

文章编号: 1674—8247(2021)05—0041—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.008

## 高速铁路牵引网双边供电方式下的故障测距策略研究

陈纪纲<sup>1</sup> 许晓蓉<sup>1</sup> 林国松<sup>2</sup> 林宗良<sup>1</sup> 李原<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**随着我国高速铁路牵引供电系统的快速发展,为更好地提高牵引网的供电能力,双边供电方式的牵引网成为选择。本文分析了高速铁路双边全并联 AT 供电方式下的电路模型,探讨了 AT 吸上电流比、横联线电流比、上下行电流比与距离的关系特性,分析了传统 AT 牵引网故障测距原理在双边供电方式下的适应性,提出了采用双端变电所测距装置协同的测距策略,并基于 Matlab/Simulink 仿真验证了故障测距策略的合理性。

**关键词:**牵引供电系统; AT 供电方式; 双边供电; 故障测距

**中图分类号:**U226 **文献标志码:**A

### Study on Fault Location Strategy for Traction Electric Network of High-speed Railway in Double-end Feeding Mode

CHEN Jigang<sup>1</sup> XU Xiaorong<sup>1</sup> LIN Guosong<sup>2</sup> LIN Zongliang<sup>1</sup> LI Yuan<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the rapid development of the traction power supply system of high-speed railway in China, in order to better improve the power supply capacity of the traction network, traction network with double-end feeding mode has become the choice. In this paper, the circuit model of double-end full parallel AT power supply mode for the high-speed railway is analyzed, and the relationship between AT's current ratio, cross-line current ratio, up-down current ratio, and distance is discussed. The adaptability of the traditional AT traction network fault location principle in bilateral power supply mode is analyzed, and a fault location strategy with the cooperation of two-terminal substation fault location devices is proposed. The rationality of the fault location strategy is verified based on Matlab/Simulink simulation.

**Key words:** traction power supply system; AT power supply mode; double-end feeding; fault location

相对于单边供电而言,双边供电是指在牵引供电系统中相邻两个牵引变电所同时向机车供电的方式。电气化铁路采用双边供电方式,可减少电分相的数量、平衡供电臂的负荷分配,进而缩短列车运行时分、提高牵引网电压水平,对提高牵引供电系统技术的水平具有重大意义。随着我国高速铁路的飞速发展,更高速

度高速铁路的建设成为可能,行车速度的进一步提升对牵引功率的需求大大增加,为更好地提升更速度高速铁路牵引供电系统的供电能力,应优先考虑采用双边全并联 AT 供电方式。

牵引网的精确故障测距是高速铁路牵引供电系统安全可靠运行的重要保障。我国高速铁路牵引供电系

收稿日期:2021-03-01

作者简介:陈纪纲(1977-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KSNQ202056)

引文格式:陈纪纲,许晓蓉,林国松,等. 高速铁路牵引网双边供电方式下的故障测距策略研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):41-45.

CHEN Jigang, XU Xiaorong, LIN Guosong, et al. Study on Fault Location Strategy for Traction Electric Network of High-speed Railway in Double-end Feeding Mode[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):41-45.

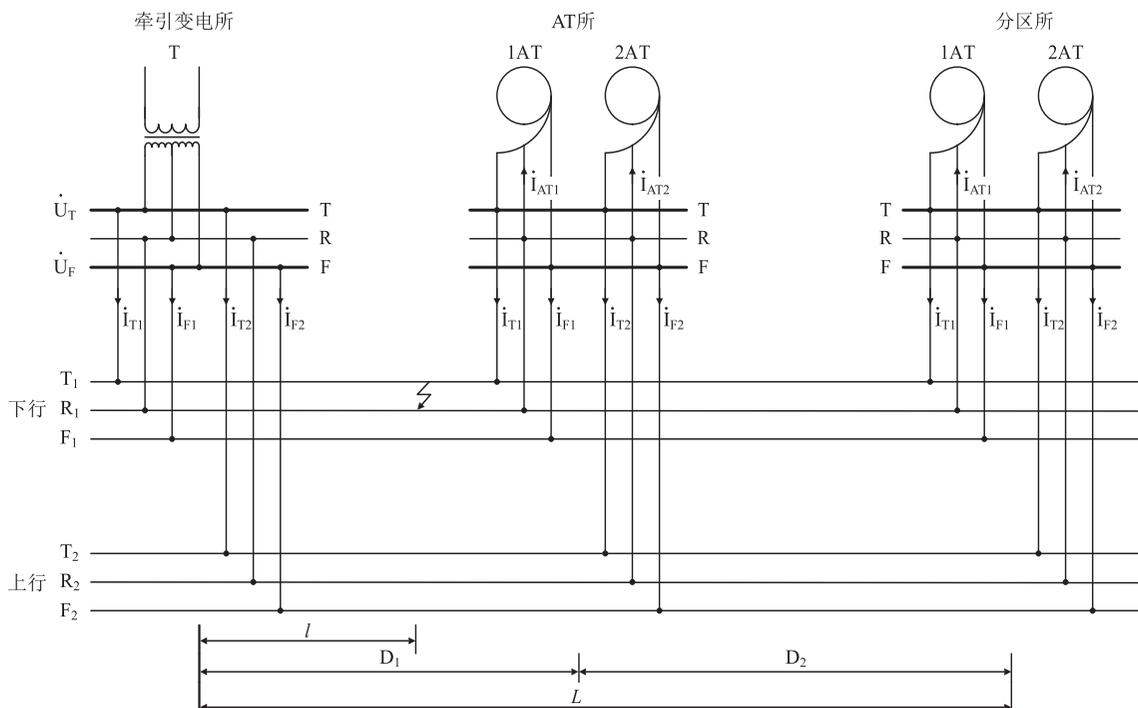
统经过十多年的技术积累,在单边供电方式下,基于测量电抗、吸上电流比、横联线电流比和上下行电流比等方法综合应用的故障测距系统使牵引网故障定位功能得到完美体现<sup>[1-3]</sup>。当供电系统采用双边供电方式时,牵引网故障电流的分布会随电路拓扑结构的改变而发生变化。本文分析了双边供电方式下的牵引网电路特征,仿真分析了单边供电方式故障测距原理在双边供电方式下的适应性,提出了一种采用双端牵引变

电所测距装置协同的新型故障测距策略。

## 1 单边全并联 AT 供电方式故障测距原理

单边全并联 AT 供电方式电气量采集如图 1 所示<sup>[4]</sup>,图中标示的模拟量为牵引变电所、AT 所和分区所需要采集的模拟量。

当牵引网发生故障时,各所故障测距装置记录故



$l$  - 故障距离 (km);  $L$  - 供电臂全长 (km);  $D_1$ 、 $D_2$  - 第 1、2 个 AT 段区间长度 (km)。  $\dot{i}_{T1}$  - 下行 T 线电流、 $\dot{i}_{F1}$  - 下行 F 线电流;  $\dot{i}_{T2}$  - 上行 T 线电流;  $\dot{i}_{F2}$  - 上行 F 线电流;  $\dot{i}_{AT1}$  - AT 所、分区所的下行 AT 中性点吸上电流;  $\dot{i}_{AT2}$  - AT 所、分区所上行 AT 中性点吸上电流

图 1 全并联 AT 供电方式电气量采集图

障数据(包括电压、电流和当时的开关状态),故障后牵引变电所测距装置接收 AT 所、分区所故障数据,进行综合分析,测距方法有 AT 中性点吸上电流比法、横联线电流比法和上、下行电流比法。

### 1.1 AT 中性点吸上电流比法

AT 中性点吸上电流比法是在 AT 供电方式下,利用同一供电臂上各所亭吸上电流的比值来确定故障距离的方法。计算公式为:

$$l = L_{n-1} + \frac{q_{AT} - Q_1}{1 - Q_1 - Q_2} D_n \quad (1)$$

式中:  $Q_1$ 、 $Q_2$  ——吸上电流比修正参数;

$q_{AT}$  ——故障区间吸上电流比值。

AT 吸上电流比法可用于全并联 AT 供电牵引网发生 TR 型、FR 型故障的测距,测距应用通过修正电

流比参数减小 AT 漏抗和钢轨对地泄露的影响。

### 1.2 横联线电流比法

横联线电流比法是在全并联 AT 供电方式下,利用同一供电臂各所亭横联线电流比值来确定故障距离的方法,计算公式为:

$$l = L_{n-1} + q_{HL} \times D_n \quad (2)$$

式中:  $q_{HL}$  ——故障区间横联线电流比值。

横联线电流比法适用于全并联 AT 供电方式下各种类型的故障测距,不受 AT 漏抗和钢轨对地泄露的影响。

### 1.3 上、下行电流比法

上、下行电流比法是在供电臂上、下行末端并联供电方式下,利用上、下行电流的比值来确定故障距离的方法,计算公式为:

$$l = 2q_{sx}D_n \quad (3)$$

式中: $q_{sx}$ ——故障区间横联线电流比值。

上、下行电流比法适用于末端并联的复线牵引网各种类型的故障测距,不受 AT 漏抗和钢轨对地泄露的影响。

## 2 单边供电故障测距原理在双边全并联 AT 供电方式的适应性

### 2.1 双边全并联 AT 供电方式供电臂结构

双边供电的基本要求是相邻两个牵引变电所的牵引网具备相同的电压幅值和相位,供电电源来自同一个电网的同一个或不同的变电所。在常规单边全并联 AT 牵引供电臂结构的基础上,若通过分区所将相邻牵引变电所两个供电臂串接起来,可实现包含 4 个 AT 段的双边供电牵引网,简化示意如图 2 所示。两个牵引变电所进线来自同一个变电所的同一条母线,因而暂不考虑外部电流在双边并联供电牵引网的穿越性电流及其影响<sup>[5]</sup>。

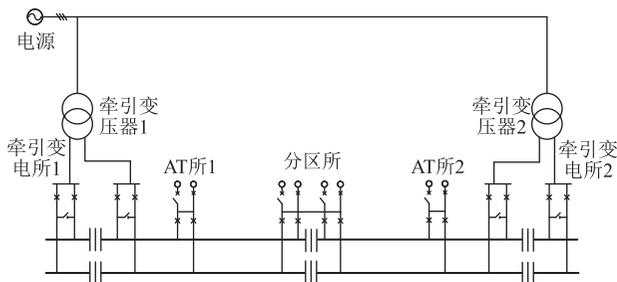


图2 双边全并联 AT 供电示意图

### 2.2 单边供电故障测距原理在双边全并联 AT 供电方式下的适应性

由两个牵引变电所构成的双边供电臂电源来自于电网变电所,当动车组经过分区所处已经闭合的电分相时,不再需要断主断路器。当双边供电牵引网有负荷存在时,两侧牵引变电所均向负荷提供电能,负荷电

$$Z = \begin{bmatrix} T1 & R1 & F1 & T2 & R2 & F2 \\ T1 & 0.145 + j0.55 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.413 & 0.05 + j0.328 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.292 \\ R1 & 0.05 + j0.314 & 0.084 + j0.407 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.292 \\ F1 & 0.05 + j0.413 & 0.05 + j0.315 & 0.145 + j0.734 & 0.05 + j0.292 & 0.05 + j0.292 & 0.05 + j0.263 \\ T2 & 0.05 + j0.328 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.292 & 0.145 + j0.55 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.413 \\ R2 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.314 & 0.05 + j0.292 & 0.05 + j0.314 & 0.084 + j0.407 & 0.05 + j0.314 \\ F2 & 0.05 + j0.292 & 0.05 + j0.292 & 0.05 + j0.263 & 0.05 + j0.413 & 0.05 + j0.314 & 0.145 + j0.734 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3.2 双边供电时对传统测距原理的评价分析

对牵引变电所 1 分区所区段下行接触网与钢轨之

间发生 TR、FR、TF 短路故障进行仿真,3 种测距方法的仿真结果如图 3 所示。

流在牵引网的分布较单边供电方式更为复杂。当双边供电牵引网发生短路时,故障 AT 段的短路电流将来自两侧的牵引变电所。由于双边供电能力的增强,牵引变电所牵引网故障导致的压降将大幅减小(特别是远离故障点一侧的牵引变电所),从而对继电保护各类元件的灵敏性和可靠性产生一定的影响。而故障测距装置需通过保护起动元件判别故障发生才能采集故障数据,进而正确完成故障测距功能。同时,双边供电牵引网故障电流的分布特征也会影响常规的故障测距原理,故需进一步分析和验证原有的测距原理。

根据单边 AT 供电方式的特性,无论是在单线 AT 供电方式还是在全并联 AT 供电方式下,当发生 TR 型或 FR 型故障时,距离故障点最近的两个自耦变压器均承担了绝大部分的吸上电流,AT 牵引网的电路特性决定了 AT 中性点吸上电流比法的可用性。在双边全并联 AT 供电方式下,虽然故障 AT 段的两端电源均提供短路电流,但两端自耦变压器对吸上电流的分配依然满足上述特性。横联线电流比法和上下行电流比法适用于单端电源供电、上下行分段(末端)并联的牵引网测距,当双端供电时,另一侧电源供电将打破原有单端电源供电的电流分布特性,从而需重新评估基于上下行对称性的两种电流比法的有效性。

## 3 单边供电故障测距原理在双边全并联 AT 供电方式仿真分析

### 3.1 双边全并联 AT 供电方式建模

基于 Matlab/Simulink 仿真平台,构建的常规运行方式下的双边全并联 AT 供电方式牵引网仿真模型,如图 2 所示。假设 2 个供电臂总长 50 km,4 个 AT 段的长度分别为 11 km、13 km、12 km 和 14 km,电网变电所馈线距离左、右两个牵引变电所的距离分别为 30 km 和 40 km。牵引网阻抗如式(4)所示,仿真模型其他参数如表 1 所示。

表1 全并联双边 AT 供电仿真模型参数表

电源参数	三相电压/kV	220
	频率/Hz	50
	短路容量/MVA	2 000
牵引变压器	接线型式	V/X
	变比	220/2 × 27.5
	容量/MVA	50
自耦变压器	容量/MVA	32
	漏抗/ $\Omega$	0.05 + j0.15

从图3可以看出:

(1) 双边全并联 AT 供电模式发生 TR、FR 故障

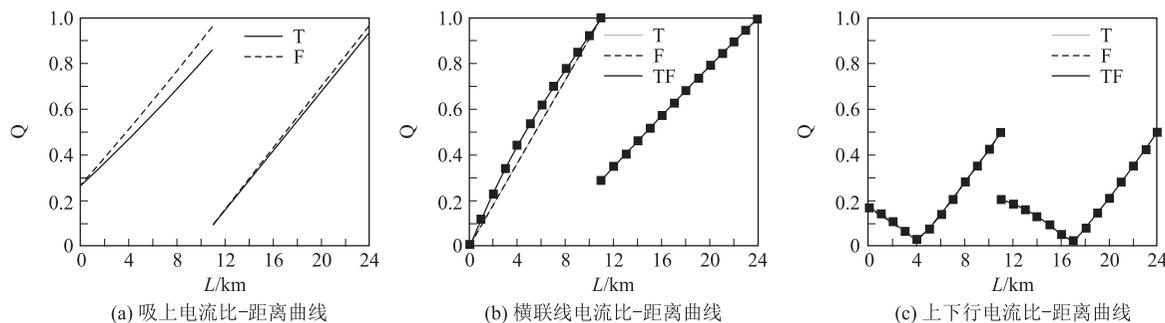


图3 双边全并联 AT 供电方式下3种测距方法仿真结果图

## 4 双边全并联 AT 供电方式故障测距策略

### 4.1 测距装置和网络配置

根据双边供电牵引网的特征,故障测距系统配置需整体考虑两个牵引变电所间供电臂的综合测距,故障测距装置和通信通道配置如图4所示。

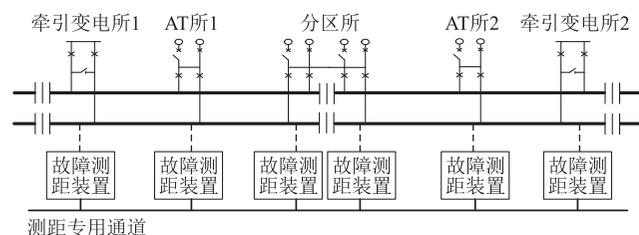


图4 双边供电故障测距系统示意图

各所故障测距装置采集电量、开关量与常规单边全并联 AT 供电方式一致。同时,考虑在非正常单边供电情况下,为便于测距系统识别单边或双边供电模式,分区所分属两个供电臂的故障测距装置还需采集联络两个供电臂的开关位置信号。整个双边供电牵引网配置的故障测距装置通过1个专用测距通道相连。

### 4.2 故障测距策略

#### 4.2.1 故障启动元件

与单边全并联 AT 供电方式相同,在双边全并

联时,吸上电流比-距离关系在两个 AT 段都呈现单调增长的特性,表明吸上电流比法可用于双边供电时 TR、FR 故障的测距。

(2) 双边全并联 AT 供电模式发生 TR、FR、TF 故障时,横联线电流比-距离关系在两个 AT 段都呈现单调增长的特性,表明横联电流比法可用于双边供电时 TR、FR、TF 故障的测距。

(3) 双边全并联 AT 供电模式发生 TR、FR、TF 故障时,上下行电流比-距离关系在两个 AT 段都呈现先降后升的特性,表明此时不能应用上下行电流比法测距。

AT 供电方式下,牵引变电所、AT 所和分区所的测距装置故障启动元件如表2所示。

表2 故障启动元件表

故障启动元件	牵引变电所	AT 所/分区所
低电压	✓	✓
低压启动过电流	✓	-
电流增量	✓	-
距离元件	✓	-
通信启动	✓	✓
外启动	✓	-

需要说明的是,当牵引网发生故障时,若 AT 所/分区所的故障测距装置仅依赖于低电压启动元件,离故障点近的测距装置可检测到故障信号,离故障点远的测距装置则可能无法检测到故障信号。

#### 4.2.2 故障测距策略

故障测距系统既要考虑在双边供电方式下不同运行方式的测距功能,又要考虑牵引网解列为单边供电方式后故障测距的需要。在单边供电方式下,测距系统应满足文献[4]规定的5种运行方式,当某个牵引变电所解列时,同一供电区段的变电所测距装置应具有越区供电功能。限于篇幅,本文仅考虑正常运行状态的双边全并联 AT 供电方式。双边全并联 AT 供电方式下故障测距的策略步骤如下:

(1) 各所测距装置检测故障并记录故障数据。

(2)两个牵引变电所测距装置接收两个供电臂所有AT所、分区所和对侧牵引变电所故障测距装置的故障数据。

(3)两个牵引变电所测距装置根据各自供电臂上牵引变电所、AT所、分区所的馈线电压、T线电流、F线电流等电气参数判断故障是否发生在本供电臂,然后由判断在本供电臂的牵引变电所故障测距装置判别故障类型和故障行别。

(4)故障供电臂的牵引变电所故障测距装置对TR、FR型故障采用故障区段的AT中性点吸上电流比法或横联线电流比法进行故障测距,对TF型故障,采用横联线电流比法进行故障测距。

## 5 结束语

本文介绍了基于分区所实现双边供电的3种电流比测距方法,并基于Matlab/Simulink仿真平台,建立了双边全并联AT供电方式牵引网模型。仿真分析结果表明,吸上电流比法依然适用于TR型和FR型故障测距,横联线电流比依然适用于TR型、FR型和TF型故障测距,上下行电流法已不再具备适用性。最后提出了相邻牵引变电所测距装置协同的双边全并联AT供电方式下的故障测距策略。本文的研究成果对丰富我国牵引供电系统故障测距理论具有重要的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 林国松,李群湛,陈小川. 电气化铁道供电牵引网故障测距综述[C]//中国电气化铁路两万公里学术会议论文集. 北京, 2005: 203-207.
- LIN Guosong, LI Qunzhan, CHEN Xiaochuan. Summary of Fault Location of Electrified Railway Power Supply Traction Network [C]// Proceedings of the Academic Conference on 20,000 km of Electrified Railway in China Railway Track. Beijing, 2005: 203-207.
- [2] 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 All-Parallel at Traction System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [3] 郭明杰,林国松,陈小川. 基于横联线电流比原理的全并联AT牵引网故障测距装置[J]. 继电器, 2006, 34(22): 36-39.
- GUO Mingjie, LIN Guosong, CHEN Xiaochuan. Fault Locator of All-Paralleling AT Traction Power Supply Based on the Theory of the Current Ratio of Paralleling Lines [J]. Relay, 2006, 34(22): 36-39.
- [4] Q/CR 686-2018 电气化铁路AT供电方式故障测距装置[S]. Q/CR 686-2018 Fault Location Device for Electrical Railway of AT Feeding System [S].
- [5] 智慧,袁勇,李剑,等. 双边供电模式下高速铁路AT供电系统供电能力计算与分析[J]. 中国铁路, 2017(12): 66-71.
- ZHI Hui, YUAN Yong, LI Jian, et al. Calculation and Analysis of the Power Supply Capacity of the AT Power Supply System for High-speed Railway under the Two-Way Feeding Model [J]. China Railway, 2017(12): 66-71.
- [12] 张敏,刘国山,吴乐可,等. 双层运输问题及其算法[J]. 应用数学学报, 2008, 31(1): 17-23.
- ZHANG Min, LIU Guoshan, WU Leke, et al. Model and Algorithm for Bilevel Transportation Problem [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2008, 31(1): 17-23.
- [13] 任刚. 交通管理措施下的交通分配模型与算法[M]. 南京:东南大学出版社, 2007.
- REN Gang. Traffic Assignment Model and Algorithm under Traffic Management Measures [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2007.
- [14] 中铁二院工程集团有限责任公司. 成渝中线高速铁路可行性研究总说明书[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司, 2020.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Specification for the Feasibility Study of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2020.
- [15] 孙朝苑. 客运专线对沿线城市铁路客运量分流问题的研究[J]. 铁道经济研究, 2004(3): 44-46.
- SUN Chaoyuan. Study on Passenger Traffic Diversion of Passenger Dedicated Lines to Cities along the Line [J]. Railway Economics Research, 2004(3): 44-46.
- [16] 赵飞. 基于多阶段双层规划模型的高速铁路票价体系优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
- ZHAO Fei. Research on the Railway Pricing System Optimization Based on the Multi-Stage Bi-Level Programming Model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [17] 刘玉敬. 基于旅客出行选择行为的高铁客票定价方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- LIU Yujing. Research on the Railway Optimal Pricing Based on the Passenger Travel Choice Behavior [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.