

文章编号: 1674—8247(2023)05—0023—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.05.005

# AT供电方式下直接供电分支接触网的故障测距方案

洪彬<sup>1</sup> 林国松<sup>1</sup> 吴泽方<sup>1</sup> 杜欧洋<sup>1</sup> 朱志龙<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中国铁路广州局集团有限公司, 广州 518001)

**摘要:**在我国电气化铁路的AT供电方式中,直接供电分支线路在供电区段内进行“T”接。然而,当这些分支直供线路发生故障时,既有AT测距系统无法识别故障区段并精确定位。通过分析AT供电方式带直接供电分支线路的电路模型,发生T-R短路故障时的电流分布、吸上电流比特征以及在牵引变电所测量的短路阻抗,提出一种吸上电流比法和电抗法的综合方案,实现了AT供电方式下直接供电分支接触网的故障测距。该方案通过数值仿真验证了其可行性和准确性,并以某高速铁路线路的历史故障报告验证了基于分支点电流比识别故障支线方法的合理性。

**关键词:**分支接触网; AT供电; 故障测距; 吸上电流比法; 电抗法

**中图分类号:** U223.5+12

**文献标志码:** A

## Fault Location Scheme of Direct Feeding Branch Overhead Contact Lines in Auto-transformer Feeding System

HONG Bin<sup>1</sup> LIN Guosong<sup>1</sup> WU Zefang<sup>1</sup> DU Ouyang<sup>1</sup> ZHU Zhilong<sup>2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou 518001, China)

**Abstract:** For China's electrified railways, there is a situation that the traction network of auto-transformer feeding system forks into the direct feeding branch line in the power supply section with a “T” junction. When the branch direct feeding line fails, the existing auto-transformer ranging system cannot identify the faulty section and accurately locate it. By analyzing the circuit model of auto-transformer feeding system with direct feeding branch line, current distribution when T-R short circuit fault occurs, characteristics of boosting current ratio and short circuit impedance measured in traction substations, this paper proposes a comprehensive method to realize fault location of direct feeding branch overhead contact lines under auto-transformer feeding system by using boosting current ratio method and reactance method. Numerical simulation was used to verify the feasibility and accuracy of this scheme. The historical fault report of a high-speed railway line verifies the rationality of the method for identifying faulty branch lines based on the current ratio at branch points.

**Key words:** branch overhead contact lines; auto-transformer feeding system; fault location; boosting current ratio method; reactance method

AT(Auto Transformer)供电方式的供电系统电压稳定、供电能力强,在我国重载铁路和高速铁路中得

到广泛应用<sup>[1]</sup>。接触网不仅有电连接还有机械连接,是牵引供电系统较为薄弱的环节,接触网的稳定影响

收稿日期:2022-06-06

作者简介:洪彬(1993-),男,硕士研究生。

基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0405)

引文格式:洪彬,林国松,吴泽方,等. AT供电方式下直接供电分支接触网的故障测距方案[J]. 高速铁路技术,2023,14(5):23-28.

HONG Bin, LIN Guosong, WU Zefang, et al. Fault Location Scheme of Direct Feeding Branch Overhead Contact Lines in Auto-transformer Feeding System [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5):23-28.

着整条线路的运行。当故障发生后,接触网故障测距是快速发现并排除故障的重要技术保障。

在一些特殊供电区段(如正线间的联络线、变电所上网点、站场和电力机车整备线等),为了节约建设成本或方便维护,通常在邻近的正线供电区间上“T”接出分支直接供电线路,以获取电能。随着AT供电方式在我国的广泛应用,以AT供电方式牵引网“T”接出直接供电分支线路(以下简称“支线”)的牵引网结构逐渐增多。由于在支线上并未安装断路器及保护设备,当分支线路发生故障时,既有故障测距装置无法提供准确的故障距离,进而导致故障排除和供电恢复延缓,影响铁路的运输速度和效率。

文献[2-4]说明了AT供电方式下的故障测距原理、方法及其适用范围;文献[5-6]介绍了复线直接供电方式下的故障测距方法和应用效果。然而,既有的故障测距装置或系统无法实现对AT牵引网带直供支线的故障测距。文献[7]推导了AT加直供越区供电方式下的阻抗分布;文献[8]介绍了全并联AT越区供电方式下不同区段的故障测距方法;文献[9-11]介绍了站场等含有众多分支线路的接触网,通过在分支点处安装电流测量装置,检测电流突变增量,从而判断支线故障。然而,该装置只有对同一股道多组安装,才可实现对分支线路的故障区分。文献[12]利用小波神经网络拟合行波特征值与故障之间的关系,实现故障测距;文献[13]采用行波法对AT供电方式下的多分支接触网进行故障测距,通过在分支线路正馈线增设流互,借助电流方向来区分正线以及支线故障。

本文以AT供电方式下直接供电分支牵引网为研究对象,分析了传统吸上电流比和电抗距离表法在应用中的局限性。在不增加硬件设备的前提下,提出了一种综合吸上电流和电抗法的故障测距方案,实现了直接供电分支接触网的故障测距功能。

## 1 AT供电方式的直接供电分支接触网及其电路分析

### 1.1 AT供电方式下直接供电分支接触网

典型的单线AT供电方式和直接供电分支接触网如图1所示,SS、ATP和SP分别为牵引变电所、AT所和分区所,牵引变电所至AT所区段为第AT1段,AT所至分区所为AT2段。AT1段存在分支点T0,从AT牵引网的接触网分支点T0到末端的T1、轨道分支点R0到末端R1的线路为支线。E是牵引变电所等效电源,

T、R和F分别为接触网、钢轨和正馈线。

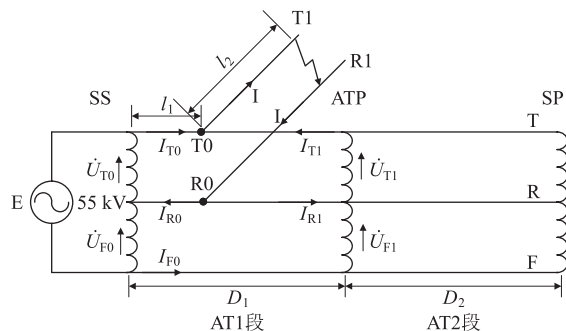


图1 AT供电方式下直接供电分支牵引网图

AT供电方式牵引网故障分T-R型、F-R型和T-F型故障,直接供电方式牵引网没有F线,当直供支线接触网发生故障时,只存在T-R型短路故障,且支线牵引网电流必然全部流经分支点。由图1列出电压回路方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_{T0} - \dot{U}_{T1} = \dot{I}_{T0}Z_{T1} - \dot{I}_{T1}Z_T(D_1 - l_1) - \dot{I}_{R0}Z_{TR}l_1 \\ \quad + \dot{I}_{R1}Z_{TR}(D_1 - l_1) - \dot{I}_{F0}Z_{TF}D_1 + \dot{I}_{R0}Z_Rl_1 \\ \quad - \dot{I}_{R1}Z_R(D_1 - l_1) + \dot{I}_{T1}Z_{TR}(D_1 - l_1) \\ \quad - \dot{I}_{T0}Z_{TR}l_1 - \dot{I}_{F0}Z_{FT}D_1 \\ \dot{U}_{F0} - \dot{U}_{F1} = -\dot{I}_{R0}Z_Rl_1 + \dot{I}_{R1}Z_R(D_1 - l_1) + \dot{I}_{T0}Z_{TR}l_1 \\ \quad - \dot{I}_{T1}Z_{TR}(D_1 - l_1) + \dot{I}_{F0}Z_{FR}D_1 - \dot{I}_{F0}Z_F D_1 \\ \quad - \dot{I}_{T0}Z_{TF}l_1 + \dot{I}_{T1}Z_{TF}(D_1 - l_1) + \dot{I}_{R0}Z_{FR}l_1 \\ \quad - \dot{I}_{R1}Z_{FR}(D_1 - l_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: D1——AT1段线路长度(km);

D2——AT2段线路长度(km);

$l_1$ ——支线上网点到牵引变电所的距离(km);

$l_2$ ——支线上的短路故障到分支上网点的距离(km);

$\dot{I}_{T0}$ 、 $\dot{I}_{F0}$ ——在牵引变电所测量到的T、F馈线电流;

$\dot{U}_{T0}$ 、 $\dot{U}_{F0}$ ——牵引变电所T线、F线对地电压;

$\dot{U}_{T1}$ 、 $\dot{U}_{F1}$ ——AT所T线、F线对地电压;

$Z_T$ ——AT线路接触网单位自阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_R$ ——AT线路钢轨单位自阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_F$ ——AT线路正馈线单位自阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{TF}$ ——AT线路接触网与正馈线间的单位互阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{FR}$ ——AT线路钢轨和正馈线间的单位互阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{TR}$ ——AT线路接触网和钢轨间的单位互阻

抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{\text{Tl}}$ ——支线接触网单位自阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{\text{Rl}}$ ——支线钢轨单位自阻抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_{\text{TlRl}}$ ——支线接触网和钢轨间的单位互阻抗( $\Omega/\text{km}$ )。

根据基尔霍夫电流定律,得:

$$\begin{cases} \dot{I}_{\text{T0}} + \dot{I}_{\text{Tl}} = \dot{I} \\ \dot{I}_{\text{R0}} - \dot{I}_{\text{F0}} = \dot{I}_{\text{T0}} \\ \dot{I}_{\text{Tl}} - \dot{I}_{\text{F0}} = \dot{I}_{\text{Rl}} \\ \dot{I}_{\text{Tl}} + \dot{I}_{\text{F0}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{I}_{\text{Tl}}$ ——变电所流向分支点 T0 的 T 线电流;

$\dot{I}_{\text{R0}}$ ——变电所流向分支点 T0 的钢轨电流;

$\dot{I}_{\text{Rl}}$ ——分支点 T0 流向正线钢轨的电流。

由自耦变压器特性可得  $\dot{U}_{\text{T0}} - \dot{U}_{\text{Tl}} = \dot{U}_{\text{F0}} - \dot{U}_{\text{Fl}}$ , 结合式(1)、式(2)可解得:

$$\begin{cases} \dot{I}_{\text{T0}} = (1 - \frac{l_1}{2D_1})\dot{I} \\ \dot{I}_{\text{Tl}} = \dot{I}_{\text{F0}} = \frac{l_1}{2D_1}\dot{I} \\ \dot{I}_{\text{R0}} = (1 - \frac{l_1}{D_1})\dot{I} \\ \dot{I}_{\text{Rl}} = \frac{l_1}{D_1}\dot{I} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)以及吸上电流的定义,牵引变电所和 AT 所的吸上电流  $\dot{I}_{\text{AT0}}$  与  $\dot{I}_{\text{ATl}}$  可表达为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{\text{AT0}} = \dot{I}_{\text{T0}} + \dot{I}_{\text{F0}} = (1 - \frac{l_1}{D_1})\dot{I} \\ \dot{I}_{\text{ATl}} = \dot{I}_{\text{Tl}} + (-\dot{I}_{\text{F0}}) = \frac{l_1}{D_1}\dot{I} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{\text{AT0}}$ ——变电所的吸上电流;

$\dot{I}_{\text{ATl}}$ ——AT 所的吸上电流。

根据式(4)推导出分支上网点处吸上电流比为:

$$Q_{\text{x1}} = \left| \frac{\dot{I}_{\text{ATl}}}{\dot{I}_{\text{AT0}} + \dot{I}_{\text{ATl}}} \right| = \frac{l_1}{D_1} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{x1}}$ ——分支上网点的吸上电流比。

随着故障点在 AT1 段距离的变化,得到该 AT 段的电流比距离关系<sup>[14]</sup>:

$$Q = \frac{l}{D} \quad (6)$$

式中: $D$ ——故障 AT 段长度(km);

$l$ ——远离牵引变电所方向上,距故障 AT 段始端的距离(km)。

变电所测得的吸上电流与故障距离呈线性关系<sup>[15]</sup>。

## 1.2 直接供电分支牵引网短路阻抗计算

牵引变电所馈线阻抗计算<sup>[16]</sup>公式为:

$$Z = \frac{\dot{U}_{\text{T0}}}{\dot{I}_{\text{T0}} - \dot{I}_{\text{F0}}} \quad (7)$$

根据式(7)可计算出 AT1 段分支上网点处发生 T-R 故障时,牵引变电所测得的短路阻抗为:

$$Z_{\text{AT(II)}} = (1 - \frac{l_1^2}{2D_1})(Z_{\text{T}} - Z_{\text{TR}}) + (1 - \frac{l_1^2}{D_1})(Z_{\text{R}} - Z_{\text{TR}}) + \frac{l_1^2}{D_1}(Z_{\text{FR}} - Z_{\text{TF}}) + R_{\text{g}} \quad (8)$$

式中: $Z_{\text{AT(II)}}$ ——分支上网点发生短路故障的短路阻抗;

$R_{\text{g}}$ ——短路点接触电阻。

当支线上发生短路故障时,在牵引变电所测得的短路阻抗为:

$$Z_{\text{D}} = Z_{\text{AT(II)}} + [l_2(Z_{\text{Tl}} + Z_{\text{Rl}} - 2Z_{\text{TlRl}}) + R_{\text{g}}] \quad (9)$$

式中: $Z_{\text{D}}$ ——支线发生短路故障的短路阻抗。

根据式(8)可得到发生在分支上网点处的短路故障电抗:

$$X_{\text{AT(II)}} = (1 - \frac{l_1^2}{2D_1})(X_{\text{T}} - X_{\text{TR}}) + (1 - \frac{l_1^2}{D_1})(X_{\text{R}} - X_{\text{TR}}) + \frac{l_1^2}{D_1}(X_{\text{FR}} - X_{\text{TF}}) \quad (10)$$

式中: $X_{\text{AT(II)}}$ ——支线上网点发生短路故障的短路电抗。

根据式(9)可得到故障发生在支线时的短路电抗:

$$X_{\text{D}} = X_{\text{AT(x1)}} + [l_2(X_{\text{Tl}} + X_{\text{Rl}} - 2X_{\text{TlRl}})] \quad (11)$$

式中: $X_{\text{D}}$ ——支线发生短路故障的短路电抗;

$X_{\text{AT(x1)}}$ ——变电所到支线上网点的电抗;

$X_{\text{Tl}}$ ——T 线的自电抗;

$X_{\text{Rl}}$ ——钢轨的自电抗;

$X_{\text{TlRl}}$ ——T 线和钢轨路的互电抗。

根据式(10)、式(11)可以得出 AT 线路发生 T-R 短路故障以及当支线短路故障时电抗随距离的曲线,如图 2 所示。当 AT 供电方式下发生 T-R 短路故障时,短路电抗和距离呈非线性关系。当支线发生短路故障时,支线的短路电抗和距离呈线性增长关系,符合直供线路的短路阻抗特性。

## 2 AT 供电方式下直供分支接触网故障测距方法

### 2.1 AT 供电方式下直接供电分支接触网故障测距的局限性

当单线 AT 供电方式牵引网发生 T-R、F-R 型故障,

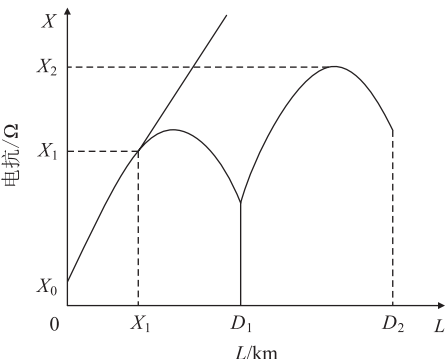


图 2 短路电抗与故障距离曲线图

通常采用吸上电流比法;对于 T-F 型故障,则采用电抗距离表法。吸上电流比会受站场、大地泄漏、AT 漏抗等因素的影响,因此在程序设计中不采用整个 AT 段直线测距公式,而采用分段线性法。直接供电方式下,单线时采用电抗法(电抗距离表),复线时采用上下行电流比法。

根据式(5),当支线上任一点发生短路故障时,牵引变电所测得的吸上电流比为固定值,且吸上电流比值的大小与在 AT1 段分支上网点处发生 TR 短路故障时相等。采用吸上电流比法只能将故障大致定位到分支上网点附近,无法对支线短路故障进行精确定位。

由图 2 可知,若采用电抗法测距原理对 AT 供电带支线接触网进行测距,会导致线路中出现同一电抗值对应多个故障距离的情况,故无法对 AT 供电正线和直接供电支线上发生短路故障进行区分。

2.2 AT 正线与直供支线的判别

根据式(5),当支线发生短路故障时,与正线在分支上网点处发生 T-R 型短路故障相比,在牵引变电所处测得的吸上电流比值相同,从而故障发生在支线的判据为:

ΔQ = |Q - Q<sub>set</sub>| ≤ ΔQ<sub>set</sub> (12)

- 式中: ΔQ——吸上电流比值差;  
Q——牵引变电所在故障发生在 AT1 段时的吸上电流比;  
Q<sub>set</sub>——按 AT1 段分支点接触网故障时的吸上电流比的整定值;  
ΔQ<sub>set</sub>——比值差整定值。

支线接触网沿线各处故障,按避免在牵引变电所得到的吸上电流比因系统误差引起的最大波动值来整定。也就是说,满足式(12)的故障点将被认为故障发生在支线上,这样会导致当故障发生在分支点附近的正线上时,误判为故障发生在支线上。在此,假设 ΔQ<sub>set</sub> 取 0.015,该值的意义为如果 AT 段长 15 km,吸上电

流比的范围为 0~1,比值差为 0.015 导致正线牵引网故障被误判为支线故障的测距误差约为 15 000 m × 0.015 = 225 m,这完全满足企业标准对故障测距误差小于 500 m 的精度要求。在实际应用中,可以在支线进行多点短路试验或机车负荷试验<sup>[17]</sup>,以确定该电流比偏差整定值。

2.3 直供支线故障测距

支线故障时,在牵引变电所测得的短路电抗与故障距离呈线性增长的一一对应关系,此时可以采用电抗-距离查表法进行故障测距。AT 供电方式下的直接供电线路故障测距方法流程如图 3 所示。

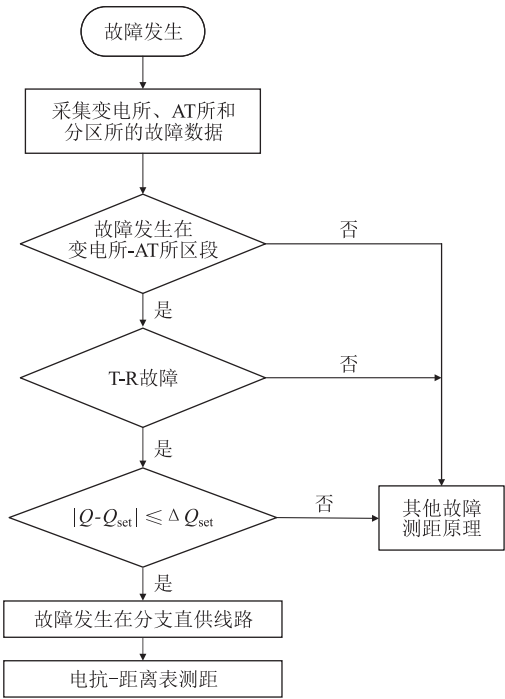


图 3 AT 供电方式下直供支线故障测距流程图

无论采用单线或复线全并联 AT 供电方式,每个供电段包含几个 AT 段,在含有直接供电分支线路的 AT 段,可采用类似的测距方法。

3 仿真验证

搭建单线 AT 供电方式带直供支线的仿真模型,模型参数如表 1 所示。其中,牵引网 AT1 段长 15 km,AT2 段长 10 km,直供支线长 6 km,在 AT1 段距牵引变电所 10 km 处 T 接上网。

AT 线路牵引网单位阻抗矩阵为:

Z = [ 0.145 + j0.55    0.05 + j0.314    0.05 + j0.413 ;  
0.05 + j0.314    0.084 + j0.407    0.05 + j0.314 ;  
0.05 + j0.413    0.05 + j0.314    0.145 + j0.734 ] (13)



表 1 AT 供电方式下带直供支线仿真模型参数表		
电源参数	三相线电压/kV	220
	频率/Hz	50
	短路容量/MVA	1 000
牵引变压器	接线型式	V/X
	变比	220/27.5/27.5
	容量/MVA	25
自耦变压器	容量/MVA	12.5
	漏抗/ $\Omega$	$0.05+j0.15$

直供支线 T 线单位自阻抗、R 线单位自阻抗和接触网 – 钢轨间的单位互阻抗分别为: $0.145+j0.55$ 、 $0.084+j0.407$ 、 $0.05+j0.314$ 。

仿真得到正线和直供支线发生 T-R 故障时吸上电流比与距离的关系如图 4 所示。由图 4 可知,正线牵引网上发生短路故障时的吸上电流比与距离呈线性增长的一一对应关系,支线(含分支点)上任意一点发生短路故障时,牵引变电所测得的吸上电流比值为固定不变的 0.591。

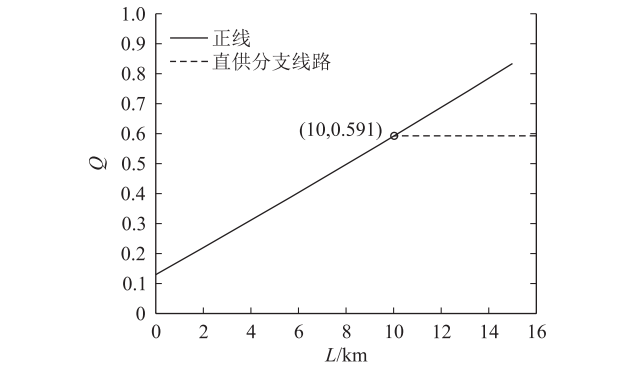


图 4 正线和支线 T-R 故障时吸上电流比 – 距离关系曲线图

直供分支上网点处发生短路故障时的吸上电流比值为 0.591,在其  $\pm 0.015$  范围内正线上的测距结果如表 2 所示。按式(12)的测距最大误差为 322 m,满足故障测距的精度要求。

表 2 AT 供电带直供支线测距误差表		
吸上电流比	故障距离/km	误差/m
$0.591-0.015$	9.678	322
$0.591+0.015$	10.303	303

正线和直供支线发生 T-R 故障时变电所测量的短路电抗 – 距离曲线如图 5 所示,短路电抗与距离呈线性增长关系,支线上的起始电抗与正线分支上网点处 T-R 短路电抗相同,可采用电抗法测距原理对直供支线进行故障测距。

仿真结果表明,首先可以通过固定的电流比整定值确定故障发生在分支点附近或支线上,再根据支线

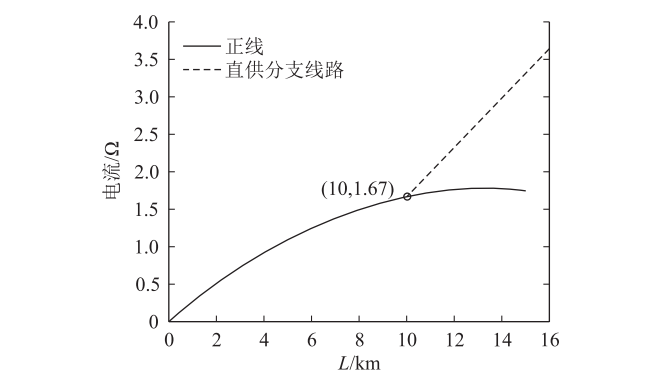


图 5 正线和支线 T-R 故障时短路电抗 – 距离关系曲线图

的短路电抗 – 距离关系计算实际故障距离。

#### 4 现场实例验证

汉龙变电所至李朗分区所正线采用复线 AT 供电方式,李朗线路所至平湖南支线采用直接供电方式。杭深铁路汉龙变电所至李朗分区所供电示意如图 6 所示,具体线路距离参数如表 3 所示。

表 3 汉龙变电所至李朗分区所线路距离参数表		
馈线号	供电线/m	公里标/km
213	153	K 1 594 + 332
214	153	K 1 594 + 332
241	175	K 1 606 + 906
242	175	K 1 606 + 906
下行分支线 L1	—	K 1 605 + 806 – K 1 608 + 104
上行分支线 L2	—	K 1 605 + 806 – K 1 607 + 230

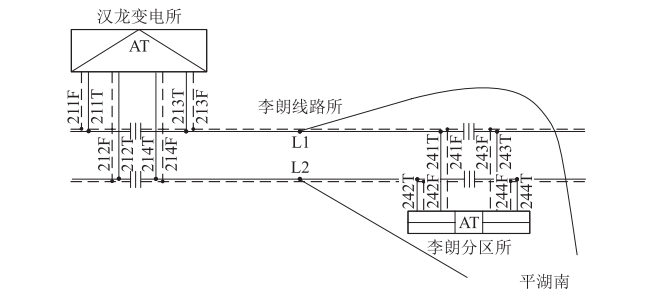


图 6 汉龙变电所至李朗分区所供电示意图

以 213 下行馈线为例,2014—2021 年,下行支线 L1 发生短路故障引起牵引变电所跳闸共计 6 起,故障数据如表 4 所示。

由表 4 可知,故障测距误差远大于企业标准对故障测距精度的要求,这增加了故障排查和线路恢复供电的难度与耗时。

在牵引变电所测得  $Q$  值在很小的范围变动,因此可以取 $(0.696+0.680)/2=0.688$  为分支点及支线故障的基准值,以 0.01 为  $\Delta Q_{\text{set}}$  整定值。由表 3 可知,

表4 支线L1短路故障数据表

事件	故障类型	测距故标 /km	实际故标 /km	误差 /m	Q值
1	213T	K 1 604 + 565	K 1 606 + 630	2 065	0.680
2	213T	K 1 604 + 475	K 1 606 + 597	2 122	0.680
3	213T	K 1 604 + 731	K 1 607 + 397	2 666	0.696
4	213T	K 1 604 + 673	K 1 607 + 764	3 027	0.693
5	213T	K 1 605 + 171	K 1 607 + 821	2 650	0.694
6	213T	K 1 605 + 301	K 1 607 + 821	2 520	0.695

直供支线分支点所在AT段正线长12.9 km,根据最大 $\Delta Q$ 值造成的最大测距误差为 $12.9 \times 0.01 = 129\text{ m}$ ,这满足企业标准对故障测距精度的要求,也验证了式(5)推导的正确性和对式(12)中确定 $\Delta Q_{\text{set}}$ 整定值原则的合理性。因此,通过式(12)可以实现故障发生在正线和支线上的区分。

5 结论

本文通过对AT供电带直接供电分支线路进行分析,提出了一种综合AT吸上电流比法和电抗距离表法的故障测距方法。首先通过吸上电流比法实现对正线和支线的区分,再通过电抗距离查表法实现对支线的故障测距。根据已有线路所发生的历史故障数据进行分析,验证了采用实测吸上电流与分支点吸上电流比近似的方法实现对正线和支线的区分的可行性。通过数值仿真验证了该方法的可行性、准确性。该方法不需要在接触网增加任何测量装置,仅通过改进既有故障测距系统程序即可实现。此外,该方法对现场该类供电方式提供了有益的参考。未来考虑站场和“T”接供电导致线路参数不均匀的情况,对Q值做进一步的修订,从而提高故障测距的精度。

参考文献:

[1] 何洋阳,黄康,王涛,等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 352 – 361.  
HE Yangyang, HUANG Kang, WANG Tao, et al. Overview of Traction Power Supply System for Rail Transportation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 352 – 361.

[2] CHO G J, KIM C H, KIM M S, et al. A Novel Fault-location Algorithm for AC Parallel Autotransformer Feeding System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 475 – 485.

[3] XIA Mingchao, WU Mingli. Traveling Wave Fault Location Scheme for Jing-Jin Dedicated Passenger Line Electric Railway Traction System [C]//2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. March 18 – 20, 2009, Lisbon, Portugal. IEEE, 2009: 447 – 449.

[4] DUAN Jingjing, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Study on Technology of Traveling Wave Method Fault Location in Traction Power Supply System [C] //10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change. Manchester, UK. IET, 2010: 1 – 5.

[5] 林国松,马劲飞. 基于分区所电抗的电气化铁路故障测距方案[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 79 – 83.  
LIN Guosong, MA Jinfei. Fault Location Scheme for Electric Railway Based on Reactance Measured at Section Post [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3): 79 – 83.

[6] 邢志杰,宋金川,闫雪松,等. 复线电气化铁路直供牵引网精确故障测距研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(1): 11 – 15.  
XING Zhijie, SONG Jinchuan, YAN Xuesong, et al. Research on Accurate Fault Location of Direct Supply Traction Network of Double-track Electrified Railway [J]. Electric Railway, 2021, 32(1): 11 – 15.

[7] 张萌. 高铁牵引网AT加直供越区供电方式研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.  
ZHANG Meng. Study on Power Supply Mode of AT Plus Direct Supply Area in High-speed Rail Traction Network [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2016.

[8] LIN Guosong, QUAN Wei, TONG Xiaoyang. Fault Location Scheme for Over-zone Feeding Operation Condition on High-speed Railway [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(2): 1459 – 1467.

[9] 吕玉恒. 站场股道接触网故障快速排查方法探讨[J]. 电工技术, 2016(3): 57 – 58, 61.  
LV Yuheng. Discussion on Rapid Troubleshooting Method of Catenary Fault in Railway Yard [J]. Electric Engineering, 2016(3): 57 – 58, 61.

[10] 张忠杰. 分支接触网线路故障精确定位技术研究[J]. 电气化铁道, 2013, 24(6): 1 – 4.  
ZHANG Zhongjie. Research on Accurate Fault Location Technology of Branch Catenary Line [J]. Electric Railway, 2013, 24(6): 1 – 4.

[11] 尹彩林,吕玉恒,李学山. 北同蒲多支线接触网的故障监测和切除方法[J]. 电气化铁道, 2007, 18(2): 24 – 27.  
YIN Cailin, LU Yuheng, LI Xueshan. Fault Monitoring and Switching off Measures for Beitongpu Multi-branch-line Overhead Contact System [J]. Electric Railway, 2007, 18(2): 24 – 27.

[12] 蒲婷婷,李京. 基于优化小波神经网络的输电线路行波故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 83 – 88.  
PU Tingting, LI Jing. Traveling Wave Fault Location of Transmission Line Based on Optimized Wavelet Neural Network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 83 – 88.

[13] 黎宁昊. 基于行波的全并联AT接触网多分支故障测距方案[J]. 电气技术与经济, 2021(4): 47 – 51, 57.  
LI Ninghao. Multi-branch Fault Location Scheme of Fully Parallel AT Catenary Based on Traveling Wave [J]. Electrical Equipment and Economy, 2021(4): 47 – 51, 57.

- 85 – 87, 90.
- [5] 刘高金,张广泽,冯涛. 不同岩性的含盐地层隧道工程侵蚀成因探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 15 – 19.  
LIU Gaojin, ZHANG Guangze, FENG Tao. Exploration on the Causes of Erosion about Tunnel through Different Saliferous Strata [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(10): 15 – 19.
- [6] 蒲文明,陈钊,任松,等. 膨胀岩研究现状及其隧道施工技术综述[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 232 – 239.  
PU Wenming, CHEN Fan, REN Song, et al. Research of Swelling Rock and Summarize of Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 232 – 239.
- [7] 崔蓬勃,王国安,董薇,等. 膨胀力对运营期间隧道二次衬砌结构影响研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 320 – 325.  
CUI Pengbo, WANG Guoan, DONG Wei, et al. Study on the Influence of Expansion Force on the Secondary Lining Structure of Tunnel during Operation [J]. Highway, 2020, 65(2): 320 – 325.
- [8] 王超,张水林,蒲文明,等. 模拟隧道水压对石膏围岩强度特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 235 – 239.  
WANG Chao, ZHANG Shuilin, PU Wenming, et al. Influence of Water Pressure on Surrounding Rock Strength in Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 235 – 239.
- [9] 庞山,宋玉香,朱永全. 太行山隧道膏溶角砾岩地段合理断面型式研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(4): 48 – 51.  
PANG Shan, SONG Yuxiang, ZHU Yongquan. Study on Rational Section of Taihang Mountain Tunnel in Gypsum Breccia Region [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(4): 48 – 51.
- [10] 张亮亮,陈天地,陈思孝,等. 影响混凝土结构水化热温度多因素分析[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(3): 5 – 8, 13.  
ZHANG Liangliang, CHEN Tiandi, CHEN Sixiao, et al. Finite Element Analysis for Influencing Factors Heat of Hydration Temperature of Concrete Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(3): 5 – 8, 13.

(上接第28页)

- [14] 林国松. 牵引供电系统新型保护与测距原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
LIN Guosong. Study on New Protection and Ranging Principle of Traction Power Supply System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [15] 王继芳. 全并联AT供电牵引网故障测距研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
WANG Jifang. Research on Fault Location of Fully Parallel AT Power Supply Traction Network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [16] LI Gang, LIN Guosong. Short Circuit Impedance Analysis for Novel AT Power Traction Network [C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. March 27 – 29, 2012, Shanghai, China. IEEE, 2012: 1 – 5.
- [17] 缪弼东,李瑞,艾广宁. 高速铁路牵引供电系统故障测距方法的研究和修正[J]. 电气化铁道, 2019, 30(1): 20 – 23.  
MIAO Bidong, LI Rui, AI Guangning. Researches and Modification of Fault Location for Traction Power Supply System for High Speed Railways [J]. Electric Railway, 2019, 30(1): 20 – 23.