

计及线路不平衡时线模解耦 不完全误差的行波单端测距新方法

陈锦根,徐青山,唐国庆

(东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096)

摘要:采用小波多尺度奇异性检测行波信号可实现超高压输电线路故障的精确测距。对于不换位或不完全换位线路采用传统解耦方法并不能完全消除三相之间的耦合,因此波头难以鉴别。提出采取实际不对称数值解耦的方法并引进实际模量波速。通过相模变换对三相电流进行解耦处理,对三相输电线路均匀换位和不换位或不完全换位 2 种情况,分别确定模变换矩阵,求得各模量上的电感和电容参数;应用单端法进行故障测距;用小波变换检测奇异信号,把对行波信号的分析转化为对模最大值的分析。仿真结果表明采用非对称解耦相模变换有效地消除了各相之间的电磁耦合,与采用对称假设时的故障测距结果相比精度有了较大提高。

关键词:故障测距;小波变换;相模变换;不对称线路

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0054-04

0 引言

超高压输电线路故障测距方法主要有阻抗法和行波法 2 类。传统的阻抗法由于受互感器误差、过渡阻抗、电源阻抗等因素影响,测距精度并不十分理想。行波法测量故障行波的到达时间以确定故障位置,可靠性和精度在理论上不受过渡电阻及系统运行方式影响,一直是国内外研究的热点。

由于线路绝缘和技术方面的原因,500 kV 及以上电压等级的超高压输电线路多数是水平排列且不换位^[1],这必将导致三相输电线路参数存在一定的不对称。即使对于完全换位线路,线路参数平衡只是从线路始端到末端之间的参数平衡。对于故障测距而言,从故障检测端到故障点,其线路参数极少平衡,只有在完全换位点发生故障时,其线路参数才平衡^[2]。为了计算方便,传统的故障测距算法都将实际不对称参数输电线路作了一次整循环换位处理,即进行三相参数对称的近似,这在很大程度上造成了测距结果的误差。本文计及了三相输电线路的参数不对称特性,提出了基于非对称解耦方法的超高压输电线路故障测距的精确算法。

1 相模变换^[3]

实际电力线路都是多导线系统,由于导线间存在电磁耦合,电感矩阵 $\mathbf{L}$ 和电容矩阵 $\mathbf{C}$ 不是对角线矩阵,从而每一相的电压、电流不但与该相本身有关,还与其他两相的电压、电流有关。为了消除各导线之间的相互耦合关系,需对其进行解耦处理。

对于三相输电线路,令 $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{Q}$ 分别为电压相量 $\mathbf{u}$ 和电流相量 $\mathbf{i}$ 的模变换矩阵,根据相模变换的要求, $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{Q}$ 满足如下方程:

$$\mathbf{u} = \mathbf{S} \mathbf{u}_m, \quad \mathbf{i} = \mathbf{Q} \mathbf{i}_m \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = [u_a, u_b, u_c]^T, \quad \mathbf{i} = [i_a, i_b, i_c]^T$$

$$\mathbf{u}_m = [u^{(0)}, u^{(\alpha)}, u^{(\beta)}]^T, \quad \mathbf{i}_m = [i^{(0)}, i^{(\alpha)}, i^{(\beta)}]^T$$

式中 $\mathbf{i}_m$ 为模量电流, $i^{(0)}$ 、 $i^{(\alpha)}$ 、 $i^{(\beta)}$ 分别为电流的零模分量、 α 模分量和 β 模分量。

经过相模变换后,相互耦合的三相电流变换为 3 个相互独立的电流分量。

当三相输电线路均匀换位时,线路电感矩阵 $\mathbf{L}$ 和电容矩阵 $\mathbf{C}$ 为平衡矩阵,模变换矩阵与线路参数无关。根据所采用的模变换矩阵,可求得三相线路不同模量上的电感参数 $\mathbf{L}_m$ 和电容参数 $\mathbf{C}_m$ 。

对于不换位线路或不完全换位线路,其电感矩阵 $\mathbf{L}$ 和电容矩阵 $\mathbf{C}$ 虽然是对称矩阵,但不再是平衡矩阵,从而模变换矩阵不再与线路参数无关,必须根据给定的线路参数,采用数值计算方法确定模变换矩阵^[3]。在求得实际模变换矩阵之后再求各模量上的电感参数 $\mathbf{L}_m$ 和电容参数 $\mathbf{C}_m$ 。而各模量行波传输速度可表示为

$$v_{mi} = 1 / \sqrt{L_{mi} C_{mi}} \quad i = 0, \alpha, \beta \quad (2)$$

三相输电线路均匀换位时,2 个线模分量具有相同的传播速度,都大于零模的传播速度。对于不换位或不完全换位线路,2 个线模分量传播速度不再相同,但仍然大于零模分量的传播速度。

2 单端行波测距原理

行波双端测距原理虽有较高的测距可靠性,但测距装置必须有两端数据的交换通道和两端的同

步时间,增加了装置成本。因此,实际中单端法更有价值,本文即采用单端法^[4-5]。

由于实际测距中,影响零模分量的因素较多,而线模分量受到的影响较少,因而在故障测距中使用线模分量是比较合适的。

如图 1 所示,母线 M 和 N 间长度为 L ,故障点 F 距离 M 端检测母线长度为待求量 X ,行波线模分量速度为 v_α ,故障初始行波波头到达 M 端母线的时间为 t_1 ,由故障点反射回来的行波波头到达 M 端母线的时间为 t_2 ,则故障点到 M 端的距离为

$$X=v_\alpha(t_2-t_1)/2 \tag{3}$$

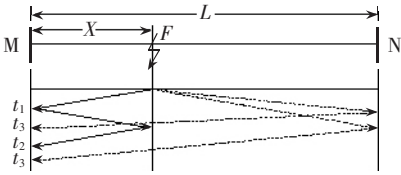


图 1 单端测距原理图

Fig.1 Single-end fault locating

故障点检测到的第 2 个波头并不一定就是故障点的反射波,在相间故障存在较大的过渡电阻及单相接地故障时,线路对端母线反射波会在故障点通过过渡电阻或健全相导线透射到本侧线路上,设其到达时间为 t_3 。初始故障行波在对端母线的反射波可能先于故障点母线的反射波到达检测母线 ($t_3 < t_2$),此时故障点到 M 端的距离为

$$X=L-v_\alpha(t_3-t_1)/2 \tag{4}$$

对于电流行波,来自故障点的反射波与初始行波极性相同,而来自对端母线的反射波与初始行波极性相反^[6]。据此即可判断第 2 个波头是故障点反射波还是对端母线的反射波,从而选用式(3)或式(4)进行计算。

对于非故障线路的透射波,文献[7]提出采用以同母线上任一“有限长”非故障线路作为参考线路,通过比较由故障线路暂态电流与该参考线路暂态电流形成的反向行波浪涌和对应的正向行波浪涌的极性,识别来自故障方向的行波浪涌,消除了来自参考线路的暂态行波浪涌的影响。

除了故障初始行波、故障点反射波、对端母线反射波、非故障线路透射波之外,当各模在故障点存在较强的电气耦合时,若其中有一模的行波到达故障点,则此行波将会通过过渡电阻耦合到其他模中,并以其他模的波速继续传输,使检测行波波头变得复杂^[8-9]。对于输电线路三相之间的电磁耦合,可以通过相模变换进行三相解耦,而对于这种在故障点处经过过渡电阻进行的耦合,相模变换并不能有效消除这种影响。

3 小波变换对奇异信号的检测^[10-11]

故障电流行波信号是一种具有突变性质的非平稳变化的信号,突变点表示行波到达检测点。小波变换是分析这种突变信号,检测突变点的有效工具。

设 $\psi(t) \in L^2(R)$ 为一满足可容许性条件的母小波,信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为

$$WT(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi(\frac{t-b}{a})} dt$$

其中 $\overline{\Psi(\frac{t-b}{a})}$ 是 $\Psi(\frac{t-b}{a})$ 的共轭。

小波变换的模最大值定义为:假设小波变换 $W_j^{(1)}f(t)$ 在 t_0 的某一邻域 ε 中,对所有的 t 均有

$$|W_j^{(1)}f(t)| < |W_j^{(1)}f(t_0)|$$

则称 t_0 为小波变换模最大值点, $W_j^{(1)}f(t)$ 为小波变换模最大值。显然,在此小波变换模最大值对应于信号 $f(t)$ 在时域上的最大变化率,也就对应于信号的突变点。

由故障点所产生的初始行波,到达母线检测点时,信号将呈现突变,对电流行波进行小波变换后,来自于故障点的初始行波、故障点的反射行波、对端母线的反射波及噪声干扰在不同尺度下的小波变换都将呈现出模最大值。模最大值的幅值表示突变信号的强度,模最大值的极性表示突变信号的极性。小波变换有效地挖掘出信号的奇异性特征,使对行波信号的分析转化为对其模最大值的分析。

4 仿真

为了验证分析的正确性,建立了图 2 所示的仿真模型。不对称参数线路的原始参数矩阵 R, L, C 采用文献[3]给出的实例。

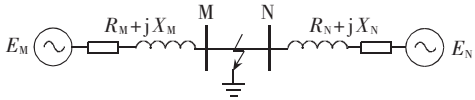
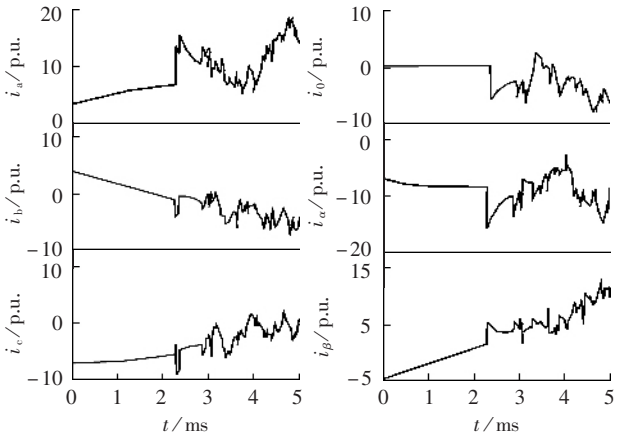


图 2 500kV 输电线路故障测距仿真原理图

Fig.2 Simulation of fault locating for 500 kV transmission line

设线路全长 200 km,仿真时间为 5 ms,故障发生时间为 2 ms。设在 MN 间距离测量母线 M 点 85 km 处发生 A 相接地短路故障,接地电阻为 10 Ω ,图 3(a)~(d)是故障前后母线 M 的电流行波波形、非对称解耦模量波形及 α 模量小波变换情况 ($W_1 \sim W_4$ 分别为对应尺度 1~4 的小波变换结果)。

图 3(d)中第 1 个模最大值对应于暂态行波到



(a) 三相电流波形

(b) 电流行波 $0\alpha\beta$ 模量

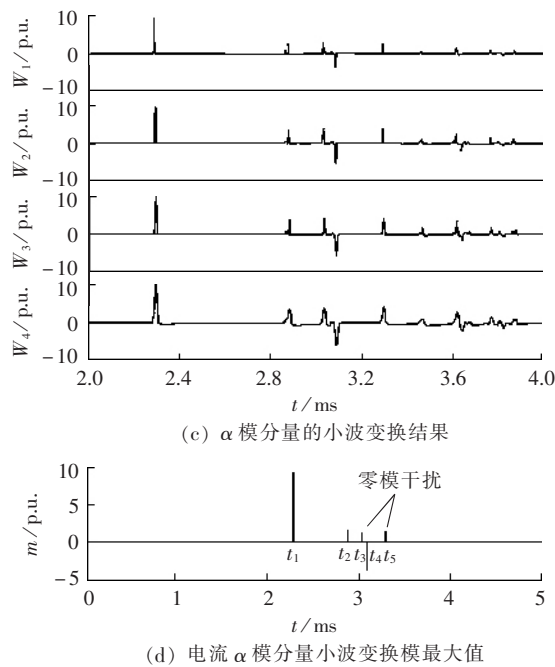


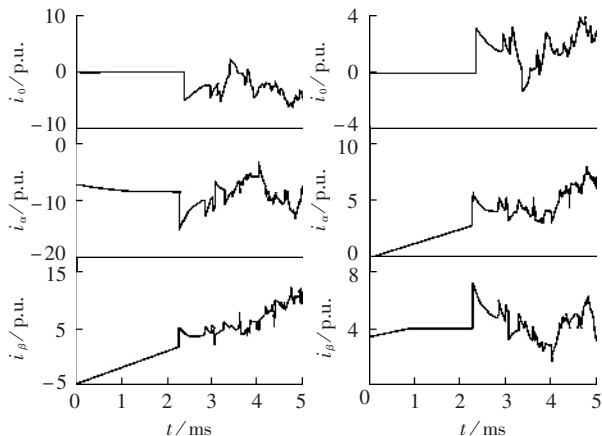
图 3 电流波形及其小波变换

Fig.3 Current waveform and its wavelet transform

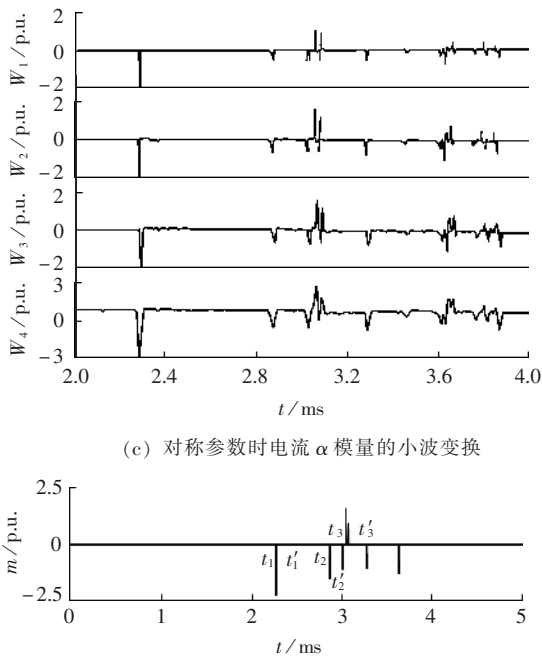
达 M 的时间, $t_1 = 2.293\text{ ms}$, 第 2 个模最大值的极性与故障初始行波模最大值极性相同, 对应于故障点的反射行波到达 M 的时间, $t_2 = 2.877\text{ ms}$, 第 4 个模极大值极性与初始行波极性相反, 是对端母线的反射波。而第 3 个模极大值对应于 M 端零模反射波到达故障点处由于故障点各模耦合而耦合到线模的波头, 第 5 个极大值对应于 N 端零模反射波到达故障点处由于故障点各模耦合而耦合到线模波头。测距所用 α 模量的波速 $v_{\alpha} = 2.9080 \times 10^5\text{ km/s}$, 利用最初 2 个模最大值时间 t_1 和 t_2 , 根据式(3)得故障点距 M 的距离为 $X = 84.9136\text{ km}$ 。

对于 MN, 设置相同的故障形式, 采用线路三相参数对称假设时, 图 4(a)~(d) 给出了故障前后的电流行波模量及其 α 模量小波变换情况。

对照图 4 中 4 个尺度的小波变换和模最大值, t_1 和 t'_1 对应的模最大值都是故障初始行波波头, t_2 和 t'_2 对应的模最大值都是故障点反射行波波头, t_3 和 t'_3 对应的模最大值都是对端母线反射波波头。由此



(a) 不对称参数时的电流模量 (b) 对称参数时的电流模量



(d) 对称参数时电流 α 模量小波变换模最大值

图 4 对称参数假设时电流行波及其小波变换结果

Fig.4 Current traveling wave and its wavelet transform with symmetrical presupposition

可见, 基于三相参数对称的假设并没有实现三相电流的完全解耦, 仍然存在耦合的三相电流行波会对行波波头的检测产生较大的影响。另一方面, 对线路 MN 采用对称参数假设时的线模分量波速为 $v_{\alpha} = 2.9285 \times 10^5\text{ km/s}$, 这并不是测距所用行波的实际波速, 因此不可避免地引入了原理误差。

表 1 总结了不同故障类型下非对称解耦方法与对称参数假设下测距结果的对比, 可以看出采用实际不对称参数时的测距误差比对称参数假设时所造成的测距误差要小得多。

表 1 不同故障类型下采用实际不对称参数与对称参数假设下的测距结果

Tab.1 Results of unsymmetrical parameters fault locating and symmetrical presupposition fault locating for various fault types km

d		X				e
		AG	BC	BCG	ABC	
35	U	34.896	35.041	35.041	35.041	0.057
	S	35.142	34.849	34.849	35.288	0.183
75	U	75.026	75.026	75.026	75.026	0.026
	S	75.555	75.555	75.555	74.677	0.423
115	U	114.941	114.941	114.941	114.941	0.059
	S	116.245	116.245	116.245	116.245	1.245
155	U	154.926	154.926	154.926	154.926	0.074
	S	155.780	155.780	155.780	155.633	0.743

注: d 为故障距离; U 代表实际“不对称”; S 代表假设的“对称”; e 为平均误差。

理论分析和仿真结果都表明, 考虑输电线路三相参数不对称的故障测距结果要比采用三相参数对称假设的故障测距更为精确。值得注意的是上述仿真中采用的输电线路参数是通过计算或实测得到的, 但线路参数受到沿线地质、气候、电晕、集肤效应、大地电阻率分布不均等因素影响, 从而

偏离计算或实测值,因此实际误差不可避免。如何选择输电线路参数,进一步提高算法的准确性,这仍是目前行波测距研究中亟需解决的问题之一。

5 总结

a. 单端行波测距利用最开始的2个行波波头判断故障距离,具有较高的测距精度,有效区分对端母线或相邻母线的反射波和故障点的反射波是单端行波测距算法的关键。

b. 对于不换位或不完全换位线路采用对称解耦方法并不能完全消除三相之间的耦合,各个模量之间仍然存在耦合,只有采取实际不对称数值解耦才能有效地消除三相之间的耦合。

c. 对实际不对称输电线路进行的仿真结果表明,考虑不对称参数的故障测距与实际结果吻合更好,精度也有显著提高。

参考文献:

- [1] 丁洪发,段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术,2004,28(19):24-28.
DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong. Unbalance issue caused by untransposed transmission lines and its solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 24-28.
- [2] 卢继平,叶一麟. 适用于任何具体结构的输电线路精确故障定位[J]. 电力系统自动化,1998,22(11):40-43,86.
LU Ji-ping, YE Yi-lin. An accurate fault location method suitable for EHV transmission line with any line construction[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 40-43, 86.
- [3] 吴维韩,张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京:科学出版社,1989.
- [4] MAGNAGO F H, ABUR A. Fault location using wavelets [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [5] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):10-14.
HUANG Zi-jun, CHEN Yun-ping. Non-communication fault

- location of transmission line based on wavelet modulus maxima [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-14.
- [6] 董新洲,刘建政,余学文. 输电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报,2001,16(3):57-61,74.
DONG Xin-zhou, LIU Jian-zheng, YU Xue-wen. Fault characteristics and wavelet analysis of the transient voltage traveling waves [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(3): 57-61, 74.
- [7] 陈平,徐丙垠,葛耀中. 一种利用暂态电流行波的输电线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化,1999,23(14):29-32.
CHEN Ping, XU Bing-yin, GE Yao-zhong. A novel method for fault location of transmission lines using fault transient current traveling waves [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 29-32.
- [8] 束洪春,王平才,司大军,等. 小波变换应用于输电线路行波故障测距(I)[J]. 云南水力发电,2002,18(2):10-15.
SHU Hong-chun, WANG Ping-cai, SI Da-jun, et al. The application of wavelet transform to traveling wave fault location on transmission lines (I) [J]. Yunnan Water Power, 2002, 18(2): 10-15.
- [9] 束洪春,司大军,葛耀中,等. 小波变换应用于输电线路行波故障测距(II)[J]. 云南水力发电,2002,18(2):16-21.
SHU Hong-chun, SI Da-jun, GE Yao-zhong, et al. The application of wavelet transform to traveling wave fault location on transmission lines (II) [J]. Yunnan Water Power, 2002, 18(2): 16-21.
- [10] MALLAT S, HWANG Wen-liang. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [11] 余畅,尹项根,曾祥君,等. 基于小波分析的多尺度下综合行波故障定位[J]. 电力自动化设备,2001,21(6):6-9.
YU Chang, YIN Xiang-gen, ZENG Xiang-jun, et al. Fault location based on comprehensive wavelet analysis at different scales [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 6-9.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

陈锦根(1982-),男,江苏如皋人,硕士研究生,研究方向为输电线路故障测距(E-mail: jingenchen@sohu.com)。

Single-end fault locating considering errors due to incomplete decoupling of unsymmetrical lines

CHEN Jin-gen, XU Qing-shan, TANG Guo-qing

(Department of Electrical Engineering, Southeast University Nanjing 210096, China)

Abstract: The singularity of traveling wave extracted by wavelet transform at different scales is used to accurately locate ultra-high voltage transmission line faults. For untransposed lines, the traditional decoupling methods cannot eliminate the coupling among three phases completely, which brings difficulty in traveling wave surge detection. An unsymmetrical numerical decoupling method is presented and the actual wave velocity is introduced. Firstly, three-phase currents are decoupled by the phase-model transformation. Considering the uniform transposition and untransposition or incomplete transposition of three-phase transmission lines, the transformation matrix is determined and then used to calculate the inductance and capacitance parameters. The single-terminal fault location method is applied, and the wavelet transform is used to detect the singularity signal, thus the traveling wave signal analysis is transformed to modulus maxima analysis. Simulation results show that the method can decouple each phase efficiently and the precision is greatly increased compared with the method using symmetrical presupposition.

Key words: fault locating; wavelet transform; phase-model transformation; unsymmetrical transmission line