

# 基于信息融合技术的 AT 牵引网故障测距方法的研究 及其仿真分析

陈健鑫

(广州铁路职业技术学院, 广东 广州 510430)

**摘要:** 牵引供电系统是电气化铁路的基础, 牵引供电系统由于受到机车运行的工况变化的影响, 以及一些不确定的因素, 容易出现接地故障, 又由于牵引供电系统不同于高压输电线路, 所以牵引网的故障测距有着自身的特点。根据 AT 牵引网的实际电路在 PSCAD 中构造带机车负荷的仿真模型, 对机车在牵引网上运行时的电压电流变化进行模拟, 得出牵引网在发生短路情况下的故障数据, 再利用 MATLAB 对仿真得到的数据进行阻抗法和行波法测距, 比较两者的优缺点, 最终提出将二者结合实现信息融合测距。

**关键词:** 电气化铁道; AT 牵引网; 故障测距; 行波法; 阻抗法

## Analysis of fault location in the AT traction network based on information synthesis

CHEN Jian-xin

(Guangzhou Institute of Railway Technology, Guangzhou 510430, China)

**Abstract:** Electrical railway is based on the traction supply system, this system may easily be influenced by the various work condition of running locomotive and some other uncertain factors, so some faults will happen. With the difference between the traction supply system and the high voltage transmission line, the traction network owns its speciality. This paper establishes the model in PSCAD according to the actual AT net, which contains locomotives as its load. Then it simulates this model, and fault data can be gotten when short circuit happens. This paper uses impedance method and travelling wave method to locate the fault. Comparing these two methods, each one has its advantage and disadvantage, so finally this paper combines these two methods together to locate the fault, and the accuracy is greatly improved.

**Key words:** electrical railway; AT net; fault location; travelling wave method; impedance method

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)19-0025-04

## 0 引言

电气化铁道牵引供电系统是电力系统中具有一定独立性和特殊性的供电系统。其最大的特点是它的结构和负荷取流方式。和整个电力系统一样, 电气化铁道接触网故障的精确定位一直是影响电气化铁道安全及其可靠供电的重要因素, 也是影响电气化铁道实际运行的因素之一。特别是对于我国正在兴起的高速电气化铁道, 接触网故障的精确定位对缩短抢修时间、提高运输效率将具有直接的影响。由于在输电线路方面, 对故障定位的研究已经十分成熟, 但在牵引网上的研究还不多, 因此, 本文对牵引网中的 AT 供电方式进行了故障测距的仿真分析。

## 1 AT 单线牵引网测距法

本文主要对 AT 单线牵引网的故障测距进行了阻抗法和行波法的测距分析, 这里主要介绍了 AT 单线的双差比测距法和行波法测距下 AT 模型和参数的等效分析。

### 1.1 AT 供电方式单线双差比测距原理

把 AT 牵引网等效成如图 1 所示的一个简单的阻抗电路。 $z_1$ 、 $z_2$  和  $z_3$  即为去耦后的各线路等值阻抗<sup>[1]</sup>。若考虑到 AT 的漏抗, 分析 AT 牵引网  $T-R$  间经过渡电阻  $R_g$  短路故障, 图 1 为其当量等值电路。

$E_1$ 、 $E_2$  分别为变电所和分区亭处接触网对钢轨的电压;  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  分别为接触网、钢轨和正馈线的等值当量阻抗;  $L$  为首末线路全长;  $l$  为故障点

至变电所的距离;  $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为相邻 AT 间距;  $z_g$  为 AT 漏抗。

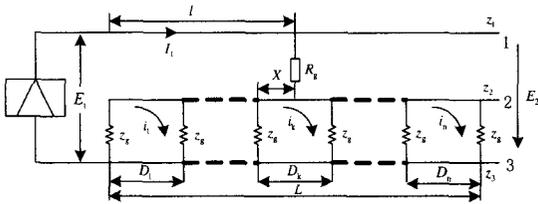


图 1 单线 AT 牵引网当量等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of the AT single line traction network

经过一番推导<sup>[2]</sup>

$$l = \frac{E_1 - E_2}{I_1 z} - K \left( \frac{I_{g1} - I_{gn}}{I_1} \right) \quad (1)$$

其中:  $z = z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3}$  为牵引网等值单位当量阻

抗;  $K = \frac{z_g z_3}{(z_2 + z_3)z}$  为一常数。

由式(1)可知,测距原理是利用两端的电压差、AT 吸上电流差与馈线电流的比值来确定故障距离,因此定义为双差比测距。测距算式简单,计算量小,不需要迭代计算,精度可靠。

### 1.2 AT 供电方式行波法测距线路模型分析

为了建立适合于行波法的测距模型,我们根据类似复线阻抗的等效方法<sup>[1]</sup>,可推导出 AT 供电方式下的等效阻抗公式为:

$$\begin{aligned} Z_J &= Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} & Z_K &= Z_{33} - \frac{Z_{23}^2}{Z_{22}} \\ Z_{KJ} &= Z_{13} - \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{22}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$ ,  $Z_{33}$  分别为接触网地回路、轨道地回路、馈线地间回路单位阻抗;  $Z_{12}$ ,  $Z_{13}$ ,  $Z_{23}$  分别为接触网与轨道、接触网与馈线、馈线与轨道间的单位互阻抗。

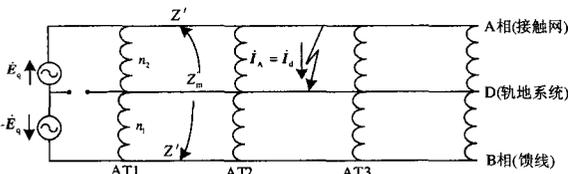


图 2 具有 AT 的单线牵引网故障

Fig.2 Fault of the AT single line traction network

当我们把接触网(J)看成两相电路的 A 相,馈线(K)看成 B 相,轨道大地系统(G 和 D)看成地线 D,并把电势源  $2E_q$  看成两个电势相等的电源的串联,其连接点看成不与地线相连的零电位 0 时,就可以把图 1 表示成图 2 的等效对称两相电路的形式,从而可以应用两相对称分量法计算牵引网短路时的阻抗<sup>[3]</sup>。

从图 2 可见,  $\dot{E}_A = \dot{E}_q$ 、 $\dot{E}_B = -\dot{E}_q$ , 因此按两相对称分量法公式得到:

$$\begin{cases} \dot{E}_{A0} = \frac{1}{2}(\dot{E}_A + \dot{E}_B) = \frac{1}{2}(\dot{E}_q - \dot{E}_q) = 0 \\ \dot{E}_{A1} = \frac{1}{2}(\dot{E}_A - \dot{E}_B) = \frac{1}{2}(\dot{E}_q + \dot{E}_q) = \dot{E}_q \end{cases} \quad (3)$$

可见作用在复线 AT 牵引网两相 A、B 的电源电势是 1 序电势。若接触网中任意点 d 发生对地短路时,短路相(A)将有短路电流流通。由于是不对称短路,按两相对称分量法对短路电流进行分解时,与简单牵引网的复线情况相同,线路中将有零序和 1 序电流流通。线路对序电流呈现的阻抗与复线简单牵引网的计算相同。所不同的是,牵引网中出现了横向连接元件 AT,下面讨论横向元件 AT 的序阻抗。为简化计算,规定 AT 为理想变压器,其激磁阻抗为无穷大,漏抗为零。

图 3 (a) 和 (b) 表示了零序电流和 1 序电流在 AT 中的流通情况。零序电流在 AT 中流通时,相当于变压器 AT 的短路状态,AT 呈现的短路阻抗(漏抗)等于零。1 序电流在 AT 中相当于激磁电流,它所呈现的激磁阻抗可认为是无穷大。因此 AT 的零序阻抗为零,1 序阻抗为无穷大,其等效电路分别表示为如图 (c) 和 (d) 所示。

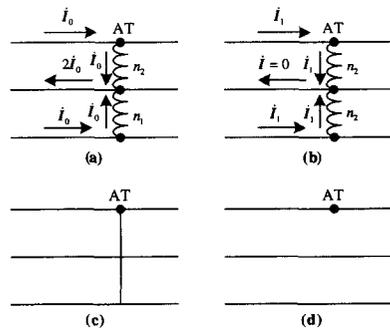


图 3 接触网短路时 AT 的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the short circuit in AT net

在 AT 牵引网中,根据零序和 1 序电流在 AT 中流通的特性,由于 0 序电流在 AT 中流通为短路,不能选用该电流分量进行测距,故选用 1 序电流分量

进行故障测距，通过检测第一个行波到达的时间和第二个行波波头到达的时间，计算出时间差，将该时间差与 1 序行波的波速相乘，得到测距距离。该方法属于单端行波法测距方法。

## 2 仿真模型的建立

### 2.1 机车模型的建立

目前我国单相交流电力机车采用了直流串励激电动机、工频单相整流子电动机及无整流子交流电动机，其中最具有代表而且最普通的为直流串励激电动机<sup>[4]</sup>。建立其仿真图形如图 4。

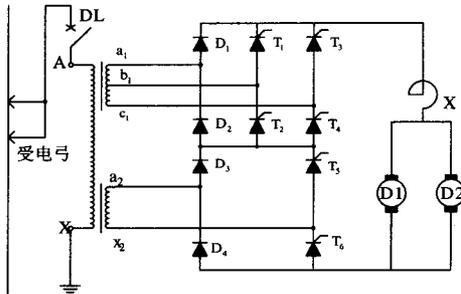


图4 牵引电力机车直流串励激电动机原理图

Fig.4 Principle diagram of direct current

### 2.2 AT牵引网模型建立与仿真分析

表 1 AT 供电行波法测距结果

Tab.1 Result of travelling wave method in AT

实际距离/km	$R_t = 0 \Omega$		$R_t = 10 \Omega$		$R_t = 100 \Omega$	
	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)
0.5	无法测出	错误	无法测出	错误	无法测出	错误
1	0.9454	0.1820	0.9454	0.1820	0.9454	0.1820
2	1.9636	0.1213	1.9636	0.1213	1.9636	0.1213
5	4.9453	0.1823	4.9453	0.1823	4.9453	0.1823
10	10.1089	0.3630	10.1089	0.3630	10.1089	0.3630
15	14.9815	0.0617	14.9815	0.0617	14.9815	0.0617
20	10.0361	*0.1203	10.0361	*0.1203	10.0361	*0.1203
25	4.8726	*0.4247	4.8726	*0.4247	4.8726	*0.4247
29	1.0909	*0.3030	1.0909	*0.3030	1.0909	*0.3030

表中带\*号的数据表示为经过计算（将 30-测距距离）处理后的数据精度，其实际为到对端母线的距离。

从上述仿真结果，我们可以看出，在使用阻抗法进行测距时，由于有机车负荷的存在，过渡电阻的大小将始终会影响测距的精度。虽然采用了消除过渡电阻的算法，但由于这些算法的设计都是基于空载网络情况下推导出来的，所以都无法消除机车负荷的影响。虽然我们可以通过定位机车位置，测量机车电流分量来进行测距分析，但是考虑到在实际应用中机车为动负载，位置有一定的不确定性，实际应用过程中有一定的困难，且不利于实现单端测距的快速性和灵活性，所以考虑使用单端行波法来结合测距。从单端行波法仿真分析的结果（表 1）

AT 牵引网仿真示意图如图 5 所示，设定机车位于离变电所测量端 20 km 处，整个牵引网供电线路总长为 30 km，采样频率为 2 MHz，经线路参数变换计算： $\omega = 50 \text{ Hz}$ ，正序电阻  $R_1 = 0.174e-3 \Omega/\text{m}$ ，正序感抗值  $X_{L1} = 0.4082e-3 \Omega/\text{m}$ ，正序容抗值  $X_{C1} = 350 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$ ，零序电阻  $R_0 = 0.2834e-3 \Omega/\text{m}$ ，零序感抗值  $X_{L0} = 0.6908e-3 \Omega/\text{m}$ ，零序容抗值  $X_{C0} = 400 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$ 。按照 1 序分量来进行电流行波法单端测距，得到结果如表 1 所示。在使用单线双差比测距算法进行阻抗法测距后得到如表 2 所示的仿真结果。表中：

$$\text{测距误差} = \frac{|\text{测距距离} - \text{实际距离}|}{\text{线路总长}} \times 100\%$$

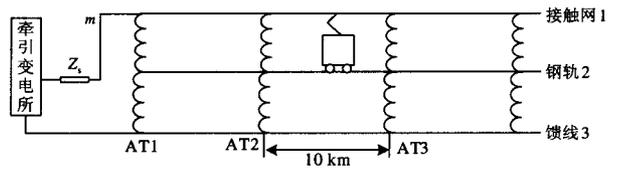


图5 AT供电仿真模型示意图

Fig.5 Sketch map of AT supply and series excitation motor in locomotive

中看到，行波法测距精度比阻抗法要高，且不受机车负荷和过渡电阻的影响。但由于是单端法测距，在进行行波波头识别时，易受到对端母线的反射波干扰，当故障点离监测点的距离大于等于 20 km 时，行波法受到对端母线干扰时测得的是故障点到对端母线的距离值，而且，由于受到采样频率的限制，当故障发生在近端时，行波法将无法进行测距。而阻抗法在过渡电阻较大的情况下，误差虽然较大，但是不会象行波法那样出现偏差很大，所以可以先用阻抗法测得一个距离的范围，再用行波法来精确定位，根据阻抗法测得的值来分析行波法测得的值

是故障点到对端母线的距离还是到本端母线监测点的距离。经过 Matlab 中编写 M 文件进行判断处理：先进行阻抗法测距，再进行行波法测距，比较两者的测距值，若两值之间差距大于 1 km，则采用 30-

行波法测距距离作为故障距离。若小于 1 km，则直接使用行波法的测距结果，若行波无法识别，则直接使用阻抗法测距结果。我们得到表 3 数据如下。

表 2 AT 供电阻抗法测距结果

Tab.2 Result of impedance method in AT

实际距离/km	$R_f = 0 \Omega$		$R_f = 10 \Omega$		$R_f = 100 \Omega$	
	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)
0.5	0.5153	0.0510	0.6493	0.4977	3.1869	8.9563
1	1.0302	0.1007	1.1258	0.4193	3.5200	8.4000
2	2.0594	0.1980	2.1024	0.3413	4.2778	7.5927
5	5.1449	0.4830	5.1712	0.5707	6.4838	4.9460
10	10.2912	0.9707	10.4129	1.3763	10.6360	2.1200
15	15.3011	1.0037	15.2088	0.6960	14.7156	0.9480
20	20.3260	1.0867	20.3287	1.0957	18.0425	6.5250
25	25.4433	1.4777	25.6086	2.0287	21.9375	10.2083
29	29.5521	1.8403	29.6653	2.2177	25.0537	13.1543

表 3 AT 供电阻抗法和行波法综合测距结果

Tab.3 Result of synthesis method in AT

实际距离/km	$R_f = 0 \Omega$		$R_f = 10 \Omega$		$R_f = 100 \Omega$	
	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)	测距距离/km	测距误差/(%)
0.5	0.5153	0.0510	0.6493	0.4977	3.1869	8.9563
1	0.9454	0.1820	0.9454	0.1820	0.9454	0.1820
2	1.9636	0.1213	1.9636	0.1213	1.9636	0.1213
5	4.9453	0.1823	4.9453	0.1823	4.9453	0.1823
10	10.1089	0.3630	10.1089	0.3630	10.1089	0.3630
15	14.9815	0.0617	14.9815	0.0617	14.9815	0.0617
20	19.9639	0.1203	19.9639	0.1203	19.9639	0.1203
25	25.1274	0.4247	25.1274	0.4247	25.1274	0.4247
29	28.9091	0.3030	28.9091	0.3030	28.9091	0.3030

综合上述情况，我们可以看到，阻抗法和行波法可以进行优缺点的互补，在实际装置中同时采用行波法和阻抗法进行测距，再进行测距结果的对比分析，可以得出十分精确的数据，实现可靠精确的定位，从而达到良好的测距效果。针对 AT 牵引网的仿真结果，将阻抗法和行波法的测距数据比较分析后我们可以得到表 3 中的数据。可以看到，综合测距结果的准确性和精度都有了很大的提高，一般不会出现很大的误差，总体测距效果较好。

### 3 结束语

本文主要针对 AT 供电方式下的故障等效网络进行了仿真分析，大量的仿真数据表明，在牵引网的实际测距中，我们可以将阻抗法和行波法结合起

来进行信息融合测距，该方法实用可靠<sup>[5,6]</sup>，测距精度较高，在目前的电气化铁道供电系统中有着良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
CAO Jian-you. Electrified Railway Power System[M]. Beijing: China Railway Press, 1983.
- [2] 张秀峰. AT牵引网故障测距原理研究与改进[J]. 铁道建筑技术, 2003, (6): 48-50.  
ZHANG Xiu-feng. A Research and Improvement of Distance-Measuring Principle for Failure of at Traction Electric Network[J]. Railway Construction Technology, 2003, (6): 48-50.

(下转第 57 页 continued on page 57)

- Electric Power Press, 1991.
- [2] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
YUAN Ji-xiu. Power System Security and Stability Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [4] Tam Kwa-Sur. A Comparison of Alternatives to Enhance the Utilization of Transmission Lines[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 41(2): 133-140.
- [5] Ou Yan, Singh Chanan. Improvement of Total Transfer Capability Using TCSC and SVC[A]. In: Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE[C]. 2001. 944-948.
- [6] Tso S K, Liang J, Zeng Q Y, et al. Coordination of TCSC and SVC for Stability Improvement of Power Systems[A]. In: Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. 1997. 371-376.
- [7] Lei X, Li X, Povh D. A Nonlinear Control for Coordinating TCSC and Generator Excitation to Enhance the Transient Stability of Long Transmission Systems[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 59(2): 103-109.
- [8] Haque M H, Best location of SVC to Improve First Swing Stability Limit of a Power System[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(10): 1402-1409.
- [9] 汤涌, 卜广全. 中国电科院 PSASP 电力系统分析软件包用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.  
TANG Yong, BU Guang-quan. PSASP Power System Analysis Package User's Manual[Z]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2000.

收稿日期: 2007-12-11; 修回日期: 2008-01-22

作者简介:

王渝红(1971-), 女, 博士生, 高级工程师, 研究领域为电力系统分析、电力系统规划、高压直流输电; E-mail: hansia@vip.sina.com

赵丽平(1973-), 女, 博士, 副教授, 研究领域为电力系统分析、电能质量及故障诊断;

李群湛(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统分析, 牵引供电综合补偿技术及理论, 电能质量与控制。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- [3] 贺威俊, 简克良. 电气化铁道供变电工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.  
HE Wei-jun, JIAN Ke-liang. Power Supply and Power Convers of Electric Railway[M]. Beijing: China Railway Press, 1982.
- [4] 黄永宁, 李建华, 赵娟. 基于 MATLAB/SIMULINK 的 SS3B 型电力机车仿真模型[J]. 机车电传动, 2002, (6): 25-26.  
HUANG Yong-ning, LI Jian-hua, ZHAO Juan. Simulation Model of SS3B Electric Locomotive Based on Matlab/Simulink[J]. Electric Drive for Locomotives, 2002, (6): 25-26.
- [5] 焦在滨, 高仕斌. 行波法在电气化铁道牵引网故障测距中应用的可行性研究[J]. 继电器, 2003, 31(7): 33-36.
- JIAO Zai-bin, GAO Shi-bin. Study on the Feasibility of Using Traveling Wave in the Fault Location in the Overhead Contact Network of Electrified Railway Traction[J]. Relay, 2003, 31(7): 33-36.
- [6] 冉旭, 廖培金, 陈平, 等. 行波故障测距法在电气化铁道牵引网中的应用研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 35-38.  
RAN Xu, LIAO Pei-jin, CHEN Ping, et al. Study on Traveling Wave Fault Location Applied to Traction Line of Electric Railway[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 35-38.

收稿日期: 2008-01-01; 修回日期: 2008-05-27

作者简介:

陈健鑫(1978-), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向为铁道供电技术。E-mail: jxch333@126.com

(上接第 32 页 continued from page 32)

- [7] 徐衍会, 贺仁睦, 孔祥云, 等. 调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响[J]. 现代电力, 2006, 23(16).  
XU Yan-hui, HE Ren-mu, KONG Xiang-yun, et al. The Effect of Overspeed Protection Control on Power System Stability[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(16).
- 作者简介:
- 周川梅(1978-), 女, 硕士, 工程师, 从事电网计算分析和无功电压管理工作; E-mail: zhoucm519@163.com
- 孙斌(1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网运行与控制工作。

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-01-14