

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221129

水电站 220 kV 输电线路故障行波定位

文 中^{1,2}, 罗苏新¹, 刘 斐¹, 郭俊康¹, 郑连华¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌, 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对水电站输电线路发生故障后无法准确实施定位的问题, 从行波的实际传播理论出发, 推导出一种与波速无关的改进双端定位算法。利用变分模态分解(VMD)能自适应地分解故障电流行波信号, Teager 能量算子(TEO)可快速追踪信号的能量变化、运算量小的独特优势, 建立了基于 VMD-TEO 的 220 kV 输电线路行波定位模型, 该模型无需考虑波速修正和双端时间同步。PSCAD 仿真结果表明, 改进的双端故障定位模型误差百分比最大为 0.239%, 优于其他定位算法, 验证了所提方法的可靠性和优越性。

关键词: 水电站; 故障定位; 双端法; 波速修正; 能量算子

中图分类号: TM726.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0198-04

1 引言

水电站大多建于地势险要地区, 输电线路架设距离普遍较长, 跨越地势复杂, 故障时有发生^[1], 严重影响水电站的电能输送, 无法满足电力系统的扩张需求。为此, 研究一种高效、准确的故障定位方法具有重要意义。目前常用的行波法根据信号端可分为单端法^[2]和双端法^[3]。其中单端法存在定位死区, 无法准确识别行波来源; 双端法仅需考虑两端初始行波, 但对时间采集的同步和波速的测量依赖性较高。行波波速^[4]易受周围气候环境、线路参数影响, 具有不确定性。如利用行波二次折反射进行定位, 存在行波信号能量衰减严重, 故障时刻难以确定^[5]问题; 希尔伯特-黄变换(HHT)分解出的本征模态分量(IMF)存在模态混叠现象, 可能含有多个分量, 对定位造成干扰^[6]; 小波变换和 TEO 结合的行波定位方法受限于小波变换中基函数和分解尺度的选取, 不具有自适应性^[7]。对此, 基于行波理论, 提出一种与波速无关的改进双端法, 消除了波速参数影响; 其次, 采用变分模态分解(VMD)和 Teager 能量算子(TEO)相结合的一种信号分析算法(VMD-TEO), 提取故障行波波前时刻^[8,9]。利用 PSCAD 仿真表明, 所提方法具有较好的精度, 能准确检测出突变波头, 定位精度较高。

2 双端定位新算法

2.1 双端行波法原理

目前, 双端行波法相关研究和应用较多, 依据的定位原理见图 1。

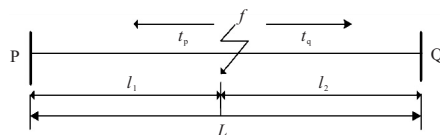


图 1 双端行波法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double-ended traveling wave method

定位公式为:

$$\begin{cases} l_1 = [L + v(t_p - t_q)]/2 \\ l_2 = [L + v(t_q - t_p)]/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, l_1 、 l_2 分别为故障点到 P、Q 两端距离; L 为 P、Q 两端长度; t_p 、 t_q 分别为故障到达时刻; v 为波速。

由运行经验知, 行波波速、故障到达两测量点的时刻是影响定位精度的重要因素。故障行波是一种高频且非周期变化的信号, 为保证采集数据的实时性和同步性, 通常在线路两侧配备高精度的时钟同步装置, 避免误差。

2.2 改进双端行波法

改进双端行波法, 即在双端行波法中引入故障初始行波、故障反射波, 利用二者的时间差, 进

收稿日期: 2022-05-26, 修回日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51807110)

作者简介: 文中(1968-), 男, 硕士、副教授, 研究方向为输电线路杆塔及基础, E-mail: 812322399@qq.com

行定位计算。如图 2 所示, 线路 PQ 段 f 处发生故障, 产生沿线路两端传播的行波信号, 遇到不连续的波阻抗点, 发生折反射现象。初始故障行波到达 P、Q 两端的时刻为 t_{p1} 、 t_{q1} , 反射波到达时刻为 t_{p2} 。通过比较, 判断故障发生区间。当 $t_{p1} < t_{q1}$ 、 $l_f < 0.5L$, 故障发生于线路 P 侧近端; 当 $t_{p1} > t_{q1}$ 、 $l_f > 0.5L$, 故障发生于线路 Q 侧近端。

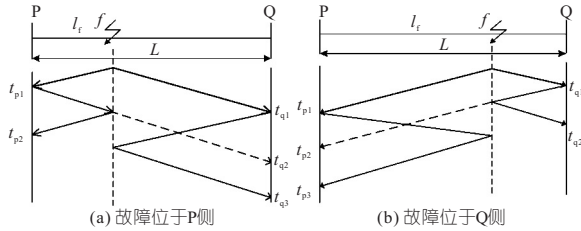


图 2 改进双端法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the improved double-ended method

(1) 当故障发生于 P 侧时, 测量点 P 采集的 2 个波头, 依次为初始行波、故障点反射行波; 测量点 Q 采集的 3 个波头, 依次为初始行波、对端母线反射行波、故障点反射行波, 则改进的双端行波定位公式为:

$$l_f = [L(t_{p2} - t_{p1})] / (t_{p2} - t_{p1} + t_{q3} - t_{q1}) \quad (2)$$

(2) 当故障发生于 Q 侧时, 测量点 Q 采集的 2 个波头, 依次为初始行波、故障点反射行波; 测量点 P 采集的 3 个波头, 依次为初始行波、对端母线反射行波、反射行波。改进的双端行波定位公式为:

$$l_f = [L(t_{q2} - t_{q1})] / (t_{p3} - t_{p1} + t_{q2} - t_{q1}) \quad (3)$$

分析改进双端行波定位公式可知, 无需考虑行波速度, 所需的时刻由两端各自测量。

3 行波检测算法理论

3.1 VMD 原理

VMD 算法具有分解稳定性好、自适应性强的独特优势, 其核心要素是变分问题的构造与求解, 为达到最佳的采样效果, 保留信号的局部特征。该算法在提取本征模态分量时采用迭代搜索法, 求解变分模型的最优解, 获得每个分量的频率中心及带宽, 具有良好的噪声鲁棒性。变分模型公式为:

$$\begin{cases} \min_{(u_k), (\omega_k)} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (4)$$

式中, (u_k) 为分解的 IMF 个数; (ω_k) 为每个分

量的频率中心。

为求出该变分模型的最优解, 引入增广 Lagrange, 加入惩罚因子 α 和乘法算子 λ , 对模型的收敛性和保真性加以约束。表达式为:

$$L\{(u_k), (\omega_k), \lambda\} = a \sum_k \partial_t \left\{ \left[\delta_t + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \right\} e^{-j\omega_k t} \left\|_2^2 + \left[\lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right] + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 \quad (5)$$

式(5)的“鞍点”, 即极小值点, 变分问题的最优解, 通过交替方向乘子算法 (ADMM), 更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 、 λ^{n+1} , 其中 u_k^{n+1} 可表示为:

$$u_k^{n+1} = \underset{u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

为简化计算, 认为 $\omega_k^n = \omega_k^{n+1}$, $\sum_i u_i(t) = \sum_{i \neq k} u_i(t)^{n+1}$ 。通过 Parseval、傅里叶等距变换, 将式(6)转化为:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{f(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (7)$$

中心频域 ω_k^{n+1} 可更新为:

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (8)$$

通过将模型简化为局部最优解的求解, 实现变分问题的转换, 最后分解出 k 限带宽的 IMF 分量。

3.2 TEO 原理

TEO 作为一种非线性算子, 具有很好的时间分辨能力, 能提取信号的瞬时能量值, 对信号能量变化敏感。但 TEO 无法对多分量信号进行检测, 只能处理单一信号。行波经过 VMD 分解后, 选择故障信息完整的单一模态分量。对单分量的幅值频率进行能量算子解调, 提取能量谱中的首个突变点, 对应故障行波到达时间。利用 TEO 算法快速追踪信号的能量变化, 对极大值点进行能量解调, 实现对采样信号的有效检测。若为连续信号 $f(t)$, 算子计算公式为:

$$\psi[f(t)] = f'^2(t) - f(t)f''(t) \quad (9)$$

式中, ψ 为能量算子; t 为时间; $f'(t)$ 、 $f''(t)$ 分别为信号的一阶、二阶导数。

对于离散信号 $f(n)$, 可表示为:

$$\psi[f(n)] = f^2(n) - f(n+1)f(n-1) \quad (10)$$

由式(10)可看出, TEO 的解调过程实际是对单分量信号进行频率及幅值分析, 简单、高效, 且

计算量小,只需3个采样点信息就可得到对应的能量值。

3.3 算法流程图

改进双端法具体故障定位流程图见图3。

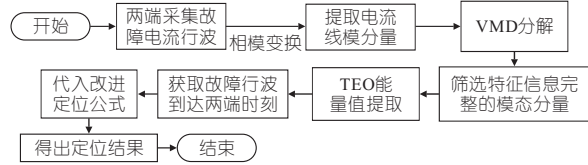


图3 改进双端法定位流程图

Fig. 3 Improve the two-end method positioning flowchart

由于A、B、C三相电流相量之间存在耦合作用,采集P、Q端的故障电流信号时,利用相模变换矩阵转换为独立的 $0, \alpha, \beta$ 模量可简便计算。应用一种新的相模变换矩阵解耦,然后提取电流 α 模分量进行分析。其变换矩阵 T_i 为:

$$T_i = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_i^{-1} x(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{5}{\sqrt{42}} & \frac{-1}{\sqrt{42}} & \frac{-4}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{14}} & \frac{-3}{\sqrt{14}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

4 算例仿真

基于PSCAD建立水电站220 kV输电线路模型。采用频率相关(相)模型搭建,线路的水平距离为100 km,采样频率设为500 kHz,故障发生于0.25 s,采样时间为2 ms。模拟线路的故障及电磁暂态过程,系统见图4,采用双端电源搭建。

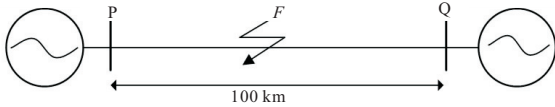


图4 220 kV输电线路仿真模型

Fig. 4 Simulation model of 220 kV transmission line

输电线路F点发生故障后,电流和电压以行波方式沿线路传播。故障行波信号具有高频特征,频率可达上万赫兹。线路中配备监测装置,电流互感器相比于电压互感器,具有更好的动态响应和特性,采集电流信号更为可靠,更符合实际行波传播情况。搭建的仿真模型为P端45 km处发生A相接地短路,过渡电阻为50 Ω 。

输电线路发生故障后,录波器采集的行波是一种高频信号,先对两端的电流信号进行相模变

换,取其中的 α 模电流分量进行VMD3模态分解。线路两端信号分解结果见图5。

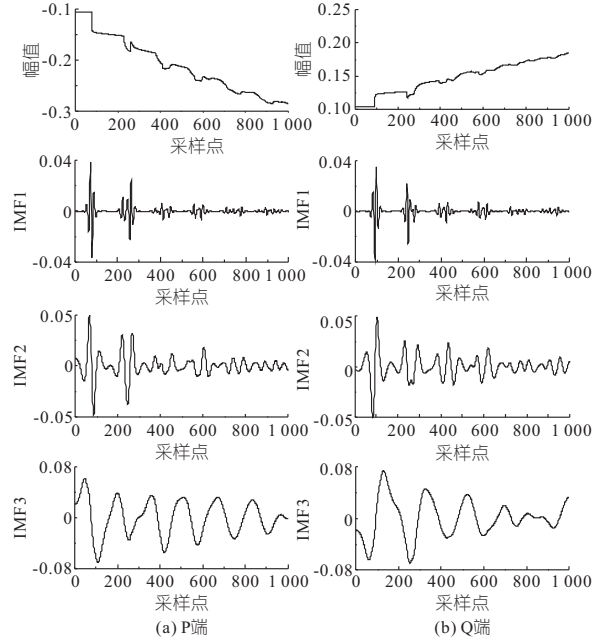


图5 P、Q端电流量模分量及VMD分解

Fig. 5 P-terminal and Q-terminal current line mode component and VMD decomposition

由图5可观测到故障局部特征信息,模态分解个数取3时,效果最佳。3个分量中,相比IMF2、IMF3,IMF1分量信号特征保留完整,噪声过滤完全。选取特征信息完整的IMF1进行TEO能量提取,能量极大点对应突变时刻。瞬时能量谱见图6。

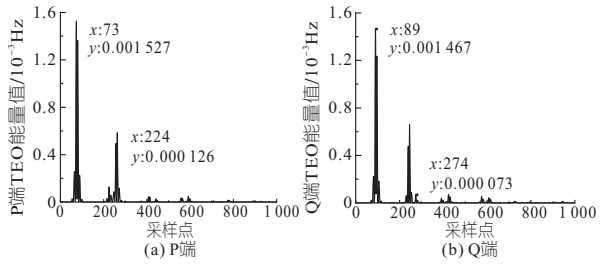


图6 P、Q端模式1的瞬时能量谱

Fig. 6 Instantaneous energy spectrum of P-terminal and Q-terminal mode 1

仿真采样频率为500 kHz,每个采样点对应2 μ s。P端瞬时能量谱中提取的极大能量值对应的采样点分别为73、224;Q端瞬时能量谱中提取的极大能量值对应的采样点分别为89、274。初始行波到达P、Q时刻为146、178 μ s,反射波到达P时刻为448 μ s,反射波到达Q时刻为548 μ s。定位结果 $l_f = 44.940$ km,误差为0.060 km,定位较理想。

(1)故障位置因素影响。为验证方法的有效性,在不同故障位置下进行仿真验算。以线路发

生单相接地短路为例,过渡电阻 50Ω 不变,分析 18、33、45、64、75、88 km 故障位置对定位结果的影响。并与方法 1^[10]、2^[11] 进行误差对比,结果见表 1。

表 1 不同故障位置处的定位结果(50 Ω)

Tab. 1 Location results at different fault locations(50 Ω)

故障点/km	本文方法		方法 1		方法 2	
	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%
18	18.209	0.209	17.576	0.424	18.541	0.541
33	33.134	0.134	32.727	0.273	32.647	0.353
45	44.940	0.060	45.062	0.062	45.209	0.209
64	63.880	0.120	63.855	0.145	63.772	0.228
75	74.850	0.150	75.257	0.257	74.487	0.513
88	87.761	0.239	88.485	0.485	87.240	0.760

由表 1 可知,故障越接近中点,定位误差百分比越小,故障向两侧逼近,误差百分比会逐步增大,最大为 0.239%,具有较高的定位精度。由此可知,本文方法相对于方法 1、2,定位精度更高,误差更小,验证了所提算法的优越性和有效性。

(2)故障类型影响。在其他因素相同的情况下,针对输电线路中的单相接地短路(A-G)、两相相间短路(A-B)、两相接地短路(A-B-G)、三相短路(A-B-C)进行仿真验算,分析算法在不同故障类型下的适应情况。以故障点距 P 端 33 km、过渡电阻 20Ω 为例。结果见表 2。

表 2 不同故障类型下的定位结果(20 Ω)

Tab. 2 Location results under different fault types (20 Ω)

故障类型	本文方法		方法 1		方法 2	
	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%
A-G	33.034	0.134	32.727	0.273	32.647	0.353
A-B	33.034	0.134	32.727	0.273	32.647	0.353
A-B-G	33.034	0.134	32.727	0.273	32.647	0.353
A-B-C	33.034	0.134	32.727	0.273	32.647	0.353

(3)过渡电阻因素影响。验证不同过渡电阻下定位结果变化。以故障点距 P 端 64 km 发生单相接地短路为例,分析过渡电阻依次为 1、10、50、100 Ω 时的定位结果,见表 3。由表 2、3 分析可得,所提方法定位结果误差较小,对故障类型和

表 3 不同过渡电阻的定位结果(64 km)

Tab. 3 Positioning results of different transition resistances (64 km)

过渡电阻/ Ω	本文方法		方法 1		方法 2	
	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%	定位结果/km	误差百分比/%
1	63.880	0.120	63.855	0.145	63.772	0.228
10	63.880	0.120	63.855	0.145	63.772	0.228
50	63.880	0.120	63.855	0.145	63.772	0.228
100	63.880	0.120	63.855	0.145	63.772	0.228

过渡电阻的适应性较强。不同的故障情况下,均能精准实现定位,效果突出。相比方法 1、2,测距精度得到大幅提升。

5 结论

a. 根据故障行波传播原理,由故障初始行波和近端反射行波二者存在的时间差,提出了一种不受波速影响的改进双端法。

b. 故障电流行波信号分解中,利用 VMD-TEO 信号分析算法,提取突变点的瞬时能量值,获得行波浪涌时刻。大量仿真结果表明,所提方法精度较高,误差百分比最大为 0.239%,定位结果较为理想。

c. 所提算法受故障位置、故障类型、过渡电阻影响较小,可就近排除故障,具有良好的适用性。相比于现有的行波定位算法,其定位精度得到大幅提升,优越性得到了验证,为故障行波定位提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨林,王宾,董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化,2018,42(8): 185-191.
- [2] 束洪春,宋晶,田鑫萃. 基于行波传播路径的不等长双回线路单端行波测距[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):140-149.
- [3] 辛正祥,李京,安韵竹,等. 基于光纤时间同步的双端行波故障测距方法[J]. 水电能源科学,2018,36(5): 184-187.
- [4] 黄元亮,郝真真,姜甜甜,等. 一种新的输电线路双端行波故障定位算法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(1): 20-29.
- [5] 余泽轩,帕孜来·马合木提. 基于改进双端法的高压交流输电线路故障定位[J]. 光电子·激光,2021,32(10): 1099-1104.
- [6] 谢李为,曾祥君,柳祎璇. 基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16): 75-81.
- [7] 李娜,孙秀娟,王鹏飞,等. 基于小波变换和 TEO 的输电线路故障测距方法[J]. 水电能源科学,2019,37(10): 142-144, 149.
- [8] 陈惠,莫付江,许梦素,等. 基于 VMD 和柔性形态学的输电线路故障测距方法[J]. 电测与仪表,2018,55(2): 20-24.
- [9] 徐元博,蔡宗琰,丁凯. 复杂背景下对称差分解能量算子在轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击,2019,38(8): 246-254.
- [10] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(8): 8-13.
- [11] 杨安琪,龚庆武. 基于 VMD 和 SDEO 的低采样率行波故障定位算法[J]. 电测与仪表,2018,55(6): 1-7, 15.

