第33卷 第3期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 3

2020年9月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2020

全并联 AT 牵引网行波故障测距研究

贺凤珂, 陈保平, 安晓静, 王艺霏

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:全并联 AT 牵引网是我国高速电气化铁路供电系统中重要的供电架构,其快速精确 的故障定位对保障电气化铁路安全畅通运行具有重要意义。在全并联 AT 牵引网发生故障短 路的情况下,通过测取短路故障行波的波头到达时间以及行波测距原理,找出线路的故障位置。 根据全并联 AT 牵引网的架构特点,采用 D 型双端行波测距法,通过误差较小的北斗卫星导航 系统同步时钟实现数据的同步采样,并根据小波变换的信号奇异性检测原理和模极大值理论对 两端测得的行波信号进行数据处理,有效解决了行波波头的识别和提取问题。通过仿真实验验 证,得出的结果与实际故障位置相差不大,能够实现线路的快速精准定位。

关键词:全并联 AT 牵引网;故障测距;D型行波;北斗卫星导航系统;小波变换 中图分类号: U226.8+1 文献标志码:A 文章编号: 2095-0373(2020)03-0072-06

0 引言

2016 年 7 月,国家发改委印发了经国务院批准的新一版《中长期铁路网规划》,该规划方案指出,我国 将建成"八纵八横"高速铁路网。规划目标:到 2020 年,铁路网规模达到 15 万 km,其中高速铁路 3 万 km,覆 盖 80%以上的大城市;到 2025 年,铁路网规模达到 17.5 万 km 左右,其中高速铁路 3.8 万 km 左右;到 2030 年全国铁路基本实现内外互联互通、区际多路畅通、省会高铁连通、地市快速通达、县域基本覆盖^[1]。 这为实现经济社会持续健康发展、实现"两个一百年"奋斗目标提供强有力的支撑。电气化铁路牵引网都 暴露在环境恶劣的户外,且承受受电弓的高速机械震动摩擦,致使其故障频发^[2]。而电气化铁路牵引网 则作为电能传输的唯一导体介质,一旦线路上发生故障,就会影响线路的正常运行,需快速准确找出故障 位置,这对高速电气化铁路运输具有很重要的现实意义。

目前我国电气化铁路牵引网按供电方式不同可分为直接供电方式、BT(吸流变压器)供电方式、AT (自耦变压器)供电方式以及 CC(同轴电缆)供电方式^[3]。在高速铁路牵引供电系统中主要采用 AT 供电 方式,其根据线路连接结构可分为单线 AT 供电方式、复线 AT 供电方式以及全并联 AT 供电方式。其 中,全并联 AT 供电方式的供电原理与复线 AT 供电方式基本相同,不同的是复线 AT 供电方式只是上下 行末端线路采用并联供电,而全并联 AT 供电方式在每一个 AT 所和分区所处上下行线路都进行横向并 联联接^[4],这样使得牵引网单位长度的阻抗减小,降低了电压损耗,从而增强牵引网系统的供电能力,改 善电能质量,保证机车的安全、可靠、高速运行,在高速电气化铁路上有着广泛的应用。但因其线路结构 复杂,一旦线路上发生故障情况,很难准确确定故障位置,这给牵引供电系统恢复供电、保障运行安全带 来困难。文献[5]~文献[7]中所研究的线路只是复线 AT 供电方式,未对全并联 AT 供电方式的测距情 况进行研究。本文则根据全并联 AT 供电系统线路特性搭建其仿真模型,研究线路故障时产生的信号特 征及测距原理,可以快速准确测量出故障位置。

1 D型行波故障测距原理

行波具有传播速度稳定、测距精度高、不受线路结构及故障类型等因素影响的特点,被广泛应用于牵

收稿日期:2018-12-21 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180148 作者简介:贺凤珂(1993—),女,硕士研究生,研究方向为计算机测控。E-mail:1733690868@qq.com 贺凤珂,陈保平,安晓静,等.全并联 AT 牵引网行波故障测距研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):72-77. 引网线路故障测距研究中。行波法是基于暂态行波的故障测距法,依据行波信号的测取方式可分为单端 法和双端法。从理论分析上讲,单端法和双端法均可对牵引网进行故障测距。但是,牵引网线路本身结 构以及设备非常复杂,严重影响行波的传播。另外,牵引网的线路分支较多,使行波发生复杂的反射和折 射,不易识别,因此不宜采用单端行波法。相较而言,双端法中的 D 型行波法只需检测出初始行波到达两 端的时间,无需考虑后续的反射波和折射波的影响,故采用 D 型双端行波故障测距法进行故障定位。

D型行波测距法通过线路两端检测到的故障初 始行波分别到达的时间之差,求得故障点距两端的距 离。如图1所示。



设线路总长度为 L,故障点距首端 m 和终端 n 的
 距离分别为 D_m和 D_n, 而故障行波的初始波头以传
 图1 D型行波测距原理示意图
 播速度 v 分别向 m 端和 n 端传播,到达的时间分别为 T_m和 T_n,且有以下关系

$$\frac{D_{mF}}{v} - \frac{D_{nF}}{v} = T_m - T_n \tag{1}$$

整理可得

$$\begin{cases} D_{mF} = \frac{1}{2} \left[v(T_m - T_n) + L \right] \\ D_{nF} = \frac{1}{2} \left[v(T_n - T_m) + L \right] \end{cases}$$

$$(2)$$

D型行波法是根据故障初始行波到达两端的时间来实现故障测距的,因此需要配备时间同步装置, 把两端的时间统一到同一个基准下。文献[8]和文献[9]利用 GPS 卫星时钟同步技术进行时间同步,误差 平均不超过 1,测距绝对误差在 200~300 m,这对现场寻找故障点还是有一定的困难。而选用北斗卫星 导航系统,它具有单向和双向 2 种授时功能,根据不同的精度要求,利用授时终端,完成与北斗导航系统 之间的时间与频率同步,可提供数十纳秒级的时间同步精度,测距绝对误差在 30 m 之内,完全满足牵引 网故障测距要求。

2 全并联 AT 牵引供电系统及其仿真模型

2.1 全并联 AT 牵引供电系统

我国电气化铁道牵引供电系统采用工频 单相 27.5 kV 交流供电方式,牵引供电系统主 要有牵引变电所和牵引网两部分组成,牵引变 电所使用一主一备 2 台牵引变压器,连接两路 电源,将 110 kV 或 220 kV 电压降压为 1×27.5 kV 或 2×27.5 kV,供给牵引网。全并联 AT 供电方式牵引网的线路主要包括承力索(C)、 接触线(T)、正馈线(F)、钢轨(R)、保护线 (PW)、贯通地线(GW)以及横联线(CPW),其 电气结构如图 2 所示。

2.2 仿真模型参数

利用 ATP-EMTP 暂态仿真软件建立全 并联 AT 牵引网供电系统的线路仿真模型。





取全并联 AT 牵引网模型的供电臂长度为 20 km,将承力索、接触线、正馈线和保护线分别作为一相导线, 2 根钢轨等效为一相的两分裂导线,其中承力索每隔 200 m 与接触线电联接,保护线每隔 1 km 与上下行 钢轨完全横向联接,建立 J. Marti 线路模型。另外,贯通地线 GW 埋于地下,与其他架空导线间的互阻抗 可忽略不计,只考虑其自阻抗^[10],值为 0.305+j0.759,且每隔 1 km 与上下行钢轨横向连接。导线主要

参数与 AT 接触网导线空间分布图分别如表 1 和图 3 所示。 导线主要参数 表 1 直流电阻/($\Omega \cdot km^{-1}$) 导线名称 导线型号 等效半径/mm 承力索(C) JTMH-120 0.188 6 5.46 **接触线**(T) CTMH-150 0.184 5.39 正馈线(F) LGJ-185 9 0.154 4 钢轨(R) LGJ-150 7.63 0.245 2 保护线(PW) P60 12.79 0.135 TJ-70 0.280 贯通地线(GW) 5.35 $F_1(-4\ 000, 8\ 500)$ $5 F_2$ PW1(+3 600,8 000) PW2 $C_1(0,7500)$ C_{2} T_2 $T_1(0,6\ 300)$ 5 000 R'1(755,1 000) $R_1(-755,1\ 000)$ R_2 R'_2 5 0(0,0) ○GW1(-4 400,800) GW2O

图 3 AT 接触网导线空间分布图(单位:m)

2.3 仿真模型

以线路空载情况下的上行线路 8 km 处发生 T-R 故障的仿真模型为例,线路模型选用 ATP-EMTP 软件中的 J. Marti 线路模型,它是与频率相关的线路模型,使用的是固定频率的相模变换矩阵,在线路两端设有电压、电流探测器,所建立的模型如图 4 所示。



(1)AT 所模块用一单相可饱和变压器表示,其变比为1:1,原副边的电压有效值为27.5 kV,具体接 线如图 5 所示。

(2) 故障模块用一时间可控开关与一电阻串联,串联电阻即为接地电阻,具体接线如图 6 所示。



3 基于仿真平台行波测距

3.1 接触网线路相模变换及波速度

假设多相无损耗导线单位长度的电感和电容分别用矩阵[L]、[C]表示,则输电线路上的电流列向量 I与导线对地电压列向量 U 与距离 x 和时间 t 有以下关系方程

$$\begin{cases}
\frac{\partial U}{\partial x} = -[L] \frac{\partial I}{\partial t} \\
\frac{\partial I}{\partial x} = -[C] \frac{\partial U}{\partial t}
\end{cases}$$
(3)

对式(3)变换可得

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = [L][C] U \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = [C][L] I \end{cases}$$
(4)

设Q,S为多相输电线路电流列向量I和电压列向量U的模转换矩阵,因牵引网中 $LC \neq CL$,这种情况下,必须保证 $S = Q^{-T}$,才能消除多相导线间的电磁耦合。即有

$$\mathbf{S}^{-1}\mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{S} = \mathbf{Q}^{\mathrm{T}}\mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{Q}^{-\mathrm{T}} = (\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{L}\mathbf{Q})^{\mathrm{T}} = \mathbf{A}$$
(5)

则单位长度下的电感、电容的模量值为

$$\begin{cases} [L_m] = \mathbf{S}[L]\mathbf{S}^{-1} \\ [C_m] = \mathbf{S}[C]\mathbf{S}^{-1} \end{cases}$$
(6)

各个模量分量具有对应的各自线路上的波速度,即为

$$V_{mi} = \sqrt{\frac{1}{L_{mi}C_{mi}}} \tag{7}$$

由 Carson 理论和复数深度理论计算可以得到接触网线路电感、电容矩阵[L]、[C],因接触线和承力 索相同长度的压降相等,则可将两者合并,同理,将钢轨与保护线及贯通地线合并,即有

$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.418 & 1.058 & 1.012 \\ 1.058 & 2.308 & 0.935 \\ 1.012 & 0.935 & 2.244 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$
(8)

$$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.81 & -1.22 & -0.86 \\ -1.22 & 8.93 & -0.37 \\ -0.86 & -0.37 & 11.21 \end{bmatrix} \times 10^{-12}$$
(9)

经相模变换可以得到模量分量的波传播速度,见表2。

表 2 各模量波速度

模量分量	模量 1	模量 2	模量 3
波速度 v/(10 ⁸ (m・s ⁻¹))	2.258 1	2.993 0	2.921 4

其中, v_{m1}为地模波速, v_{m2}、v_{m3}为2个线模波速,线路的不平衡性导致了线模波速的不一致, v_{m2}为行波 经接触线-正馈线回路的传播速度, v_{m3}为行波经接触线-钢轨回路的传播速度, 在利用行波波速确定故障 位置时取线模 v_{m3}波速更为精确。

3.2 行波波头提取

设置仿真时间为 60 ms,在 20 ms时,上行线供电臂距 m 端 8 km 处发生接触网 T-R 故障,设定故障 行波采样率为 10 MHz。由仿真得到线路两端探测点测得的电压行波及波形局部放大如图 7 和图 8 所示。



图 8 n 端电压行波

小波变换具有信号奇异性检测性质和变焦性质,对信号的奇异性和突变部分非常敏感,利用小波变 换模极大值理论,可以识别出暂态行波信号的波头,并检测出波头相对应的精确时刻。将 ATP-EMTP 软 件仿真得到的电压波形转换成 Matlab 可识别的*.mat 数据流文件,利用 Matlab 编写 db3 小波变换的模 极大值程序,对两端电压行波进行模极大值定位,效果如图 9 和图 10 所示。



图 9 *m* 端小波变换的模极大值

图 10 n 端小波变换的模极大值

由图 9、图 10 可以得到正向行波波头到达两端的时刻分别为 $T_m = 24.9 \ \mu s$ 和 $T_n = 38.3 \ \mu s$,代入式(2)可 得故障点距 *m* 端距离为: $D_{mF} = \frac{1}{2} [2.993 \times (24.9 - 38.3) \times 10^{-1} + 20] = 7.994 \ 69 \ \text{km}$,误差为 5.31 m。

4 结论

利用 ATP-EMTP 软件中的 J. Marti 线路模型,将牵引网主要线路的参数与实际分布情况具体地仿 真实现,得到了真实、可信的暂态行波。在牵引网中行波故障定位的最主要问题是波速的确定和行波波 头的提取。对牵引网中的线路进行相模变换得到行波的地模、线模分量以及各分量的传播速度,对线模 分量进行小波变换,并利用模极大值定位出行波波头位置,有效地解决了波速和波头提取的问题。进而 通过 D 型行波故障测距原理求得故障距离,其结果与实际数据比较误差小于 10 m,另有北斗卫星导航系 统的时钟同步采样产生的绝对误差,则总体误差在 40 m 之内,满足故障测距要求。

参考文献

- [1]齐超. 行波故障测距在 AT 供电接触网系统中不同故障类型适用性的研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
- [2]霍中原.AT供电方式接触网故障测距误差分析及对策[J].中国铁路,2017(5):37-41.
- [3] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 4 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2014.
- [4]窦雪薇,郎兵,陈秀廷,等. 基于 PSCAD 的高速铁路全并联 AT 牵引供电系统短路故障仿真计算研究[J]. 铁道标准设 计,2018,62(2):154-159.
- [5]王喜燕,陈乐瑞.小波变换在 AT 供电牵引网故障测距中的仿真研究[J]. 郑州铁路职业技术学院学报,2014,26(3):36-37,40.
- [6]何人望,董庆伟,陈强强.复线牵引网故障测距的行波法仿真研究[J].大众科技,2011(8):125-126,112.
- [7]杨金岳.基于小波变换的 AT 供电故障测距研究[J]. 硅谷,2012(13):75-76.
- [8]谷枫,田行军,陈保平,等. 基于行波理论的 10kV 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.

[9]程云强.基于接触网的双端行波故障测距的应用[J].江西科学,2012,30(2):207-210.

[10]张桂南,刘志刚,郭晓旭,等. 高速铁路隧道及高架桥路段牵引网建模与分析[J].铁道学报,2015,37(11):16-24.

Research on Traveling Wave Fault Location of Fully Parallel AT Traction Network

He Fengke, Chen Baoping, An Xiaojing, Wang Yifei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Parallel AT traction network is an important power supply structure in China's highspeed electrified railway power supply system. Its fast and accurate fault location is of great significance to ensure the safe and smooth operation of electrified railway. In this paper, the fault location of the whole parallel AT traction network was found by measuring the arrival time of the traveling wave of the short-circuit fault and the principle of traveling wave ranging. According to the structure characteristics of full parallel AT traction network, this paper adopted D-type two-terminal traveling wave ranging method, realized synchronous sampling of data by synchronous clock of Beidou satellite navigation system, and processes data of traveling wave signals measured at both ends according to singularity detection principle of wavelet transform and modulus maximum theory, which effectively solved the problem of identification and extraction of traveling wave heads. The simulation results show that there is little difference between the results and the actual fault location, which can achieve fast and accurate line location.

Key words: full parallel AT traction network; fault location; D-type traveling wave; Beidou satellite navigation system; wavelet transform