

# 近似熵在配电网继发性故障检测中的应用研究

姜博, 董新洲, 施慎行

(清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为克服中性点非有效接地系统中继发性故障检测困难的问题, 提出了一种基于母线电压近似熵的中性点非有效接地配电网继发性故障检测方法。通过对母线三相电压进行近似熵计算, 判断是否在计算时间窗内发生继发性故障, 并进行继发性故障选相。所提方法仅需要电压信息, 既能够识别不同线路同名相的继发性单相接地故障, 也能够识别不同线路异名相的间歇性单相接地故障。首次故障与继发性故障之间的检测时间分辨率可达到毫秒级水平, 大量基于 ATP/EMTP 的典型故障仿真结果验证了该判据的正确性。

**关键词:** 继发性故障; 配电线路; 中性点非有效接地; 单相接地故障; 近似熵

## Application of approximate entropy to cross-country fault detection in distribution networks

JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,  
Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** To cope with the detection difficulty of cross-country fault in non-effectively grounded distribution networks, a cross-country fault detection method is proposed, which is based on the approximate entropy of bus voltages. This method calculates the approximate entropy for bus three phase voltages, and detects whether a cross-country fault occurs during the time window. The cross-country faulted phase can also be detected. The proposed method only uses voltage information, which can not only detect the cross-country fault of the same phase with the primary fault, but also can detect the different phase intermittent fault as well. The time resolution of cross-country faults identification is of millisecond level. The correctness of the criterion is proved by ATP/EMTP typical fault simulation results. The proposed algorithm enriches the single line to ground fault detection techniques.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51120175001).

**Key words:** cross-country fault; distribution line; neutral non-effective grounded; single phase to ground fault; approximate entropy

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0015-07

## 0 引言

继发性故障是指复故障不发生在同一时刻, 它们之间存在时间差<sup>[1]</sup>, 且前一故障后, 系统状态尚未调整到足够健康的情况下, 又遭受新扰动的故障场景<sup>[2]</sup>。在恶劣气象条件下, 配电网易发生不同线路上的继发性故障, 包括同名相和异名相的继发性故障, 从而对配电网造成不必要的损失。文献[3]指出, 在澳大利亚昆士兰州的 66 kV 谐振接地配电网中, 频繁出现由于不同馈线发生继发性故障而停电

的事故; 文献[4]指出, 在我国黑龙江省的 10 kV 与 6 kV 配电网中, 在恶劣雨雪天气下, 也出现了不同线路同名相的继发性单相接地故障, 对配电网正常运行造成严重影响。

当不同线路的不同相别发生永久性接地故障时, 由于故障电流幅值大, 配电网保护可有效切除故障。然而, 对于中性点非有效接地配电网而言, 当某一条线路发生单相接地故障时, 仅由线路对地杂散电容构成短路回路, 故障相电流工频有效值无明显改变, 故障检测困难<sup>[5]</sup>, 特别是当过渡电阻较大<sup>[6]</sup>, 或故障发生在相电压过零点附近<sup>[7]</sup>时, 故障特征更加微弱, 故障检测灵敏度较低。当另一条线

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001)

路很快发生继发性故障，特别是在同名相发生继发性故障<sup>[4]</sup>、或在多条线路发生间歇性故障时，由于无法形成大的故障电流，继发性故障过程淹没在首次故障的暂态过程中，检测难度更大。传统的继发性故障分析方法，是利用所有故障点的开路电压和全网阻抗进行故障点正负零序电流、电压的求解<sup>[3,8-9]</sup>。文献[10]基于负荷变化趋势对电力系统继发性故障预警进行了深入研究，该方法主要着眼于输电网中初始事故后系统状态及负荷变化所引发的继发性故障，以及进而引发的大停电事故。以上方法多针对输电网的继发性故障展开研究，主要利用工频信号，忽略了首次故障和继发性故障之间的电气量变化，难以应用于中性点非有效接地系统的单相接地故障检测。因此，中性点非有效接地配电网的继发性单相接地故障检测具有重要意义。

近似熵算法(ApEn)是一种在 20 世纪 90 年代提出的用于衡量时间序列复杂性的算法，其在医疗<sup>[11]</sup>、机械设备故障诊断<sup>[12-13]</sup>方面已有较多研究报道。此外，在电力系统故障检测方面，近似熵方法被引入故障信号频率提取<sup>[14]</sup>、输电线路故障选相<sup>[15]</sup>、小电流接地故障定位<sup>[16]</sup>、输电线路自适应重合闸<sup>[17]</sup>、突变检测<sup>[18]</sup>等领域。这些工作为近似熵理论在配电网继发性故障检测中的应用提供了思路和依据。

本文对母线三相电压进行了近似熵分析，检测继发性故障的发生，并确定其发生时刻与相别。仿真分析表明，本方法能够有效检测配电网继发性故障的发生。

## 1 继发性单相接地故障特征

### 1.1 同名相继发性永久单相接地故障

行波法是配电网单相接地故障的有效检测手段<sup>[19]</sup>，但在同名相继发性单相接地故障发生后，由于相电压幅值较低，行波法难以有效检测此类故障。发生继发性单相接地故障时的零模电流初始波头如式(1)所示<sup>[20]</sup>。

$$I_0 = \frac{U_p}{Z_0 + 2Z_1 + 6R_f} \quad (1)$$

式中： $U_p$ 为故障发生前一刻故障相电压瞬时值； $Z_0$ 和 $Z_1$ 分别为线路零模和线模的波阻抗； $R_f$ 为过渡电阻。

由式(1)知，当同名相继发性故障发生时，因 $U_p$ 值很小，所以故障初始波头幅值很小，相应产生的故障暂态过程也十分微弱。导致此故障难以使用行波或暂态方法进行检测。

在此对继发性故障发生后的工频故障电流进行分析。继发性故障发生后，故障电流主要流经两

条故障线路，由于健全线路对地阻抗相对很大，故忽略可健全线路对故障零序电流的影响。网络中有两个接地故障点，根据叠加原理，接地故障点处相当于叠加了故障附加源，继发性故障下的等效电路如图 1 所示。图中， $Z_{11_1}$ 和 $Z_{11_2}$ 分别为两条故障线路的故障相单位长度自阻抗， $x_1$ 和 $x_2$ 分别为两个故障点相距线路首端的距离， $R_{g\Sigma}$ 为两故障点过渡电阻之和， $U_1$ 和 $U_2$ 分别为两故障点处的故障附加源，近似相当于正常运行情况下的电压相量值。

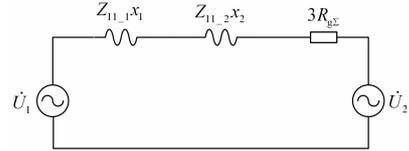


图 1 同名相继发性故障的零序网络示意图

Fig. 1 Zero sequence network of same phase cross-country fault

同名相继发性故障发生后，通过两故障点构成故障对地回路，工频稳态零序电流为

$$\dot{I}_0 \approx \frac{3\Delta\dot{U}}{Z_{11_1}x_1 + Z_{11_2}x_2 + 3R_{g\Sigma}} \quad (2)$$

其中，

$$\begin{cases} \Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_1 = \dot{U}_m \cosh(\lambda_1 x_1) - Z_{c1} \dot{I}_1 \sinh(\lambda_1 x_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_m \cosh(\lambda_2 x_2) - Z_{c2} \dot{I}_2 \sinh(\lambda_2 x_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\Delta U$ 为两故障附加源之差； $U_m$ 为母线故障相电压相量值； $I_1$ 和 $I_2$ 分别为两条故障线路正常运行时的相电流； $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为两条故障线路的传播系数； $Z_{c1}$ 和 $Z_{c2}$ 分别为两条故障线路波阻抗。

式(3)中， $\Delta U$ 数值通常只有几百伏甚至更小，故 $I_0$ 数值很小，且受到过渡电阻的严重影响，工频稳态电流难以被用于同名相继发性故障的检测。继发性故障情况下的母线故障相(A相)电压如图 2 所示，可见，继发性单相接地故障特征淹没在首次单相接地故障的暂态过程中。综上，无论通过母线相电压有效值，还是利用行波初始波头，均难以将继发性故障检测出。

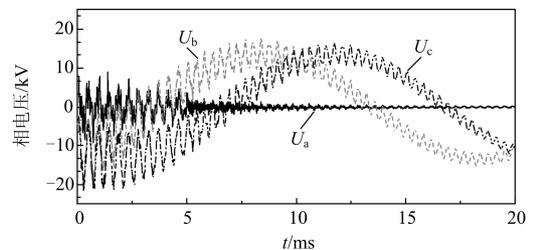


图 2 同名相继发性故障时的母线故障相电压

Fig. 2 Zero sequence voltages of same phase cross-country fault

尽管利用传统方法难以检测出同名相继发性永久单相接地故障,但从故障信号复杂度的角度出发,则有可能检测出此类故障。从行波的角度对信号复杂度进行解释,单相接地故障发生时,相当于在故障点加入一个故障行波源,所产生的行波在配电网中按照一定的复杂度进行传播。随着行波在线路上多次折反射,行波能量逐渐衰减,波头幅值减小,甚至有些初始幅值较小的波头逐渐消失,行波的复杂度逐渐降低。当继发性故障发生后,相当于在继发性故障点加入第2个故障附加源,该源产生的行波叠加在首次故障波的基础上进行传播,使得在继发性故障发生后,母线故障相电压的复杂度明显升高。根据此规律,可利用母线三相电压的复杂度实现继发性故障检测。

## 1.2 间歇性单相接地故障

在恶劣气象条件下,配电网中易出现多线路间歇性单相接地故障。此外,在低压电缆网络中,由于绝缘情况较差,也常常发生间歇性故障,影响电能质量<sup>[21]</sup>。不同线路的故障相别常为异名相,但由于属于间歇性故障,故障持续时间很短,难以构成稳定的大故障电流。不同线路异名相间歇性单相接地故障的故障零序电流和母线故障相电压如图3所示。可见,继发性单相接地故障出现的随机性大,若两次故障发生时刻较为接近,则继发性故障易发生在第一次故障的计算闭锁时间窗内,从而难以检测到继发性故障的发生。

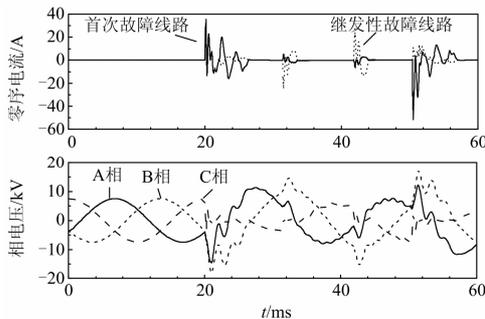


图3 多线路异名相间歇性故障母线电压

Fig. 3 Bus voltages of different phase intermittent fault

综上,继发性单相接地故障中,异名相继发性永久单相接地故障可由现有配电网继电保护进行故障切除,检测难度不大;而同名相继发性永久单相接地故障、间歇性单相接地故障则因无法产生稳定明显的故障电流,检测难度大,是本文研究的重点。

## 2 基本原理

### 2.1 近似熵及其性质

近似熵算法是一种度量时间序列的复杂性和

统计量化的规则,它由 Pincus 在 1991 年从衡量信号序列复杂性的角度提出<sup>[16,22]</sup>,是对非线性时间序列复杂度的一种非负定量描述,可以度量信号中产生新模式的概率大小<sup>[17]</sup>。

近似熵的主要特点有以下几点:

① 近似熵只需要较短的数据长度就可以估计出较为稳定的统计值。

② 近似熵算法具有较好的抗干扰和抗噪能力<sup>[14]</sup>。

③ 近似熵可以表征信号序列的不规则性和复杂性,信号越复杂(不规则),其近似熵越大。对于随机性信号和确定性信号均可适用<sup>[22]</sup>。

④ 近似熵反映的是信号序列在模式上的自相似程度大小,与信号幅值无关,只与信号复杂程度有关。

### 2.2 近似熵计算步骤<sup>[20]</sup>

设采集到的原始数据为  $\{u(i)\}$  ( $i=0,1,\dots,N$ )。预先给定模式维数  $m$  和相似容限  $r$  的值。

① 将序列按照时间顺序组成  $m$  维矢量  $X(i)$ 。即 
$$X(i) = u(i), \dots, u(i+m-1) \quad i=1 \sim N-m+1 \quad (4)$$

② 对每一个  $i$  值,计算矢量  $X(i)$  与其余矢量  $X(j)$  之间的距离。

$$d[X(i), X(j)] = \max\{u(i+k) - u(j+k)\} \quad (5)$$

③ 按照给定的阈值  $r(r>0)$ ,对每个  $i$  值统计  $d[X(i), X(j)] < r$  的数目及此数目与总的矢量个数  $N-m+1$  的比值,记作  $C_r^m(i)$ 。即

$$C_r^m(i) = \frac{\{d[X(i), X(j)] < r \text{ 的数目}\}}{N-m+1} \quad (6)$$

④ 先将  $C_r^m(i)$  取对数,再求其对所有  $i$  的平均值,记作  $\phi_r^m$ ,即

$$\phi_r^m = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_r^m(i) \quad (7)$$

⑤ 序列  $\{u(i)\}$  的近似熵为

$$E = \phi_r^m - \phi_r^{m+1} \quad (8)$$

近似熵的值与  $m$ 、 $r$  的取值有关,通常  $m=2$ ,  $r=0.1 \sim 0.2SD$  (此处  $SD$  为原始数据  $u(i)$  的标准差)时,近似熵具有较合理的统计特性<sup>[22]</sup>。

## 3 基于母线电压近似熵的继发性故障检测方法

本文提出了一种基于母线电压近似熵的继发性故障检测方法,通过对母线三相电压的近似熵分析,判断配电系统中是否出现继发性故障,并确定其发生时刻,同时利用近似熵值选出发生继发性故障的相别。具体实现步骤如下。

步骤 1: 当配电线路发生单相接地故障后, 获取故障后一个工频周波的母线三相电压  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 。采样率为 1 MHz。

步骤 2: 计算母线三相电压的近似熵  $U_{ApEnx}$ , 取维数  $m=2$ , 阈值  $r=0.1*SD$ ;  $x$  取 1~3, 分别代表 A、B、C 相。

步骤 3: 计算各相  $U_{ApEnx}$  的导数, 如式(9)。

$$DU_{ApEnx} = \frac{dU_{ApEnx}(t)}{dt} \quad (9)$$

步骤 4: 首次故障后, 求出一个工频周波内三相电压中任意一相满足式(10)的时刻  $t_{sec}$ , 确定为继发性故障时刻。

$$DU_{ApEnx} > \varepsilon \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon$  为近似熵导数的阈值。为增强算法的可靠性, 防止信号因噪声等干扰因素而使  $DU_{ApEnx}$  在零附近出现波动, 影响检测结果, 从而引起继发性故障判据误判, 故  $\varepsilon$  应取一个略大于 0 的数。经过对继发性故障的大量仿真, 确定取  $\varepsilon=100$ 。如三相电压持续满足  $DU_{ApEnx} < \varepsilon$ , 则说明未出现继发性故障。

步骤 5: 求取  $t_{sec}$  时刻后, 求取三相电压的  $U_{ApEnx}$  在  $t_{sec}$  时刻附近的局部极大值  $U_{ApEn\_mx}$ , 三相电压的  $U_{ApEn\_mx}$  值中, 满足式(11)的相别即为继发性故障相 ( $x$  代表相别)。

$$\begin{cases} U_{ApEn\_mi} > sU_{ApEn\_mj} \\ U_{ApEn\_mi} > sU_{ApEn\_mk} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $i, j, k$  为 A、B、C 三相电压中的任意一相,  $s$  为用于继发性故障选相的可靠性系数, 取  $s=1.2$ 。即当某一相电压的  $U_{ApEn\_mx}$  值大于其他两相时, 该相即为继发性故障相。

## 4 仿真实证

### 4.1 仿真模型及算例

在仿真软件 ATP/EMTP 中建立 10 kV 非有效接地配电系统 5 线路仿真模型, 仿真系统采用如图 4 所示的配电网模型。系统等效阻抗为  $2.0802 \Omega$ ; 根据线路参数及长度, 设置消弧线圈电感  $L_N=4.775 \text{ H}$ ; 其串联电阻的阻值按消弧线圈感抗值的 10% 考虑, 即  $R_L=150 \Omega$ 。

利用如下算例对所提方法进行阐述(以  $L_x$  表示线路  $x$ )。算例模拟了中性点不接地系统中, 首次故障和继发性故障分别发生在  $L_5$  的 5 km 处和  $L_4$  的 1 km 处, 首次故障初相角为  $90^\circ$ , 继发性故障发生在首次故障后 5 ms 的故障情况。2 条故障线路的零序电流如图 5 所示。可以看出, 由于继发性故障与首次故障之间的时间间隔远小于 20 ms, 且故障发

生于中性点非有效接地系统, 故障电流幅值很小, 且基本不存在工频分量, 因此, 基于工频信息的继发性故障检测方法难以识别中性点非有效接地系统中的继发性故障。

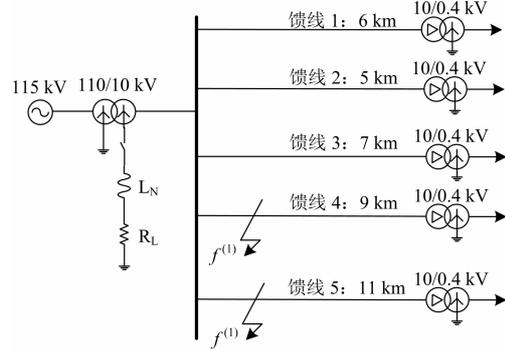


图 4 仿真模型示意图

Fig. 4 Diagram of simulation model

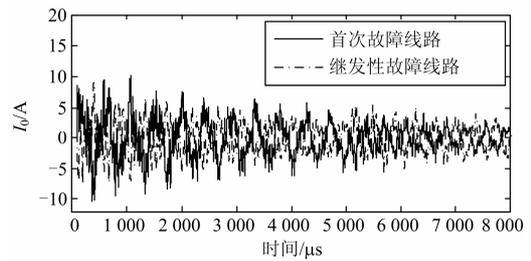


图 5 继发性故障下的故障零序电流

Fig. 5 Diagram of zero sequence currents under cross country fault

首先计算母线三相电压的近似熵值及其导数值, 如图 6 所示。近似熵的分段计算数据长度为 300 点, 即每 300 点可计算出一个近似熵值, 作为信号的复杂度指标, 逐点向后移动计算数据窗。由图 6 可知, 首次故障后, 故障相(A 相)电压的近似熵局部极大值为三相中最大, 随后三相电压近似熵逐步降低, 而在首次故障后 5 ms 时刻附近, 三相电压近

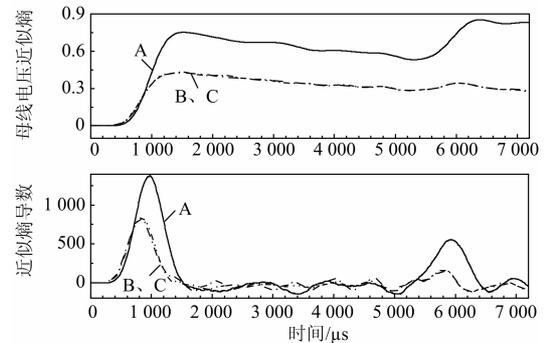


图 6 母线电压近似熵及其导数

Fig. 6 ApEn and its derivatives of bus voltages

似熵值均有所增大, A 相近似熵的局部极大值在三相中最大。近似熵导数出现 2 次大于阈值  $\varepsilon$  的局部极大值, 故可判定, 系统中先后发生了 2 次故障。由于故障后零序电流和相电流幅值较小, 未超过 10 A, 且首次故障后, A 相的近似熵值在三相中最大, 因此可判定配电网发生了 A 相继发性单相接地故障。

## 4.2 算法适用性分析

### 4.2.1 同名相继发性单相接地故障

#### 1) 首次故障与继发性故障的不同间隔时间

在首次故障与继发性故障间隔时间不同的情况下, 首次故障产生的故障暂态过程对继发性故障的影响将不同。本算例对中性点不接地系统中继发性故障发生在不同时刻时的继发性故障进行了仿真。首次故障线路为  $L_5$ , 故障距离为 5 km, 故障初相角为  $90^\circ$ ; 继发性故障线路为  $L_4$ , 故障距离为 1 km, 故障相均为 A 相。仿真结果如表 1 所示。结果表明, 本算法可以有效检测出与首次故障时间间隔不同的继发性故障。发生继发性故障后, A 相电压的近似熵值最大, 故可判定 A 相为继发性故障相, 由此实现了对继发性故障进行准确选相。

在以下算例中,  $t_{\text{real}}$  为实际继发性故障时间,  $t_{\text{cal}}$  为计算出的继发性故障时间; ApEn、 $DU_{\text{ApEnx}}$  分别为继发性故障后三相电压近似熵值及其导数值, 其一维矩阵中的 1-3 个元素分别为 A、B、C 相计算结果; “故障相”指继发性故障所在相别。下同。

表 1 不同故障时刻下的继发性故障检测结果

Table 1 Simulation results of different fault times

$t_{\text{real}}/\mu\text{s}$	$t_{\text{cal}}/\mu\text{s}$	继发性故障近似熵计算	故障相	结果
1000	1037	ApEn [0.87, 0.44, 0.43]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [206, 95, 95]		
5000	5060	ApEn [0.84, 0.40, 0.39]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [580, 152, 152]		

#### 2) 继发性故障的不同故障距离

本算例仿真了中性点不接地系统中, 继发性故障发生在不同故障距离时, 继发性故障的检测结果。首次故障线路为  $L_5$ , 故障距离为 5 km, 故障初相角为  $90^\circ$ ; 继发性故障线路为  $L_4$ , 继发性故障发生在首次故障后 5 ms, 故障相均为 A 相。仿真结果如表 2 所示。仿真结果表明, 本算法可以有效检测出不同故障距离下的继发性故障, 并准确选出 A 相为继发性故障相。

#### 3) 故障线路的不同负荷比

两条故障线路的负荷不同时, 继发性故障产生的故障电压电流差别很大, 故障信号复杂度也将有

表 2 不同继发性故障距离下的继发性故障检测结果

Table 2 Simulation results of different fault distances

FL/km	$t_{\text{cal}}/\mu\text{s}$	继发性故障近似熵计算	故障相	结果
1	4842	ApEn [0.84, 0.40, 0.39]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [580, 152, 152]		
3	4975	ApEn [0.70, 0.28, 0.27]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [313, 10, 10]		
5	4844	ApEn [0.69, 0.29, 0.29]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [272, 12, 12]		
8	5083	ApEn [0.58, 0.23, 0.23]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [223, 21, 21]		

(注: FL 为故障距离, 下同)

所不同。本算例仿真了中性点不接地系统中, 故障线路的负荷不同时发生继发性故障的检测结果。首次故障距离为 5 km, 故障初相角为  $90^\circ$ , 继发性故障发生在首次故障后 5 ms, 故障所在线路先后为  $L_4$  和  $L_3$ , 故障相均为 A 相。仿真结果如表 3 所示。结果表明, 本算法可以有效检测出不同负荷比情况下的继发性故障, 并准确选出 A 相为继发性故障相。

表 3 不同负荷比下的继发性故障检测结果

Table 3 Simulation results of different load ratios

负荷比	$t_{\text{cal}}/\mu\text{s}$	继发性故障近似熵计算	故障相	结果
1	4679	ApEn [0.64, 0.25, 0.26]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [115, -9, -9]		
0.1	4832	ApEn [0.71, 0.31, 0.30]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [265, 5, 6]		
2	4976	ApEn [0.61, 0.24, 0.24]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [133, 49, 48]		

#### 4) 消弧线圈的影响

为研究消弧线圈对本算法的影响, 本算例仿真了中性点谐振接地系统中继发性故障的检测结果。首次故障线路为  $L_5$ , 故障距离为 5 km, 故障初相角为  $90^\circ$ ; 继发性故障线路为  $L_1$ , 故障发生在首次故障后 5 ms, 故障相均为 A 相。仿真结果如表 4 所示。

表 4 消弧线圈存在时的继发性故障检测结果

Table 4 Simulation results of compensated networks

FL/km	$t_{\text{cal}}/\mu\text{s}$	继发性故障近似熵计算	故障相	结果
1	4772	ApEn [0.76, 0.24, 0.25]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [399, 82, 82]		
3	4911	ApEn [0.67, 0.25, 0.25]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [304, 96, 96]		
5	4903	ApEn [0.62, 0.22, 0.22]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [234, 15, 16]		
8	4882	ApEn [0.62, 0.19, 0.19]	A	正确
		$DU_{\text{ApEnx}}$ [125, 6, 6]		

结果表明, 本算法普遍适用于谐振接地系统, 并准确选出 A 相为继发性故障相。

#### 4.2.2 多线路间歇性单相接地故障

Mayr 电弧模型的表达式如式(12)所示<sup>[23-24]</sup>, 其中, 决定电弧能否持续燃烧的关键变量是单位长度电弧的能量损耗  $P_m$  与电弧惯性时间常数  $\tau_m$ 。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{Ei}{P_m} - 1 \right) \quad (12)$$

式中:  $g$  表示单位长度电弧电导;  $\tau_m$  表示电弧惯性时间常数;  $E$  表示单位长度电弧电势;  $i$  表示电弧电流;  $P_m$  表示单位长度电弧能量损耗。

在 ATP 仿真模型中, 搭建 Mayr 电弧模型, 通过调整  $\tau_m$  和  $P_m$  来控制电弧的熄灭与重燃特性, 模拟线路  $L_4$  和  $L_5$  发生的不同相别上的间歇性接地故障, 故障时间分别为  $50 \mu\text{s}$  和  $6050 \mu\text{s}$ , 故障距离为  $2 \text{ km}$ , 首次故障相为 A 相。结果如表 5 所示。可见无论继发性故障发生在哪一相, 继发性故障相的近似熵及其导数均为三相中最大。结果表明, 本方法在多线路间歇性单相接地故障下具有良好的检测效果, 并可准确选出继发性故障相。

表 5 多线路间歇性单相接地故障检测结果

Table 5 Results of multi-feeder intermittent fault

$t_{\text{cal}} / \mu\text{s}$	继发性故障近似熵计算		故障相	结果
6104	ApEn	[0.18 0.42 0.19]	B	正确
	$DU_{\text{ApEnx}}$	[142 418 87]		
6217	ApEn	[0.18 0.19 0.43]	C	正确
	$DU_{\text{ApEnx}}$	[20 22 447]		

## 5 结论

本文提出了一种基于母线电压近似熵的继发性故障检测方法, 分析了该方法应用在配电网继发性故障检测中的可行性与适用性, 得到了如下几点启示:

1) 基于母线电压近似熵的中性点非有效接地配电网继发性故障检测方法是一种有效的配电网继发性故障检测方法;

2) 近似熵算法具有与信号幅值无关而只与信号的复杂程度有关的优点, 这使其在配电网继发性故障检测中具有良好前景;

3) 中性点非有效接地配电网的继发性故障, 特别是不同线路同相继发性故障和异名相间歇性单相接地故障情况下, 故障电流幅值小, 而继发性故障后母线电压复杂程度有所上升, 这正好符合近似熵算法的应用优势;

4) 本文所提的继发性故障检测方法仅需要母

线三相电压, 不需馈线电流, 计算量小。仿真算例论证了近似熵能够有效反应母线电压的复杂程度, 进而检测继发性故障, 确定其发生时刻, 并进行故障选相。

目前, 近似熵计算数据长度的选取尚无可靠依据, 在下一步工作中, 将着重分析计算数据窗的合理选取方法。此外, 由于近似熵算法在微弱复杂的暂态信号识别中表现出良好性能, 因此近似熵算法在继发性故障定位方面的应用也将成为下一步研究的重要内容。

## 参考文献

- [1] 董新洲, 苏斌, 施慎行. 二次扰动信息及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 21-25.  
DONG Xinzhou, SU Bin, SHI Shenxing. Cross-country disturbance information and its applications in relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 21-25.
- [2] 薛禹胜, 谢云云, 文福拴, 等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 1-9.  
XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9.
- [3] BURGESS R, AHFOCK A. Minimizing the risk of cross-country faults in systems using arc suppression coils [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(7): 703-711.
- [4] 王景先. 两条配电线同时同名相单相接地故障的查找[J]. 黑龙江电力技术, 1991, 13(5): 281-282.  
WANG Jingxian. The fault detection of the simultaneous SLG in two distribution feeders[J]. Heilongjiang Power Technology, 1999, 13(5): 281-282.
- [5] 查丛梅, 王长江, 魏云冰, 等. 一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 100-104.  
CHA Congmei, WANG Changjiang, WEI Yunbing, et al. A new method of the resonant grounding system fault line detection based on EMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 100-104.
- [6] 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.
- [7] 张国军, 任荣, 韩静静, 等. 希尔伯特变换在配电网故障选线中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 23-28.  
ZHANG Guojun, REN Rong, HAN Jingjing, et al.

- Application of Hilbert transform in faulty line selection of distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(10): 23-28.
- [8] BI Tianshu, LI Wei, XU Zhenyu, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country grounded faults[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(4): 2185-2192.
- [9] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 毛安家, 杨浩. 基于负荷变化趋势的继发性故障预警及调整[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(21): 98-103. MAO Anjia, YANG Hao. Early warning and corrective control of secondary failure based on load tendency[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(21): 98-103.
- [11] 杨福生, 廖旺才. 近似熵: 一种适用于短数据的复杂性度量[J]. *中国医疗器械杂志*, 1997, 21(5): 283-286. YANG Fusheng, LIAO Wangcai. Approximate entropy: a complexity measure suitable for short data[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 1997, 21(5): 283-286.
- [12] 胥永刚, 李凌均. 近似熵及其在机械设备故障诊断中的应用[J]. *信息与控制*, 2002, 31(6): 547-551. XU Yonggang, LI Lingjun. Approximate entropy and its applications in mechanical fault diagnosis[J]. *Information and Control*, 2002, 31(6): 547-551.
- [13] 胡红英, 马孝江. 局域波近似熵及其在机械故障诊断中的应用[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(4): 38-40. HU Hongying, MA Xiaojiang. Application of local wave approximate entropy in mechanical fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(4): 38-40.
- [14] 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.
- [15] 祝志慧, 孙云莲. 基于 EMD 近似熵和 SVM 的电力线路故障类型识别[J]. *电力自动化设备*, 2009, 28(7): 81-84. ZHU Zhihui, SUN Yunlian. Fault classification for power transmission line using EMD-approximate entropy and SVM[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 28(7): 81-84.
- [16] 孙波, 徐丙垠, 孙同景, 等. 基于暂态零模电流近似熵的小电流接地故障定位新方法[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(20): 83-87. SUN Bo, XU Bingyin, SUN Tongjing, et al. New fault locating method based on approximate entropy of transient zero-module current in non-solidly earthed network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(20): 83-87.
- [17] 兰华, 艾涛, 张桂兰. 基于经验模态分解及近似熵的输电线路单相自适应重合闸[J]. *电网技术*, 2009, 33(20): 211-214. LAN Hua, AI Tao, ZHANG Guilan. Single-phase adaptive reclosure of transmission lines based on EMD and approximate entropy[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(20): 211-214.
- [18] 何文平, 何涛, 成海英, 等. 基于近似熵的突变检测新方法[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 813-821. HE Wenping, HE Tao, CHENG Haiying, et al. A new method to detect abrupt change based on approximate entropy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 813-821.
- [19] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4): 3-8. DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(4): 3-8.
- [20] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. *电力系统自动化*, 2006, 29(23): 29-32. SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 29(23): 29-32.
- [21] ALAMUTI M M, NOURI H, CIRIC R M, et al. Intermittent fault location in distribution feeders[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(1): 96-103.
- [22] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. *Proceeding of the National Academy Sciences USA*, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [23] 王仁甫. 电弧现象模型的发展[J]. *高压电器*, 1991, 27(4): 39-46.
- [24] CUI Tao, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Modeling study for high impedance fault detection in MV distribution system[C] // *Universities Power Engineering Conference*, 2008. UPEC 2008. 43rd International, Padova, 2008: 1-5.

收稿日期: 2014-11-02; 修回日期: 2015-01-10

作者简介:

姜博(1987-), 女, 博士研究生, IET 学生会员, 主要研究方向为配电网继电保护与故障选线; E-mail: jiang-b09@mails.tsinghua.edu.cn;

董新洲(1963-), 男, 教授, 博士生导师, IET Fellow, IEEE 高级会员, 中国电机工程学会高级会员, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

施慎行(1978-), 男, 副教授, IEEE 会员, 中国电机工程学会会员, 主要研究方向为基于行波电气量的配电线路故障检测和继电保护. E-mail: shishenxing@tsinghua.edu.cn

(编辑 张爱琴)