等代表阻值进行仿真,运算所获得的互近似熵值如表2所示。

表2结果与表1结果具有相似性,故障线路L1与其他非故障线路之间的互近似熵值明显比较大,显著高于非故障线路之间的互近似熵值,具有较好的区分度,可以很好地筛选出故障线路。同时,通过表2的数据表明:随着接地过渡电阻增大,相同的两条线路的互近似熵值变大,说明零序电流波形相似度降低,但不影响选择故障线路。

表2 不同接地电阻下的互近似熵值

Table 2 Value of mutual approximate entropy under different grounding resistance

接地电阻/Ω	(L1, L2)	(L1, L3)	(L1, L4)	(L1, L5)	(L2, L3)	(L2, L4)	(L2, L5)	(L3, L4)	(L3, L5)	(L4, L5)
0	0.6878	0.6883	0.6943	0.6954	0.2675	0.2689	0.2713	0.2697	0.2704	0.2796
30	0.6895	0.6921	0.6976	0.7001	0.2702	0.2732	0.2741	0.2753	0.2715	0.2801
50	0.6923	0.6964	0.6969	0.7034	0.2786	0.2764	0.2699	0.2723	0.2734	0.2698
100	0.7012	0.7045	0.7198	0.7219	0.2832	0.2796	0.2847	0.2800	0.2812	0.2823
300	0.7153	0.7293	0.7312	0.7354	0.2944	0.2953	0.2997	0.3012	0.3100	0.2987

4.3 不同短路距离

观察不同短路距离对两条线路互近似熵值的影响。选取L1短路故障点距离母线1km、5km、10km和20km处进行仿真,采用互近似熵方法计算两条线路之间的熵值,结果如表3所示。

从表3可以看出,不同的短路距离对线路互近似熵值的影响不明显。故障线路L1与其他非故障线路之间的互近似熵值都比较大,明显高于非故障线路之间的互近似熵值,表明基于互近似熵方法的小电流系统选线具有良好的适应性。

4.4 间歇性故障

进一步研究电缆发生系统间歇性故障情况,L1

间歇性故障时零序电流波形如图5所示。从图5可以看出,L1间歇性故障时,L1的波形仍然与其他非故障线路具有较。通过互近似熵运算,该互近似熵值跟表1至表3的结果类似,故障线路L1与其他非故障线路之间的互近似熵值集中在0.6到0.7附近,而非故障线路之间的互近似熵值集中在0.2到0.3附近,限于篇幅限制,不再具体罗列两条线路之间的具体熵值。

4.5 仿真运算结果总结

从上述仿真、运算结果可以看出:不同的故障初始角、故障过渡电阻和短路距离等背景下,尽管仿真运算获得的互近似熵值会有所变化,但其波动

表3 不同短路距离下的互近似熵值

Table 3 Value of mutual approximate entropy under different short-circuit distance

短路位置	(L1, L2)	(L1, L3)	(L1, L4)	(L1, L5)	(L2, L3)	(L2, L4)	(L2, L5)	(L3, L4)	(L3, L5)	(L4, L5)
1 km	0.6855	0.6910	0.7001	0.7015	0.2547	0.2523	0.2611	0.2549	0.2605	0.2573
5 km	0.6876	0.6922	0.7019	0.7094	0.2564	0.2568	0.2652	0.2610	0.2710	0.2641
10 km	0.6890	0.6707	0.7098	0.7101	0.2598	0.2730	0.2764	0.2703	0.2742	0.2739
20 km	0.6700	0.6714	0.7123	0.7110	0.2614	0.2801	0.2798	0.2784	0.2763	0.2788

的区间非常有限,故障线路L1与其他非故障线路之间的互近似熵值集中在0.6到0.7附近,而非故障线路之间的互近似熵值集中在0.2到0.3附近,说明故障线路与非故障线路的互近似熵值区分较为明显,两者有较大的裕度;同时说明现场不同工况对该算法的影响不明显,基于互近似熵的零序电流波形选线方法具有较好的稳定性和适应性。

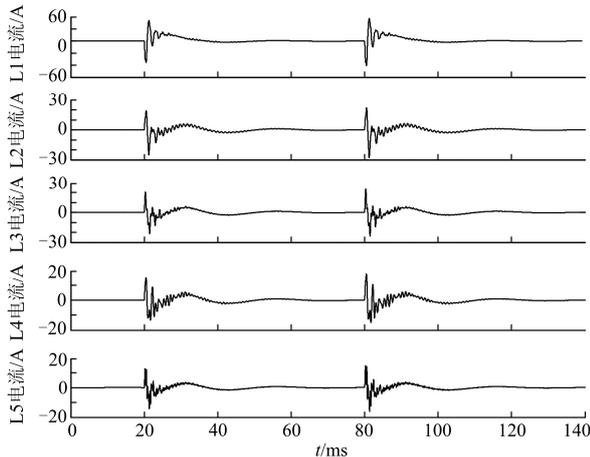


图5 L1 间歇性故障时零序电流波形

Fig. 5 Zero-sequence current waveform on line L1 intermittent failure

实例中为了全面观察互近似熵方法应用于小电流系统故障选线情况,统计了所有线路两两之间的互近似熵值。实际的现场故障选线应用中,一旦计算出互近似熵值明显偏大,便可提前锁定故障线路,减少所需的运算量。

5 结语

本文利用零序电流波形的相似性进行小电流接地系统故障选线,采用互近似熵值反映两条线路零序电流波形的相识度。通过直接计算同一母线的两条出线之间零序电流采样值的互近似熵值,判断两条线路零序电流波形的相识度,从而筛选出故障线路。由于该方法基于零序电流波形,对容错性较好,而且互近似熵方法自身有较好的抗干扰能力,基于互近似熵的零序电流波形相识度的选线方法准确率高,不易受高电阻接地、电网结构和故障初始条件差异等复杂因素的影响。

参考文献

[1] 赖平,周想凌,邱丹.小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):51-57.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line

detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
 [2] 闫光太,梁甲文,王新涛,等.利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J].电力系统保护与控制,2015,43(8):64-68.
YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
 [3] 许哗,郭谋发,陈彬,等.配电网单相接地电弧建模型仿真分析研究[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.
 [4] 金涛,褚福亮.基于暂态非工频零序电流的含DG新型配电网的接地选线方法[J].电工技术学报,2015,30(17):96-105.
JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
 [5] 王铭,王宏伟,赵义明.模极大值均方根比在配网暂态接地故障选线中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(17):50-54.
WANG Ming, WANG Hongwei, ZHAO Yiming. Application research for the root mean square ratio of modulus maxima in the distribution network transient fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 50-54.
 [6] 杨勇平,吴殿法,王宁玲.基于组合权重-优劣解距离法的火电机组性能综合评价[J].热力发电,2016,45(2):10-15.
YANG Yongping, WU Dianfa, WANG Ningling. Comprehensive evaluation for large scale coal-fired power units based on combined weight and TOPSIS method[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 10-15.
 [7] 司瑞琦,黄翰,罗建,等.基于消弧线圈补偿特征的故障选线新方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(23):16-22.
SI Ruiqi, HUANG Han, LUO Jian, et al. Fault line selection approach based on compensation characteristics of extinction coil[J]. Power System Protection and Control,

- 2014, 42(23): 16-22.
- [8] 李孟秋, 王耀南, 王辉, 等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 7-10, 24.
LI Mengqiu, WANG Yaonan, WANG Hui, et al. A new approach on detecting the single-to-ground fault location on power system with neutral unearthed[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 7-10, 24.
- [9] 林军. 小波变换在零序电流暂态高频信号分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 89-92.
LIN Jun. Application of wavelet transform to analysis of transient high frequency signal on zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 89-92.
- [10] 符玲, 何正友, 麦瑞坤, 等. 近似熵算法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 68-73.
FU Ling, HE Zhengyou, MAI Ruikun, et al. Application of approximate entropy to fault signal analysis in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 68-73.
- [11] 陈伟婷. 基于熵的表面肌电信号特征提取研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
CHEN Weiting. A study of feature extraction from SEMG signal based on entropy[J]. Shanghai: shanghai Jiaotong University, 2008.
- [12] 王攀, 王泳涛, 王宝玉. 基于特征约简理论的机组振动故障诊断模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 96-100.
WANG Pan, WANG Yongtao, WANG Baoyu. Fault diagnosis model for steam turbine vibration based on Feature reduction theory[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 96-100.
- [13] 张钧, 何正友, 陈鉴. 基于仙农模糊熵的融合故障选线方法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 216-222.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, CHEN Jian. A Shannon fuzzy entropy based approach to merge fault line selection results[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 216-222.
- [14] 刘庆时, 赵贺, 庄斌, 等. 多种通信方式的智能小区信息交互方案设计[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 4-8.
LIU Qingshi, ZHAO He, ZHUANG Bin, et al. Information interaction design for intelligent residential district with multi-communication methods[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 4-8.
- [15] 黄伟, 彭显刚, 邓小康, 等. 一种可自适应多通信模块的智能电表设计[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 43-48.
HUANG Wei, PENG Xiangang, DENG Xiaokang, et al. Design of intelligent electric meter with self-adaption multi-communication module[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 43-48.
- [16] 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.

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2017-03-19

作者简介:

刘柱揆(1974—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护、配电网、电能质量等; E-mail: zhang2016128@163.com

曹敏(1961—), 男, 学士, 教高, 主要研究方向为计量自动化、物联网、配电网等;

董涛(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘、配电网等。

(编辑 张爱琴)