

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

兰华, 艾涛, 张桂兰

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Single-Phase Adaptive Reclosure of Transmission Lines Based on EMD and Approximate Entropy

LAN Hua, AI Tao, ZHANG Gui-lan

(College of Electric Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: On the basis of empirical mode decomposition (EMD) and approximate entropy, a new approach to diagnose the fault type for transmission line in single-phase grounding fault is proposed. The method has anti-interference ability, can diagnose the fault type rapidly and improve the success rate for reclosure. Simulation results show that the method is valid and practical.

KEY WORDS: empirical mode decomposition (EMD); approximate entropy; single-phase adaptive reclosure; transient faults; permanent faults

摘要: 根据经验模态分解和近似熵算法, 提出了一种针对输电线路单相接地故障的故障类型诊断方法, 该方法具有一定的抗干扰能力, 可以快速判断故障类型, 以提高重合闸成功率。线路故障仿真结果验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 经验模态分解(EMD); 近似熵; 单相自适应重合闸; 瞬时性故障; 永久性故障

0 引言

运行经验表明, 超高压输电线路故障的 70% 以上是单相接地短路, 而其中约有 80% 为瞬时性故障^[1]。瞬时故障消除后, 为了使线路重新投入运行, 我国已普遍采用自适应重合闸技术。近年来, 单相自适应重合闸的理论和方法日趋成熟, 为其实用化奠定了理论基础, 其中典型的有: 电压判据方法^[2]、智能识别方法^[3-5]、电压谐波分析法^[6]、小波及小波包分析法^[7-10]等。

本文针对输电线路单相接地故障, 利用电磁暂态程序(electro magnetic transients program, EMTP)

建立故障点电弧模型, 采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和近似熵算法识别故障类型, 以提高重合闸成功率。

1 单相接地故障特征

故障发生后, 线路故障相两端断开, 短路点电弧并不会即时熄灭。由于健全相与故障相之间存在电容与电感耦合联系, 会使故障点电弧通道中在一定时间内有潜供电流。潜供电流的持续时间不仅与其大小有关, 而且也与故障电流大小、故障切除时间、弧光长度以及故障点环境等因素有关。

单相接地故障可分为永久性故障和瞬时性故障。发生永久性故障时, 电弧会很快熄灭; 而发生瞬时性故障时, 其电弧要经过燃烧—熄灭—重燃—熄灭的反复过程, 电弧具有非线性特性。以线路中部发生瞬时性故障为例, 当线路两端的断路器跳开后, 瞬时性故障时和永久性故障时线路首端故障相的电压波形分别如图 1、2 所示。

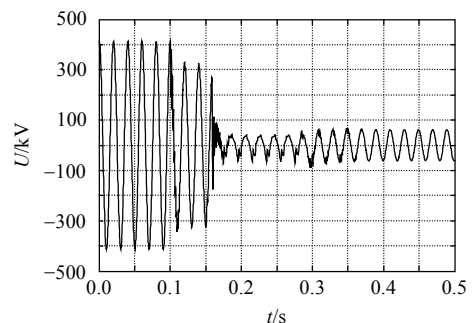


图 1 瞬时性故障时线路首端故障相电压
Fig. 1 Voltage of fault phase in the initial terminal of transmission line when transient fault occurs

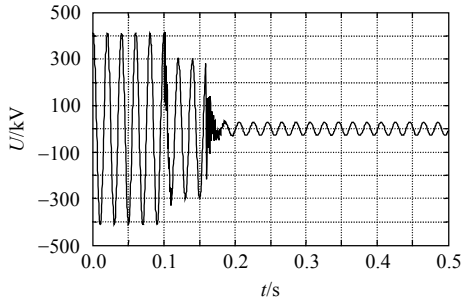


图2 永久性故障时线路首端故障相电压

Fig. 2 Voltage of fault phase in the initial terminal of transmission line when permanent fault occurs

2 EMD 分解及近似熵

2.1 EMD 分解

EMD 分解根据信号自身的时间尺度, 对非线性及非平稳信号进行一系列表征分解, 以获得信号的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量, 并使各个 IMF 分量都是窄带信号^[11]。IMF 分量要满足 2 个条件: 1) 信号数据序列的极值点数目与过零点数目相等或最多相差 1 个; 2) 信号数据序列上下包络线关于时间轴局部对称。

EMD 分解基于以下的假设: 1) 信号至少有 2 个极值(1 个极大值和 1 个极小值); 2) 信号特征时间尺度由极值间的时间间隔确定; 3) 如果信号中缺乏极值点, 但存在缺陷点, 可通过微分、分解、再积分的方法得 IMF 分量。

IMF 分量可根据信号的极大值和极小值使用 3 次样条插值来实现, 具体的实现方法^[12-13]为:

1) 确定信号 $s(t)$ 的所有极大值点和极小值点, 对这些极值点分别用 3 次样条函数拟合原数据序列的上、下包络线, 取其均值 m_1 , 将原数据序列 $s(t)$ 减去 m_1 , 得到新数据序列 h_1 。通常, h_1 不是平稳数据序列。重复以上过程 n 次, 当满足 IMF 条件时就得到第 1 个 IMF 分量 c_1 , 它表示信号数据中的最高频成分。

2) $s(t)$ 减去 c_1 , 得到去掉最高频成分的新数据序列。重复步骤 1), 得到一系列 c_i 和 1 个不可分解的序列 r , r 代表 $s(t)$ 的均值或趋势项。直到 r 比预定值小或 r 变成单调函数时, 原始数据序列 $s(t)$ 可表示 n 个固有模态分量和 1 个余量的和, 即

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r \quad (1)$$

判断所得到的信号是否已满足 IMF 条件, 可以使用如下公式^[10]

$$s_D = \sum_{k=0}^T \left| \frac{h_{k-1}(t) - h_k(t)}{h_{k-1}^2(t)} \right|^2 \quad (2)$$

式中: $h_k(t)$ 是 k 次筛选后的剩余信号; s_D 的值为 0.2~0.3。经 EMD 分解后, 得到的 IMF 分量代表了原始信号中包含的不同时间尺度的特征信号, 每个 IMF 分量可认为是单频率信号或者近似窄带信号, 分别反映由高频到低频的振动模态, 余量 r 中则包含频率最低的成分。

2.2 近似熵及其性质

2.2.1 近似熵

近似熵算法是一种衡量信号序列复杂性的分析方法, 可度量信号中产生新模式的概率大小^[14]。信号产生新模式的概率越大, 表明序列的复杂性越大, 用近似熵衡量就表现为相应的熵值越大^[15-16], 即近似熵算法用非负数定量表示信号序列的复杂性和不规则性, 其熵值随序列复杂性的增加而增大。

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, $\{u(i)\}$ 的近似熵可以通过以下步骤计算得到:

1) 将序列 $\{u(i)\}$ 按顺序组成 m 维向量 $\mathbf{X}(i)$

$$\mathbf{X}(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)] \quad (3)$$

2) 计算向量 $\mathbf{X}(i)$ 与其余向量 $\mathbf{X}(j)$ 间的距离

$$d = \max_{0 \rightarrow m-1} |u(i+k) - u(j+k)| \quad (4)$$

3) 按照给定的阈值 r , 统计 $d < r$ 的数目及此数目与总的向量个数 $(N-m+1)$ 的比值, 记为 $C_r^m(i)$ 。

4) 对 $C_r^m(i)$ 进行对数运算, 并求其对所有 i 的平均值, 记为 ϕ_r^m , 即

$$\phi_r^m = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_r^m(i) \quad (5)$$

5) 序列 $\{u(i)\}$ 的近似熵为

$$E = \phi_r^m - \phi_r^{m+1} \quad (6)$$

2.2.2 近似熵的性质

1) 近似熵可以衡量当维数变化时信号序列中新模式出现的对数条件概率均值, 理论上近似熵能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。

2) 近似熵并不试图描述或重建奇异吸引子的全貌, 而只是希望从统计的角度区别不同时间过程信号的复杂性, 因此, 只用较短的数据就可以估计出合理的近似熵。

3) 受阈值 r 的约束, 近似熵算法具有较好的抗

噪能力，特别是对偶尔产生的瞬态强干扰有较好的承受能力。

3 基于 EMD 与近似熵的输电线路单相自适应重合闸方法及仿真研究

基于 EMD 及近似熵的输电线路单相接地故障选线步骤为：1) 采样线路首故障相端电压暂态信号；2) 对采样信号序列进行 EMD 分解；3) 求取各 IMF 分量的近似熵 E ，并相加；4) 比较 E 的大小，确定故障类型。

本文利用 EMTP 对 500 kV 输电线路进行仿真研究，其线路模型如图 3 所示。

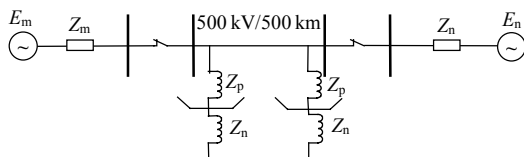


图 3 输电线路仿真模型

Fig. 3 Simulation model for transmission line

该模型采用分布参数模型，其线路参数为：

$R_1=7.58\text{ m}\Omega/\text{km}$; $R_0=154.21\text{ m}\Omega/\text{km}$; $L_1=263.5\text{ m}\Omega/\text{km}$; $L_0=830.6\text{ m}\Omega/\text{km}$; $C_1=13.970\text{ nF}/\text{km}$; $C_0=9.296\text{ nF}/\text{km}$; $Z_{m0}=0.86+j52\ \Omega$; $Z_{m1}=0.8+j10.89\ \Omega$; $Z_{n0}=5.69+j14.18\ \Omega$; $Z_{n1}=3.15+j8.15\ \Omega$ 。

设线路 A 相在 0.1 s 时发生接地故障，0.15 s 时线路两侧断路器跳开，故障相的经验模态近似熵值 E 见表 1。线路两端带 $Z_p=10.80+j2\ 700.06\ \Omega$ 、 $Z_n=3.15+j8.15\ \Omega$ 并联电抗器时，故障相端电压暂态信号的经验模态近似熵值 E 见表 2。表 1、2 中：故障位置为故障点到线路首端距离与线路总长的比值。

由表 1、2 可知：不同故障位置及不同过渡电阻情况下，瞬时性故障的故障相端电压暂态信号的经验模态近似熵值都比 1 大，而永久性故障的故障相端电压暂态信号的经验模态近似熵值均比 1 小。分析表明，由于经验模态分解本身具有去噪的能力，且近似熵对噪声不敏感，因此，用经验模态近

表 1 不带并联电抗器时线路的经验模态近似熵

Tab. 1 EMD approximate entropy values of transmission line without parallel reactor

故障位置/%	E					
	金属性短路		过渡电阻 20 Ω		过渡电阻 50 Ω	
	永久	瞬时	永久	瞬时	永久	瞬时
15	0.8878	1.7652	0.5197	1.7063	0.5306	1.6033
25	0.8352	1.5219	0.7855	1.6406	0.7355	1.5266
50	0.7451	1.3308	0.6794	1.4036	0.7717	1.2989
75	0.7556	1.4485	0.6814	1.9254	0.8160	2.3201
85	0.9171	1.8307	0.6647	1.8571	0.4092	1.8569

表 2 带并联电抗器时线路的经验模态近似熵

Tab. 2 EMD approximate entropy values of transmission line with parallel reactor

故障位置/%	E					
	金属性短路		过渡电阻 20 Ω		过渡电阻 50 Ω	
	永久	瞬时	永久	瞬时	永久	瞬时
15	0.6379	2.1154	0.4710	1.4743	0.3661	1.5330
25	0.7577	1.9493	0.7352	1.9425	0.8990	1.8753
50	0.7348	1.6690	0.6666	1.4997	0.6906	1.5017
75	0.9299	1.6274	0.8637	2.1002	0.8925	2.0747
85	0.7687	2.3383	0.6603	2.0159	0.6346	1.8905

似熵值作为瞬时性和永久性故障区分的依据是可行的。

4 结论

本文利用 EMD 分解与近似熵算法，得到单相接地故障时故障相端电压暂态信号的经验模态近似熵，通过对熵值与 1 的比较可判断故障类型，比 1 大则为瞬时性故障。为增加可靠性，可以将门限值设为 1.2，经验模态近似熵值大于 1.2 则为瞬时性故障。分析结果表明：当线路发生单相接地故障时，瞬时性故障的故障相端电压暂态信号比永久性故障时更加复杂，故障相端电压暂态信号经过经验模态近似熵的计算，能够在熵值上明显地表现出来，并且该方法对噪声的敏感度低，不受过渡电阻、短路位置和带并联电抗器等因素的影响，能可靠地识别故障类型，以实现自适应重合闸。EMTP 仿真结果验证了该方案的有效性与可靠性。

参考文献

- [1] 刘浩芳, 王增平, 徐岩, 等. 带并联电抗器的超/特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.
Liu Haofang, Wang Zengping, Xu Yan, et al. Criterion for determining fault nature in adaptive single-phase reclosing for shunt compensated EHV/UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 29-34(in Chinese).
- [2] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
Ge Yaoshong. Method of distinguishing between instant and permanent faults during automatic single-phase reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32(in Chinese).
- [3] 房鑫炎, 阙波. 神经网络在自适应重合闸瞬时与永久故障判别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 80-86.
Fang Xinyan, Que Bo. The application of ANN in the distinction of transient and permanent faults during adaptive autoreclosure[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 80-86(in Chinese).
- [4] 聂宏展, 董爽, 李天云, 等. 基于模糊神经网络的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 76-79.
Nie Hongzhan, Dong Shuang, Li Tianyun, et al. Single phase adaptive

- auto-reclosure based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 76-79(in Chinese).
- [5] 杨伟, 彭丽, 张俊芳, 等. 基于模糊神经网络的自适应单相自动重合闸[J]. 继电器, 2005, 33(15): 66-70.
Yang Wei, Peng Li, Zhang Junfang, et al. Adaptive autoreclosure of single phase based on ANN[J]. Relay, 2005, 33(15): 66-70(in Chinese).
- [6] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.
Li Bin, Li Yongli, Zeng Zhian, et al. Study on single-pole adaptive reclosure based on analysis of voltage harmonic signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57(in Chinese).
- [7] 成敬周, 张举. 基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2005, 33(7): 21-25.
Cheng Jingzhou, Zhang Ju. Study of single phase adaptive reclosure based on arc detection by complex wavelet algorithm[J]. Relay, 2005, 33(7): 21-25(in Chinese).
- [8] 蔡超豪. 基于小波包变换的自适应重合闸[J]. 继电器, 1999, 27(2): 21-23.
Cai Chao. Adaptive single-phase reclosing based on wavelet [J]. Relay, 1999, 27(2): 21-23(in Chinese).
- [9] 程玲, 徐玉琴, 宋祜霖. 基于电弧小波谱能量分析的输电线路单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 81-85.
Cheng Ling, Xu Yuqin, Song Zilin. Single-pole adaptive reclosure of transmission line based on arc models and wavelet spectrum energy analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 81-85(in Chinese).
- [10] John S A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modeling fault ares on faulted EHV transmission systems[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 148-154.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[C]. Proc. R. Soc., London 454, 1998: 903-995.
- [12] 李天云, 王飞, 祝磊, 等. 基于固有模态能量熵的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 128-132.
Li Tianyun, Wang Fei, Zhu Lei, et al. A new method of distribution network single-phase ground fault line selection based on the intrinsic mode energy entropy[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 128-132(in Chinese).
- [13] 陈忠, 郑时雄. EMD 信号分析方法边缘效应的分析[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(1): 114-118.
Chen Zhong, Zheng Shixiong. Analysis on end effects of EMD method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(1): 114-118(in Chinese).
- [14] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. Proceeding of the National Academy Sciences USA, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 曹彪, 吕小青, 曾敏, 等. 短路过渡电弧焊电流信号的近似熵分析[J]. 物理学报, 2006, 55(4): 1696-1705.
Cao Biao, Lü Xiaoqing, Zeng Min, et al. Approximate entropy analysis of current in short-circuiting arc welding[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(4): 1696-1705(in Chinese).



兰华

收稿日期: 2009-06-24。

作者简介:

兰华(1956—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电工理论、信号处理及控制领域的研究, E-mail: lanhua_1956@sina.com;

艾涛(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护及逆变器并网技术, E-mail: atjianke@163.com;

张桂兰(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压线路绝缘及保护。

(编辑 蒋毅恒)