

Vol. 30 No. 4

2017 年 12 月Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Dec. 2017

基于行波理论的 10 kV 自闭/贯通线路 故障测距研究

谷 枫¹, 田行军¹, 陈保平¹, 刘红国²

(1. 石家庄铁道大学 电气与电子工程学院,河北 石家庄 050043;2. 北京铁路局 衡水供电段,河北 衡水 053100)

摘要:10 kV 自闭/贯通线是铁路供电系统重要组成部分,其故障定位宜采用行波测距法。 在供电线路中,架空线和电缆多次交替使用而引起的波速不同与截面处反射是制约测量精度的 关键因素。为解决不同线路混用带来的系列问题,提出基于等值线路的速度归一化方法。该方 法首先给出了等值长度的概念,然后在线路模型的基础上通过等值变换实现了波速的统一。大 量的仿真实验验证,该方法不仅概念清楚,而且定位精度达到设计要求。

关键词:自闭/贯通线路;行波测距;等值变换

中图分类号:TH165.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2017)04-0083-05

0 引言

10 kV 自闭/贯通线是指连通铁路沿线两个相邻变电所、配电所间的重要输电线路,肩负向沿线车站、 区间负荷和信号设备供电的重任。电气化铁路是一级负荷,其运输系统对自闭/贯通线的供电可靠性要 求较高,但自闭/贯通线所处的环境非常复杂,容易发生各种类型的故障。自闭/贯通线的永久性故障难 以排查,且对铁路运输的连续性威胁极大,因而,研究 10 kV 自闭/贯通线的故障测距方法具有重要意义。

铁路 10 kV 自闭/贯通线具有接线形式简单、线路长和多小负荷等特点^[1],这些特点说明线路阻抗与 线路长度之间是强非线性关系,且二者的关系是动态变化的。在这种复杂的情形下,行波测距法要优于 阻抗测距法。其原因是,电磁暂态行波在输电线路传输期间,其波速不受过渡电阻和线路结构的影响,因 而基于暂态行波的故障测距具有测量精度高、适用范围广等众多优点^[2]。暂态行波故障测距的实用化和 工程化研究一直是该领域的热点,目前已提出的行波测距方法有 A、B、C、D、E、F6 种型式,其中,A、C、E、 F 为单端测量法,B、D 为双端测量法^[3-4]。

铁路 10 kV 自闭/贯通线是架空线和电缆多次交替使用的混合线路,其波阻抗差异较大而引起的波 速不一致和截面处的波反射成为影响测量精度的关键因素。为提高行波测距的精度,文献[5]和文献[6] 在提取故障特征时引入了小波分析技术,既消除了行波色散又提高了行波测量精度,但该方法只能应用 在特定环境下,并没有解决因架空线和电缆混用而造成的波速不一致问题;文献[7]~文献[9]虽然考虑 了不同传输介质对行波传输的影响,但对其没有进行深入的研究。为解决暂态行波在自闭/贯通线中波 速不一致问题,笔者在深入研究自闭/贯通线传输特性的基础上,提出基于等值线路的速度归一化方法, 并通过大量仿真实验验证了新方法的可行性。

1 均一导线的行波测距原理

1.1 无损单导线中的波过程

无损导线指电阻和对地电导不存在的理想导线。假定波在一段无限长的均匀无损单导线上传播期

收稿日期:2016-09-14 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2017.04.16 作者简介:谷枫(1990-),男,硕士研究生,主要从事计算机测控的研究。E-mail:1214970569@qq.com 谷枫,田行军,陈保平,等.基于行波理论的10 kV自闭/贯通线路故障测距研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):83-87. 间,是按相应的波速以电磁波方式向下传播,且电压行波和电流行波是伴随统一的,这就是行波的传递过 程。这说明线路上的电压、电流发生突变后,不能马上引起下级各点的变化,即存在延迟时间和传播 过程。

对于长度有限的输电线路,由于暂态行波含有丰富 的高频成分,其分析必须采用分布参数电路和行波理 论。图 1 是无损单导线的等值电路。在图 1 中,无损单 导线的单位长度电感、对地电容分别为 L_0 、 C_0 ,长度微增 量 dx 的电感和电容分别为 L_0 dx、 C_0 dx。

将无损单导线的电压和电流均视为时间 *t* 的函数, 则其波动方程组为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$
(1)

其达朗贝尔解为

$$\begin{cases} u = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) = u' + u'' \\ i = \frac{1}{Z} [f_1(x - vt) - f_2(x + vt)] = i' + i' \end{cases}$$
(2)

式中,v为行波波速, $v=1/\sqrt{L_0C_0}$;Z为线路波阻抗, $Z=\sqrt{L_0/C_0}$;正向电压行波 $u'=f_1(x-vt)$;反向电压行波 $u''=f_2(x+vt)$;正向电流行波 $i'=f_1(x-vt)/Z$;反向电流行波 $i''=-f_2(x+vt)/Z_o$

根据电磁场理论知,架空线路单位长度的电感和电容为

$$\begin{cases} L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \\ C_0 = 2\pi \varepsilon_0 \ln^{-1} \frac{2h}{r} \end{cases}$$
(3)

式中,h 为导线离地面的平均高度;r 为导线半径; μ_0 为空气相对磁导率,值为 $4\pi \times 10^{-7}$; ϵ_0 为介电常数,值 为 8.84×10⁻¹²。

行波架空线路上的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \tag{4}$$

同理可得,行波在地下电缆的传播速度只有架空线路的一半。

综上所述,可得出行波的特点:

(1)行波是正向行波和反向行波的叠加,反映电压或电流的变化;

(2)行波传播的实质是电磁波的传递,无损单导线中波速为光速,且波形不变;

(3) 电压波和电流波在传递过程中是伴随统一的。

1.2 双端行波测距原理

在行波故障测距中,双端法的测量精度一般优 于单端法,现阐述双端行波测距的原理。图 2 为双 端测量行波传播路径示意图。在图 2 中,给定的物 理量有:输电线路 AB 的长度 L、故障点 O、故障发生 时刻 t_0 、A 端首次检测到故障行波信号的时刻 t_1 ,B 端首次检测到故障行波信号的时刻 t_2 ;待求物理量 是故障点与 A 端的距离 L_{OA} ,与 B 端的距离 L_{OB} 。





设行波的波速已知为 v,可得

$$\begin{cases}
L_{OA} = v(t_1 - t_0) \\
L_{OB} = v(t_2 - t_0) \\
L = L_{OA} + L_{OB}
\end{cases}$$
(5)

对式(5)求解,得

$$\begin{cases} L_{\text{OA}} = \frac{1}{2} [v(t_1 - t_2) + L] \\ L_{\text{OB}} = \frac{1}{2} [v(t_2 - t_1) + L] \end{cases}$$
(6)

实现双端行波测距的一个前提条件是,线路两端测量必须保持精确同步,即两端的时间基准必须相同。在工程上,为达到两端测量的时间基准相同,通常以全球定位系统 GPS 的时间为基准。GPS 的时间 测量精度为 1 μs,对应的最大误差距离为 300 m,这样的测量精度已完全达到工程要求。

2 自闭/贯通线的行波故障测距原理

常见行波测距法对于均一的一般输、配电线路,如高电压线路,应用效果较好。但是在小电流接地系统中,如铁路 10 kV 自闭/贯通线路,由于其存在架空线和电缆交替相接且交替变换的次数多,两者波阻 抗差异较大造成波速不连续的问题,因此不能直接应用上述公式进行故障测距。

架空线和电缆的波阻抗差异明显:架空线的波阻抗平均为 300~500 Ω,电缆的波阻抗为 10~100 Ω^[10],因此,二者在相连处存在明显的反射。这种情况下,找出故障点的反射波就异常困难。双端行波测 距法较单端行波测距法的优点是:只需捕获故障点的首次行波而不必捕获故障点的反射行波,易于实现。 因此,采用双端行波测距法对该线路进行故障定位。

要想实现准确的双端测距,波速是一关键因素。现假设一段自闭/贯通线路如图3所示。



图 3 架空线 电缆交替线路

在图 3 中,设电缆 3 与电缆 4 中间处发生单相接地故障,行波到达 A、B 两端的时刻分别为 $t_1, t_2, 则$ 不能简单地套用式(6)来测距。本文提出基于等值线路的波速归一化方法来消除波速不连续所带来的影响。假设架空线中的行波速度为 v,电缆中的行波速度为 u,以架空线的波速 v 为基准,将电缆长度进行折算,即对于长为 L 的电缆,折算后的长度为 $v \cdot u^{-1} \cdot L$,应用式(6)对等效后的线路进行故障测距,则可求得故障点在折算后的线路中的位置,再折算到原来的线路,则可得到故障点在实际线路中的位置。

3 仿真分析

采用 Matlab 中的 Simulink 模块进行仿真, Simulink 是 Matlab 中的一种可视化仿真工具, 是基于 MATLAB 的框图设计环境, 是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包, 被广泛应用于线性系统、非 线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中, 仿真结果能够反映实际暂态情况^[11-14]。

3.1 建模

铁路 10 kV 自闭/贯通线路为中性点不接地系统,且为双端电源供电,仿真模型如图 4 所示。

铁路 10 kV 自闭/贯通线路最常见的故障为单相接地短路故障,以此为例进行仿真。当线路发生单相接 地短路故障时,两端断路器将线路切除,此时单独抽取一相线路进行仿真,其仿真模型如图 5 所示。

该相线路的参数设置如图 6 所示。



在图 6 中,线路参数设置如下: 架空线的正序电感为 1.108e-3 H/km,正序电容为 10.5e-9 F/km,电缆的正序电感为 0.255e-3 H/km,正序电容为 174e-9 F/km。架空线中的波速为 v=2.932e8 m/s,电缆中的波速为 u=1.501e8 m/s^[9],则比例系数为 k=v/u=1.953。设电缆的长度依次为 10、10、5、5、10 km,则折算后的电缆长度为 19.53、19.53、9.765、9.765、19.53 km。设架空线的长度依次为 10、10、10 km。折算后的等值线路总长为 108.12 km,则故障点距 A 端的距离 L_{OA} 可用公式(6)求得。如此得到的距离 L_{OA} 为折算后的故障点距离,再将其折算为实际距离,就可以实现精确的故障定位。 3.2 故障波形分析与计算

电路参数设置:电源电压为 220 V,频率为 170 Hz;采样率为 1e7;架空线与电缆参数如上所述。设置 断路器关断时间为[0.02,0.05]。当断路器闭合时,相当于线路发生单相接地短路故障,示波器采集到的 线路两端的故障波形如图 7 所示。

单相接地短路故障波形局部放大如图 8 所示。 图中两条曲线第一个突变点的时间差,即为故障行 波到达线路两端的时间差,由式(6),即可求出精确 的故障点距离。具体计算过程如下:求解得 ΔT 为 1.01e-4 s,L 为 108.12 km,波速 v 为 2.932e8 m/ s,则根据式(6)可得折算后的故障点距离为 68.86km,折回到实际线路的故障点距离 L_{OA} 为 45.021km,而实际故障点距离为 45 km,误差为 21 m,远 远小于工程上要求的 ± 400 m。



第4期

4 结论

小电流接地系统单相接地短路故障测距情况复杂, 因其线路结构存在架空线与电缆交替相接,且交替变化 次数多,波阻抗差异大造成波速不连续的问题。本文分 析了小电流接地系统的特殊性,将高压输电线路行波测 距法应用到了铁路 10 kV 自闭/贯通线路中,提出了基 于等值线路的波速归一化的方法,成功解决了线路波速 不连续的问题,为小电流接地系统的故障测距开辟了新 的途径,通过理论分析和仿真验证,证明方案是可行的。



参考文献

- [1]何正友,王志兵.铁路自闭贯通线路故障检测模型[J].西南交通大学学报,2004,39(4):451-454,489.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [3]陈平,徐丙垠,李京,等.现代行波故障测距装置及其运行经验[J].电力系统自动化,2003,27(6):66-69.
- [4]贾俊国,范云鹏,李京,等.利用电流行波的输电线路故障测距技术及应用[J].电网技术,1998,22(8);63-66.
- [5] 覃剑,彭莉萍,王和春.基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J].电力系统自动化,2005,29(19):62-65,86.
- [6] 卢继平,黎颖,李健,等.行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J].电力系统自动化,2007,31(23):65-69.
- [7]周湶,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.
- [8]**刘亚东**,盛戈皞,王葵.输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J].高电压技术,2011,37(4):923-929.
- [9]和敬涵,季英业.小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究[J].华北电力技术,2004(1):1-3.
- [10]邱毓昌,施围,张文元. 高电压工程[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [11]龚庆武,来文青,吴夙. 用 MATLAB 和 EMTP 对输电线路进行故障定位数字仿真的比较[J]. 华北电力技术,2001 (10):65-68.
- [12]马燕宁. 全并联 AT 双边供电方式的故障测距方法[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(3):79-83.
- [13]李夏青,鲍林栋.电气化铁路牵引变电所故障诊断专家系统[J].石家庄铁道学院学报,1995,8(1):65-69
- [14]娄海洋,王硕禾,薛强.一种改进的单相电路谐波和无功电流检测法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29 (2):93-96,101.

Study on Fault Location of 10 kV Automatic Blocking and Continuous Power Transmission Line Based on Traveling Wave Theory

Gu Feng¹, Tian Xingjun¹, Chen Baoping¹, Liu Hongguo²

School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 Hengshui Power Supply Branch, Beijing Railway Administration, Hengshui 053100, China)

Abstract: The 10kV automatic blocking and continuous power transmission line is an important part of railway power supply system, and the electromagnetic transient traveling wave method is suitable for its fault location. The different traveling wave speed and the wave reflection are caused by the frequent alternate use between overhead lines and cables, which is the key factor that restricts the measurement precision in transmission line. In order to solve the problems caused by the alternate application of different lines, a new method of normalized velocity is proposed by the equivalent transform of transmission line circuit. The concept of equivalent length is first defined in the method, and then the uniform wave velocity is obtained by the equivalent transformation on the basis of the line model. A large number of simulation experiments show that the proposed method not only has a clear concept, but also its localization accuracy meets the design requirements.

Key words: automatic blocking and continuous power transmission line; traveling wave fault location; equivalent transform