

基于自相关分析的双端行波杆塔故障定位方法

为克服常规行波测距法的缺点,提出了一种基于自相关分析的输电线路双端行波杆塔定位新方法。先将两端的暂态电流信号用小波分解为不同的频带,再对高频频带进行重构。同一频带内,线路的衰减常数和行波波速可近似为定值。根据初始行波与故障点反射波的相关性,用自相关分析法分别得到两端的初始行波和故障点反射波到达母线侧的时间差,然后用一侧时间差与两侧时间差之和的比值计算故障距离与线路全长之比,最后用杆塔地面距离代替实际线路长度的方法确定故障点位置。该方法无须两端精确对时和已知行波波速,大量仿真结果表明,该方法有效可靠,可准确识别故障点位置。

李 勋 姚森敬 黄荣辉 刘顺桂 吕启深/深圳供电局有限公司

0 引言

由于架空输电线路较长,且担负着重要的电力供应任务,因此发生故障时,准确快速找到故障点位置,不仅可以减小人工巡线的难度,而且可以减少停电带来的损失^[1-4]。

通常,电力系统故障测距主要有两类方法:阻抗计算法和行波法^[5-6]。行波法与阻抗计算法相比有定位速度快、准确度高且不易受线路参数、系统运行方式、故障类型和故障阻抗等影响^[7]。行波法又可分为单端法和双端法^[8-11]。单端法需要已知行波波速,且存在故障点反射波难以识别的问题;双端法同样需要已知波速,并且需要两端精确同步^[12-15]。另外,由于受到温度、弧垂等因素的影响,线路的实际长度会发生变化,因此也有必要考虑线路长度变化对故障定位的影响^[16-17]。

为此, 国内外很多学者提出了多种

解决方法。文献[18]利用小波变换提取的行波特征点位置确定行波到达时间,且考虑到行波传播速度变化的问题,但该方法需要绘制相速频率曲线来确定波速,增加了工作量,并且没有考虑线路长度的变化对测距的影响;文献[7]采用小波变换求出模极大值,利用两侧的模极大值对应点确定行波到达母线的时刻,并且采用极性对照法识别故障点和相邻母线反射波。但该方法需要两端精确同步,且极性判别法容易失效。

本文结合目前故障定位方法的特点,提出一种基于自相关分析的杆塔定位新方法。先对两侧故障信号进行小波分解得到不同的频带,再对高频频带进行重构,然后取绝对值并对重构信号进行自相关分析,分别找到两端初始行波与故障点反射波的时间差,用一侧时间差与两侧时间差之和的比值计算故障距离与线路全长之比,最后用杆塔距离代替实际线路长度的方法确定故障点的位置。计算过程中,无须已知行波波速和线路实际长度,也不用进行两端精确对时,只需找到两个时间差,较好地克服了常规行波测距法的缺点,因此定位准确度较高。

1 行波色散及小波分解与重构

1.1 行波色散

电力系统中，短路故障产生的行波信号是一些传播模式的混合信号。每种传播模式的不同频率分量具有不同



李 勋/工程师

关键词/Keywords

- 行波 ·
- 小波分析 ·
- 自相关分析 ·
- 杆塔定位 ·
- 鲁棒性 ·

的速度和衰减,即产生色散,使得行波在传播过程中发生畸变^[19]。行波在输电线路上传播一段距离后,行波中的高频分量和低频分量均会衰减,但与后者比较,前者衰减更快,从而导致波速下降,波头变缓。显然传播距离越长,高频分量衰减就会越大,波形畸变也就越严重,使得行波波头的识别和波速的选择更加困难,给故障测距带来一定的误差。

1.2 小波分解与重构

线路发生故障时,故障点处产生的暂态信号会向线路两端传播。该信号可以等效为多个频带的信号叠加而成,不同频带的信号会发生不同程度的衰减,但各个频带内的波形不会发生较大变化^[20]。

基于此,选择合适的分解层数,将两端测得的电流信号进行小波分解,并对包含主要故障信息的最高频带进行重构,然后再对该单一频带的信号进行分析。由于在同一频带内,波速可近似为常数^[20],故可减小波速不确定性带来的测距误差。

2 自相关分析

相关分析分为互相关分析和自相关分析^[21]。互相关分析研究的是两个不同信号的相似性,自相关分析是研究一个信号经过一定延时后与其自身的相似性。为了研究某个波形自相关性的大小,引入自相关函数^[22-23]

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t+\tau)dt \quad (1)$$

实际上,某信号自相关函数的求解过程就是将该信号进行平移,再对原信号进行扫描,用函数值来衡量其相关程度,反映的即是该信号在不同平移量下与自身的相关程度。在某一平移量下($\tau > 0$),相关函数值最大,即为该信号与自身相关程度最大处,此时的 τ 值即为平移的时间差。

由于在线路两端测得的电流信号是离散的,则对于离散信号 $x(m)$,定义自相关函数为^[22]

$$R_x(k) = \sum_{m=1}^n x(m)x(m+k) \quad (2)$$

式中, n 为采样点总数; k 为采样点序号。

3 基于小波和自相关分析的故障定位原理

3.1 行波测距算法

简化后的双端供电系统如图1所示。在距离M侧母线 d 长度的F点发生单相接地故障,线路全长为 L 。在故障点F处会产生暂态行波,并向线路两侧传播,如图2所示。其到达母线M、N两侧的时间分别为 t_1 和 t_2 。初始行波到达母线后会发生反射,再经故障点反射第二次回到M、N侧母线处的时间分别为 t_3 和 t_4 。考虑到M、N侧的反射波在故障点处都会发生折射而到达对端母线,使对端信号中的折、反射波难以识别,设其到达N、M端的时间分别为 t_5 、 t_6 。

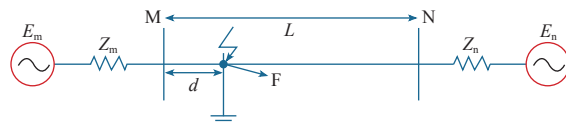


图1 输电线路故障简化图

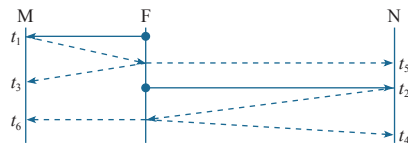


图2 故障行波折反射路径

根据1.2节,对电流信号进行小波分解与重构后可得到只有一个频带的信号,其波速可以近似为定值,设为 v 。则根据单端定位公式有

$$d = \frac{1}{2}(t_3 - t_1)v \quad (3)$$

$$L - d = \frac{1}{2}(t_4 - t_2)v \quad (4)$$

由式(3)可得

$$v = \frac{2d}{t_3 - t_1} \quad (5)$$

代入式(4),可得

$$d = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_1 + \Delta T_2} L \quad (6)$$

其中, $\Delta T_1 = t_3 - t_1$, $\Delta T_2 = t_4 - t_2$ 。

由式(6)可知,故障距离仅与两个时间差及线路长度有关,且不需要两端精确对时,亦消除了难以确定的波速,使定位准确度提高。

为了后文叙述方便, 令 $\Delta T_3 = t_5 - t_2$, 由行波传播路径可得

$$t_5 - t_2 = \frac{L}{v} - \frac{(L-d)-d}{v} \quad (7)$$

即得

$$\Delta T_3 = \frac{2d}{v} \quad (8)$$

将式(3)、式(8)比较可得, $\Delta T_3 = \Delta T_1$, 即远故障端测得的对端折射波与初始行波的时间差等于近故障端测得的故障点反射波与初始行波的时间差。

同理, 当故障点靠近N侧时, 测距公式为

$$d = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1 + \Delta T_2} L \quad (9)$$

此时, $\Delta T_1 = t_4 - t_2$, $\Delta T_2 = t_3 - t_1$ 。令 $\Delta T_3 = t_6 - t_1$, 同理可证 $\Delta T_3 = \Delta T_1$ 。

3.2 基于自相关分析的定位原理

3.1节已推导出仅与 ΔT_1 、 ΔT_2 以及线路长度 L 有关的测距公式, 本节将详细介绍如何使用自相关分析法准确找到时间差 ΔT_1 、 ΔT_2 。

由于在同一频带内, 传播距离不远时, 行波色散并不明显, 则初始行波和故障点反射波具有较大的相关性; 初始行波与对端的反射波也有一定的相关性, 但对端的反射波是由对端初始行波产生, 因此其相关性必然比前者小。

图1中, 故障点F处产生暂态行波并向两端传播, 其中近故障点M端测得的电流信号经过小波分解和重构后, 得到的第二个行波波头应为故障点反射波。先将故障信号取绝对值, 再对其进行自相关分析, 由式(1), 自相关函数波形会以 $\tau=0$ 为对称轴左右完全对称, 因此仅需考虑时间轴正半轴。当 $\tau=0$ 时信号完全重合, 函数值最大。当 $\tau=\Delta T_1$ 时, 初始行波波头移动到故障点反射波波头处, 此时求得的自相关函数值应为次最大值, 即初始行波与故障点反射波的相关性次大; 对端反射波折射到M端的时间 t_6 与M端初始行波到达时间 t_1 的时间差 $\tau=t_6-t_1$ 对应的函数幅值较小, 且函数幅值会依次减小, 如图3所示。

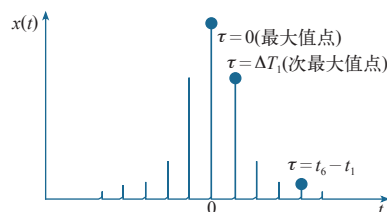
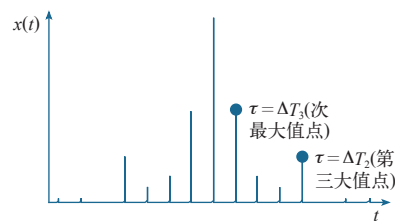
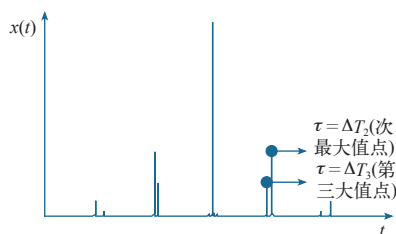


图3 近故障点M端的自相关函数波形

同理, 对N端测得的电流信号进行处理, 得到的第二个波头应为对端反射波, 第三个波头为故障点反射波, 对其进行自相关分析时, 最大值在 $\tau=0$ 处, 而次最大值应该在 $\tau=\Delta T_2$ 或 $\tau=\Delta T_3$ 处, 理论上故障点反射波与初始行波的相关性更大, 即次最大值应在 $\tau=\Delta T_2$, 但由于远故障端的故障点反射波传播路径比对端反射波远, 色散和畸变更严重, 因此两者的大小跟故障点的位置有关。当故障点靠近线路端时, 对端反射波传播路径短, 色散小, 而故障点反射波传播路径长, 色散和畸变更严重, 此时 $\tau=\Delta T_3$ 时的函数值会比 $\tau=\Delta T_2$ 时的函数值大, 如图4a所示。相反, 当故障点靠近线路中点时, 对端反射波传播路径变长, 色散变大, 而故障点反射波的路径变短, 色散变小, 此时 $\tau=\Delta T_2$ 时的函数值会比 $\tau=\Delta T_3$ 时的函数值大, 如图4b所示。但无论故障点是靠近线路端点还是中点, 由于色散和相关性的共同作用, 二者的函数幅值总是相差不大, 且在图中易于识别, 并且函数幅值先减小, 后在 $\tau=\Delta T_2$ 处突然增大, 这与图3近故障点M端的函数波形有明显的差别。



(a) 故障点靠近M侧



(b) 故障点靠近中点

图4 远故障端N侧的自相关函数波形

因此,可依据以上特征来判别故障点靠近线路M侧还是N侧,分别提取线路故障点近端的自相关函数次最大值对应的时间 ΔT_1 和远端的自相关函数次最大值以及第三大值所对应的时间 ΔT_2 、 ΔT_3 ,且 $\Delta T_2 > \Delta T_3$,即可分辨出 ΔT_2 和 ΔT_3 ,最终可得时间差 ΔT_1 、 ΔT_2 和 ΔT_3 的值。另外,由于 $\Delta T_3 = \Delta T_1$ (3.1节已证),则可以通过比较 ΔT_1 和 ΔT_3 的值来验证理论分析和时间差提取的正确性。若近似相等,则表明时间差提取正确,且与理论分析符合。

3.3 杆塔定位

线路实际长度因温度等自然条件的影响会产生一定的变化。若设为定值,必然影响测距准确度,而线路长度与杆塔的地面直线距离成对应比例关系^[24],则线路故障距离占线路全长的比例与地面故障距离占杆塔地面长度的比例是近似相等的,杆塔地面长度可作为定值代入式(6)或式(9),即可求得故障点对应的地面距离,然后找到距离故障点最近的杆塔,从而找到故障点在线路上的位置。

3.4 定位算法流程图

本文测距算法流程图如图5所示。

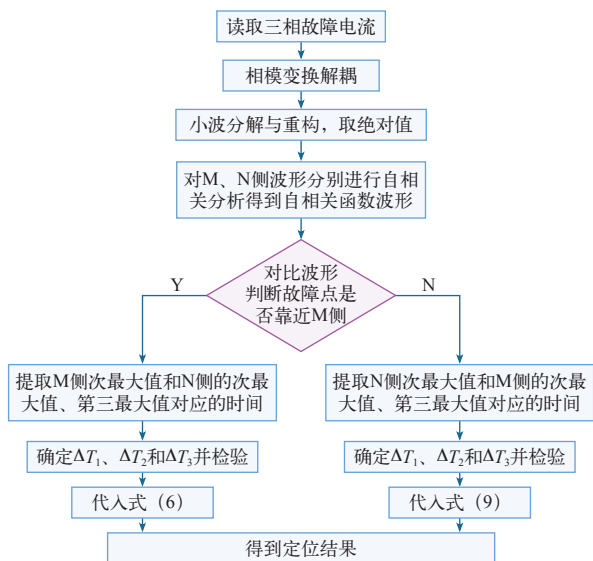


图5 测距算法流程图

4 仿真分析

4.1 ATP仿真

为验证该算法的有效性,在ATP中搭建一条

220 kV的输电线路,全长为100 km,输电线路的正序及零序参数为: $r_1=0.034\ 68\ \Omega/\text{km}$, $x_1=0.423\ \Omega/\text{km}$, $g_1=1 \times 10^{-7}\ \text{S}/\text{km}$, $b_1=2.726 \times 10^{-6}\ \text{S}/\text{km}$; $r_0=0.3\ \Omega/\text{km}$, $x_0=1.142\ 6\ \Omega/\text{km}$, $g_0=1 \times 10^{-7}\ \text{S}/\text{km}$, $b_0=1.936 \times 10^{-6}\ \text{S}/\text{km}$ 。采样频率为10 MHz。

由于波速 v 在同一频带内近似为定值,可取为 $2.97 \times 10^8\ \text{m/s}$ ^[5], L 作为杆塔地面距离也为定值,取值为100 km。

将式(3)、式(4)左右两边分别相加得

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 = \frac{2L}{v} \quad (10)$$

可以通过式(10)得 $\Delta T_1 + \Delta T_2 \approx 673.4\ \mu\text{s}$,可以将图3、图4中读取的 ΔT_1 、 ΔT_2 的值求和并与近似值进行比较,则可检验 ΔT_1 、 ΔT_2 的正确性。

4.2 算法验证及其鲁棒性研究

假设线路在距离M侧20 km处发生A相接地短路故障,M侧故障相的电流波形如图6所示。以A相为基准相对三相电流进行凯伦贝尔变换,并以线模分量作为分析对象,进行小波分解和重构。取绝对值后再对重构波形进行自相关分析,结果如图7、图8所示。

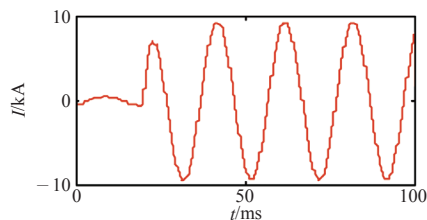


图6 M侧A相的故障电流波形

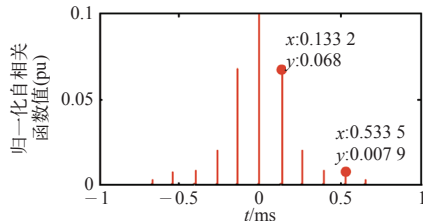


图7 线路20%处故障时M侧自相关函数波形

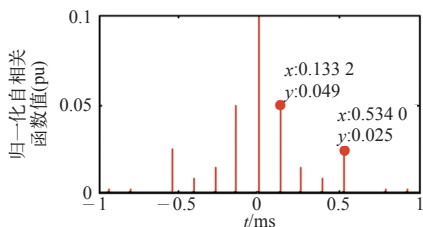


图8 线路20%处故障时N侧自相关函数波形

图7中,次最大值点为($x=0.133\ 2$, $y=0.068$),即 $\tau_1=133.2\ \mu\text{s}$,为故障点反射波与初始行波的时间差,且由于 $\Delta T_1+\Delta T_2\approx 673.4\ \mu\text{s}$,即 $\tau_2\approx 540.2\ \mu\text{s}$,图7中仅有一点($x=0.533\ 5$, $y=0.007\ 9$)接近,则容易找到对端反射波与初始行波的时间差 $\tau_2=533.5\ \mu\text{s}$,两点幅值相差较大。由图8可知,次最大值点($x=0.133\ 2$, $y=0.049$)、第三大值点($x=0.534\ 0$, $y=0.025$),即 $\tau_3=133.2\ \mu\text{s}$ 、 $\tau_4=534.0\ \mu\text{s}$,且 $\tau_3+\tau_4=667.2\ \mu\text{s}$,与近似值 $673.4\ \mu\text{s}$ 接近,证明取值正确。

对比图7、图8可知,图7中的两点幅值相差较大,并且函数值幅值依次减小,则应为近故障端的自相关函数波形;而图8中的两点幅值差别不大,且函数值幅值先减小,后在 $\tau_4=534\ \mu\text{s}$ 处突然增大,则应为远故障端的自相关函数波形,因此M为近故障端,N为远故障端。即 τ_1 应为M侧故障点反射波与初始行波的时间差; τ_2 为N侧反射波透过故障点折射到达M侧与初始行波到达M侧的时间差; τ_3 为M侧反射波透过故障点折射到达N侧与初始行波到达N侧的时间差; τ_4 为N侧故障点反射波与初始行波的时间差。 $\Delta T_1=\tau_1=133.2\ \mu\text{s}$, $\Delta T_2=\tau_4=534.0\ \mu\text{s}$, $\Delta T_3=\tau_3=133.2\ \mu\text{s}$, $\Delta T_1=\Delta T_3$,与理论分析相符。将 ΔT_1 、 ΔT_2 的值代入式(6),可得 $d=19.964\ \text{km}$,绝对误差仅为36 m,定位准确度高。

不同故障距离下的仿真结果如表1所示。由表1可知,该算法在不同故障距离处均有效,最小误差为2 m,最大误差也仅为45 m,具有较高的故障定位准确度。

表1 不同故障距离的测距结果

故障距离/km	故障比例(%)	测距结果/km	绝对误差/m	相对误差(%)
10	10	9.995	5	0.005
20	20	19.964	36	0.036
30	30	30.006	6	0.006
48	48	47.998	2	0.002
60	60	60.012	12	0.012
75	75	75.045	45	0.045
92	92	91.969	31	0.031

为进一步验证该算法的鲁棒性,设置不同故障过渡电阻、故障类型和故障初相角的仿真试

验,仿真结果如表2~表4所示。在不同故障距离处,经过不同的过渡电阻、发生不同类型的短路故障以及改变故障初相角,测距结果准确率高,证明该算法的鲁棒性较强。

表2 不同故障过渡电阻下的测距结果

过渡电阻/ Ω	不同故障距离的测距结果/km				
	$d=10\ \text{km}$	$d=30\ \text{km}$	$d=48\ \text{km}$	$d=75\ \text{km}$	$d=92\ \text{km}$
10	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
100	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969

表3 不同故障类型下的测距结果

故障类型	不同故障距离的测距结果/km				
	$d=10\ \text{km}$	$d=30\ \text{km}$	$d=48\ \text{km}$	$d=75\ \text{km}$	$d=92\ \text{km}$
AG	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
BC	9.995	30.006	47.998	75.045	92.024
BCG	9.996	30.006	47.998	75.045	91.969
ABC	9.993	30.006	47.998	75.045	92.010

表4 不同故障初相角时的仿真结果

故障初相角	不同故障距离的测距结果/km				
	$d=10\ \text{km}$	$d=30\ \text{km}$	$d=48\ \text{km}$	$d=75\ \text{km}$	$d=92\ \text{km}$
0°	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
18°	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
36°	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
72°	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969
90°	9.995	30.006	47.998	75.045	91.969

5 结束语

提出了一种基于自相关分析的双端行波杆塔定位方法,无须进行双端对时,也无须已知行波波速和线路实际长度,从原理上消除了双端对时不准确和波速、线路长度不确定带来的误差,定位准确度高,鲁棒性强。具体体现在以下几方面。

1) 本文对故障信号进行小波分解与重构,仅对包含主要故障信息的单一频带信号进行分析,而在单一频带内波速近似相等,故可减小波速不确定性带来的测距误差。

2) 本文利用自相关分析法能准确识别故障点反射波与初始行波的时间差,并用于故障测距,在不同故障距离、过渡电阻、故障类型和故障初相角下,该算法均具有较强的鲁棒性。

3) 采用杆塔地面距离代替线路实际长度的方法, 不受线路长度变化的影响, 减小了定位误差, 具有实用价值。

参考文献

- [1] 李勋, 石帅军, 龚庆武. 采用信赖域法和双端非同步数据的故障测距算法 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (2): 396-400.
- [2] 杜林, 陈宏业, 陈伟根, 等. 采用双端电压行波法的输电线路故障定位系统设计 [J]. 高电压技术, 2012, 37 (2): 304-309.
- [3] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理 [J]. 电网技术, 2006, 30 (8): 65-70.
- [4] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究 [J]. 电网技术, 2005, 29 (15): 65-70.
- [5] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位阻抗行波组合算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (6): 18-21.
- [6] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (13): 76-81.
- [7] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法 [J]. 电网技术, 2010, 34 (1): 203-207.
- [8] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (15): 7-13.
- [9] 向强铭, 王茜, 陈靖秋, 等. 基于奇异值分解理论的双端行波故障测距的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (12): 14-18.
- [10] 李博雅, 杨耀, 杨立红. 高压直流输电线路单端故障测距组合算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (3): 116-121.
- [11] 林圣, 武骁, 何正友, 等. 基于行波固有频率的电网故障定位方法 [J]. 电网技术, 2013, 37 (1): 270-275.
- [12] 全玉生, 邱庆春, 邵宇, 等. 基于双端不同步数据故障定位的中位修正法 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 1-3.
- [13] 钱峰, 陈义飞, 龚庆武. 一种新型双端时域故障定位算法 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (2): 81-83.
- [14] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (6): 92-95.
- [15] 周会峰, 曾祥君, 邓丰, 等. 输电线路故障行波网络定位新方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (19): 93-99.
- [16] 曾祥君, 张小丽, 马洪江, 等. 基于小波包能量谱的电网故障行波定位方法 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (11): 2311-2316.
- [17] 陈玥云, 覃剑, 刘巍, 等. 影响输电线路长度的主要因素分析 [J]. 电网技术, 2007, 31 (14): 41-44.
- [18] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (8): 6-10.
- [19] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线路上传播的色散研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (9): 27-30, 35.
- [20] 陈玉林, 陈允平, 龚庆武. 基于时频分量相关分析的高压电缆双端行波测距 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (12): 16-20.
- [21] 李勋, 龚庆武, 肖辉, 等. 基于相关分析匹配度的配电网故障定位 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (1): 90-95.
- [22] 周淦, 卢毅, 李剑, 等. 小波包提取算法和相关分析用于电缆双端行波测距 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (7): 1695-1699.
- [23] 杜林, 庞军, 司马文霞. 行波相关法的输电线路故障定位 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (12): 2637-2641.
- [24] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 一种利用行波自然频率的杆塔故障定位新方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (5): 78-82.

(收稿日期: 2016-02-10) **EA**