

# 济南 R3 线短路试验研究

柳鑫<sup>1</sup>, 吴双<sup>2</sup>, 张桂林<sup>3</sup>, 刘光辉<sup>3</sup>

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司电气化设计院分公司, 天津 300250;

2. 济南轨道交通集团建设投资有限公司, 山东 济南 250300;

3. 郑州铁路职业技术学院电气工程学院, 河南 郑州 451460)

**摘要:** 短路对城市轨道交通的牵引供电系统危害十分严重, 断路器中大电流脱扣保护、综合自动保护装置安全可靠动作可以减小短路对供电系统的冲击。依据济南 R3 线短路试验, 探讨了如何合理科学地进行试验布置和测量, 并对远端接地短路和近端节点短路的测试结果进行了分析。试验表明, 济南 R3 线的保护设备对短路故障响应灵敏、可靠, 为直流供电系统短路试验研究提供借鉴。

**关键词:** 城市轨道交通; 牵引供电系统; 短路试验

中图分类号: U224.9 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)05-0049-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.011

## Research on Short-circuit Test for Jinan Metro R3 Line

Liu Xin<sup>1</sup>, Wu Shuang<sup>2</sup>, Zhang Guilin<sup>3</sup>, Liu Guanghui<sup>3</sup>

(1. Electrification Design Institute Branch Company of China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300250, China; 2. Jinan Rail Transit Group Construction Investment Co., Ltd., Jinan 250300, Shandong, China; 3. Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou 451460, Henan, China)

**Abstract:** Short circuit is seriously harmful to the traction power supply system of urban rail transit. The safe and reliable operation of DC overcurrent tripper of circuit-breaker and comprehensive automatic protection device can reduce the impact of short-circuit fault. Based on the short-circuit test of Jinan R3 line, how to arrange the test and measure its data reasonably and scientifically is discussed, and the test results of the short circuit remote and near substation are analyzed. The test results show that the protection equipment of Jinan R3 line is sensitive and reliable to short-circuit fault, which provides a reference for the short-circuit test research of DC power supply system.

**Key words:** urban rail transit; power supply system of electric traction; short-circuit test

## 0 引言

作为当今世界城市交通重要组成部分的轨道交通是大中型城市人员市内流动的主要运输方式。轨道交通的建设和运营可以促进沿线区域快速、可持续发展。近年来, 中国城市轨道交通在修建里程上增长速度最快, 在建规模最大, 年发送旅客最多, 运行速度最快, 大大缓解大中城市日益拥挤的交通状况。可靠、稳定的直流牵引供电系统是城市轨道交通列车安全、高效运行的重要保障<sup>[1]</sup>。

基金项目: 郑州铁路职业技术学院教科课题(2019KY0005)

对城市轨道交通可靠运营影响最大的因素是短路故障, 因此在新线开通之前要进行牵引供电系统短路试验。该试验可以检验牵引直流供电系统运行的可靠性、电气设备的稳定性以及校验牵引供电系统继电保护整定值的准确性<sup>[2-4]</sup>。当发生短路故障时, 保护设备可以快速、准确切断故障点, 从而保障设备和人员的安全。不同的供电线路, 其接触网类型不同、牵引变电所的容量不同、开关设备选择的厂家不同, 短路试验时布置不尽相同。下面对济南 R3 线选择合适的短路点进行短路试验, 应用专用的设备对相关参数进行测量并对其进行分析。结果表明, 济南 R3 线选择的保护装置对不同短路故障响应灵敏、可靠。

# 1 试验布置和参数测量

## 1.1 济南 R3 线项目概况

济南市轨道交通 R3 线二期工程线路全程共 21.57 km(龙洞站—滩头站)。供电系统由主变电所、35 kV 供电环网、牵引降压混合变电所及降压变电所、接触网系统、电力监控系统、杂散电流防护及接地系统、供电车间组成。供电系统采用 2 个 110/35 kV 主变电所集中双边供电方式,合用一期工程既有的济南东主变电所,主变电所提供 35 kV 电源,向地铁牵引变电所及降压变电所供电。

接触网系统的牵引网电压等级为直流 1500 V,牵引网馈电形式为架空刚性接触网。

## 1.2 短路试验点的选择

短路试验点的合理选择是保证达到试验目的关键,应保证短路试验点可以获取最大短路电流及最小短路电流。文献 [5] 规定接触网最小短路电流是接触网中离馈入点最远端发生正负极间短路时的电流。反之,接触网最大短路电流是在接触网的馈入点处发生正负极间短路时的电流。根据 R3 线牵引变电所实际布置情况,选取济南新东站进行最小短路电流试验,由于该点短路电流理论为最小,可以验证电流速断保护、过电流保护、 $di/dt + \Delta I$  保护的可靠性;选取丁家东站和盛福庄站进行最大短路电流试验,因为该点理论电流最大,可以检验  $di/dt + \Delta I$  保护、断路器本体的大电流脱扣保护动作的可靠性,短路试验布置如图 1 所示。

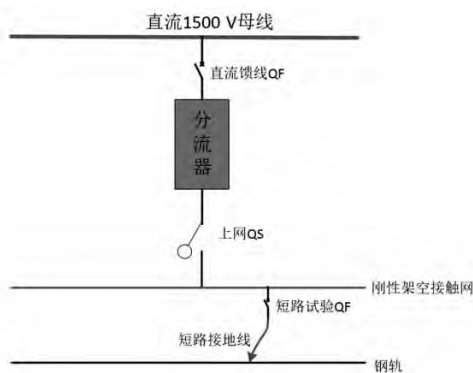


图 1 短路试验布置

## 1.3 短路试验步骤

为保证短路试验顺利进行,制定操作流程如图 2 所示。

### 1) 试验准备

(1) 按照济南地铁公司停电作业程序办理好作

业票和配合协议。

(2) 短路试验区间的接触网处于停电状态,一直到短路试验开始。

(3) 做好安全防护措施,例如试验区段按带电设备处理,除试验人员外,试验区段不允许有其他人员;短路点两侧 30 m 做好防护等。

### 2) 接触网短路连接

为保护短路大电流对短接导线冲击,图 1 中的短路接地线采用 2 条 TRJ-150 mm<sup>2</sup> 软铜线连接短路试验 QF 和钢轨。

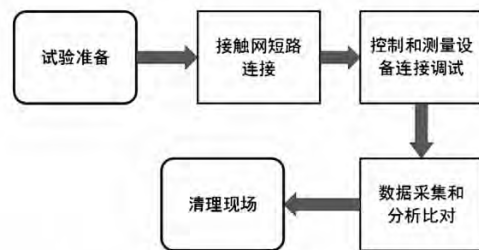


图 2 试验流程

### 3) 控制和测量设备连接调试

(1) 在接地线中串接断路器,该断路器可以用远程控制装置操作。

(2) 连接电流互感器到示波器,并启动示波器用于记录短路时的参数。

(3) 核对短路试验区段的保护定值及动作时间配合的正确性。

(4) 在试验前,检查相关电动隔离开关触头闭合情况,并进行短路模拟试验验证保护装置的可靠性。

### 4) 数据采集和分析比对

(1) 闭合短路试验 QF,连通电路。

(2) 从示波器及保护装置读取短路电流及电压数值、波形及电弧分断时间,将收集的数据与设计整定值比较。

### 5) 清理现场

(1) 短路试验结束后,检查各类开关动静触点、短接地线与钢轨、架空刚性汇流排的连接点是否有烧伤。

(2) 拆除短路接地线,并清理相关安全防护设施,恢复到试验前的面貌。

# 2 试验数据分析及评估

## 2.1 直流保护的基本原理

济南 R3 直流 1500 V 馈线的保护有大电流脱扣

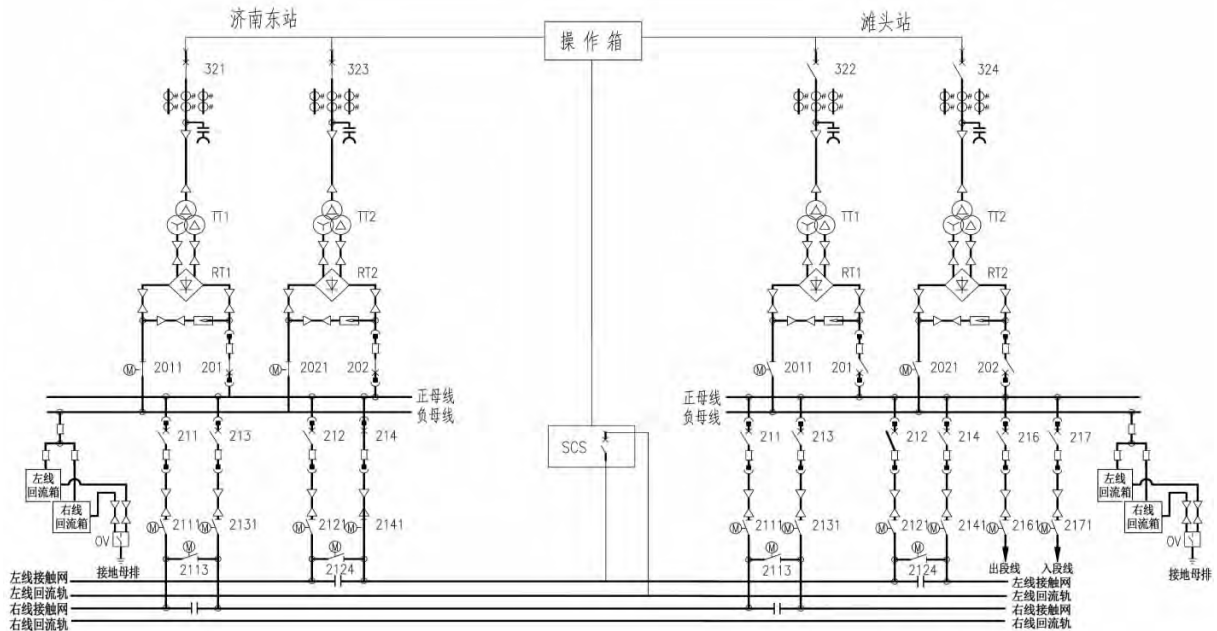


图3 济南东站至滩头站短路试验模式

保护(断路器本体保护)、电流速断保护、过电流保护、电流增量保护  $\Delta I$  和电流上升率保护  $di/dt$  等<sup>[6-7]</sup>。

断路器本体大电流脱扣保护是牵引网近端短路的主保护。当牵引网发生金属性近端短路故障,短路电流数值很大。当短路电流达到整定值时,脱扣器动作,断路器能在短路电流达到稳态值之前提前快速切断,其动作时间仅为断路器本身固有动作时间。

电流速断是断路器本体大电流脱扣的近后备保护,电流设定值一般小于断路器本体的定值,主要通过分析馈线电流识别故障。

过电流保护是整段线路的后备保护,整定值相对较小,时间延迟相对长。

$\Delta I + di/dt$  保护作为馈线保护的主保护,它既能切除近端短路电流,也能切除大电流脱扣保护不能切除的故障电流较小的中远端短路故障。该保护克服了单独  $di/dt$  保护受干扰而误动以及  $\Delta I$  保护存在拒动现象的缺点。

### 2.2 接触网最小电流试验

单边供电模式下在济南新东站断路器 214 远端短路,验证大电流情况下断路器的开断能力、设备的短路耐受能力和继电保护装置的速动性。短路试验模式如图 3 所示。

短路试验的故障录波采用镇江大全赛雪龙继电保护装置 sepcos-2 故障录波仪,波形如图 4 所示。

从图 4 可以看到,镇江大全赛雪龙继电保护装

置 sepcos-2 的短路电流最大值为 12 544 A,保护增量变化时间为 16.8 ms。图中箭头 1 所示起弧时间为 -17 ms,箭头 2 为完全息弧时间 57 ms,从起弧时间至完全息弧历时约 74 ms。

短路试验中  $\Delta I + di/dt$  和电流速断保护动作跳闸,214 断路器  $\Delta I + di/dt$  保护整定值为 6000 A,继电保护的动作为 12 544 A,断路器动作的可靠系数为 2.09。经检查,短路点导线及钢轨短路试验后没有明显烧损情况。

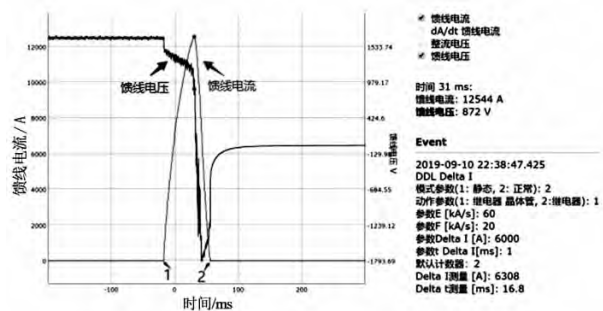


图4 远端短路录波仪采集的数据

### 2.3 接触网最大电流试验

丁家东站与盛福庄站双边供电模式下,在丁家东站断路器 214 和盛福庄站 212 近端短路,短路试验模式如图 5 所示。验证在正线双边供电模式下,一端发生短路故障时,相关继电保护装置的速动性、灵敏性。

短路试验的故障录波采用镇江大全赛雪龙继电保护装置 sepcos-2 故障录波仪和中元华电 ZH-102 录

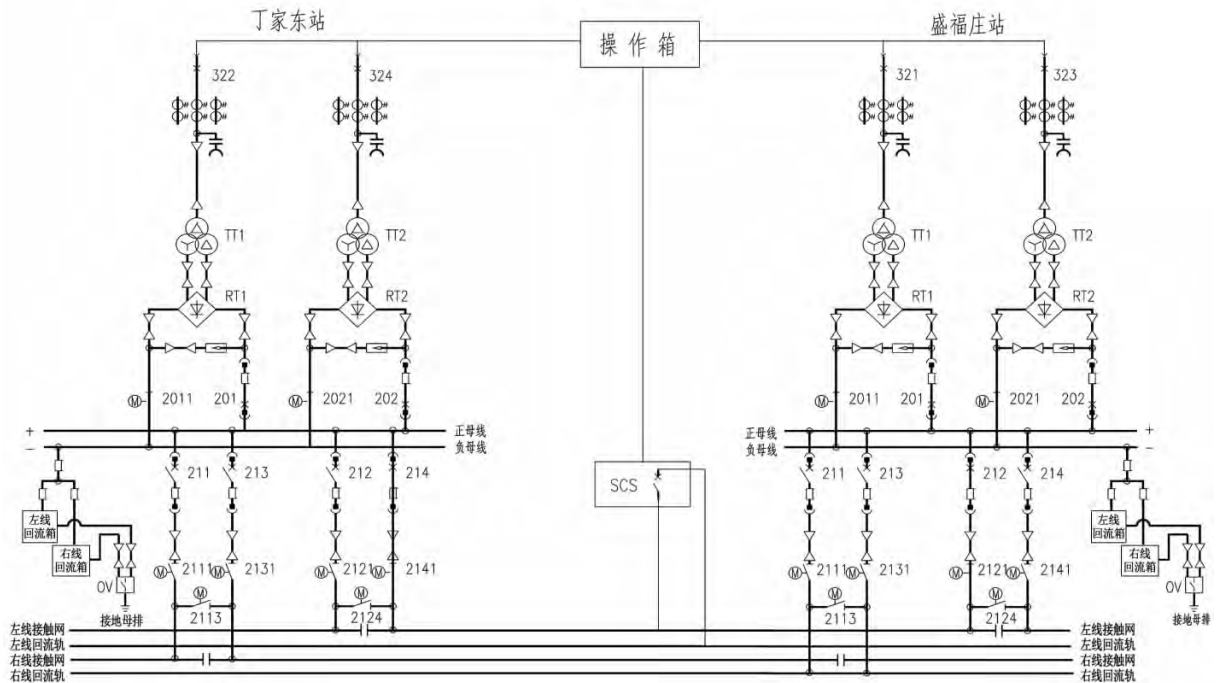


图 5 丁家东站至盛福庄站短路试验模式

波仪。前者波形如图 6 所示,后者波形如图 7 所示。

查,短路点导线及钢轨短路试验后没有明显烧损情况。

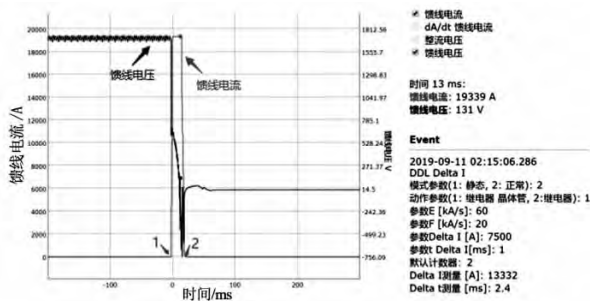


图 6 近端短路录波仪采集的数据

从图 6 可以看到,短路的最高电流约为 19 339 A,保护增量变化时间为 2.4 ms。图中箭头 1 起弧时间为 -2 ms,箭头 2 完全息弧时间为 23 ms,从起弧时间至完全息弧历时约 25 ms。

在图 7 可以看到,短路电流最大值为 19 339.4 A,从起弧至完全息弧历时约 29 ms,与盛福站 212 继电保护装置记录的波形基本一致。

### 3 结 语

结合轨道交通具体项目济南 R3 线论述了直流牵引供电系统短路试验的试验点的选择、试验步骤等内容。短路试验精心组织、科学安排,为此线路试运行提供了保障,同时为其他同类型线路牵引供电短路试验提供了借鉴。

从 2 次短路试验的过程记录和波形分析中可以看出,被试断路器耐受住了短路电流的考验,直流保护测控装置的动作的可靠性、速动性、选择性、灵敏性满足设计要求,继电保护装置记录的故障波形真实可靠。对参加本次短路试验的设备的试验结论为合格。

### 参考文献

- [1] 韩志杰. 城轨直流牵引供电系统短路试验[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(1): 113 - 115.
- [2] 王勇. 客运专线牵引供电系统短路试验的研究[J]. 铁道工程学报, 2009(11): 76 - 80.

(下转第 55 页)

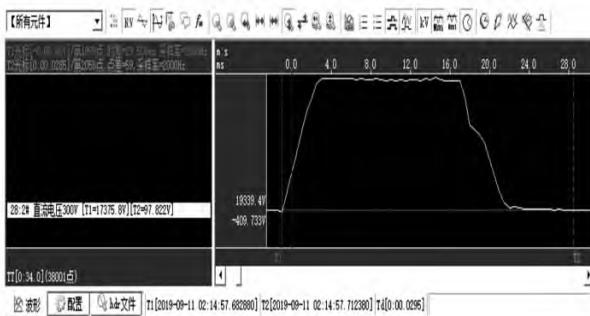


图 7 盛福庄站 212 短路电流波形

短路试验中电流速断保护及  $\Delta I + di/dt$  动作,盛福庄站电流速断保护整定值为 7500 A,继电保护动作为 19 339 A,继电保护动作的可靠系数为 2.58。经检

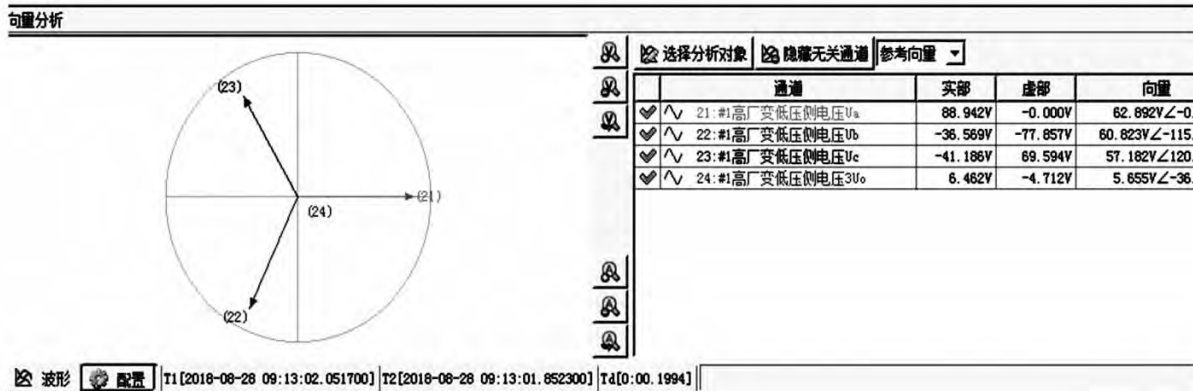


图 5 1 号高压厂用变压器低压侧电压向量分析

为  $0^\circ$ , B 相电压故障后相位为  $-115^\circ$  左右, 即与 A 相之间相位减小  $5^\circ$  左右, C 点电压相位故障后为  $120^\circ$ , 基本不变。

根据上述的三相电压在故障时幅值和相位变化, 通过 CAD 软件作图展开进一步确认。即以故障时刻的 A、B、C 三相电压幅值为半径作圆, 3 个圆的交点即为故障后新的偏移中性点  $O'$ , 如图 6。根据前面原理分析可知, 新的中性点在以故障相为直径的圆轨迹上, 通过故障前的三相电压幅值为直径作圆确定偏移后的新的中性点落在哪个圆上, 该相即为故障相。

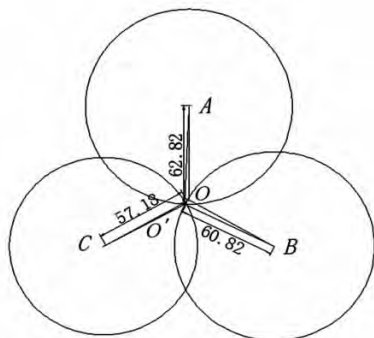


图 6 故障后新的偏移中性点  $O'$

如图 7 所示 ( $AO$ 、 $BO$ 、 $CO$  为故障前,  $AO'$ 、 $BO'$ 、 $CO'$  为故障后), 结合图 4 和图 5 综合分析, 发现新的中性点  $O'$  在以 B 相电压为直径的圆轨迹上, 故可判断为 B 相经高阻抗接地。

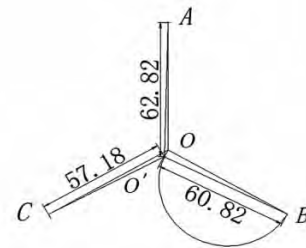


图 7 1 号高压厂用变压器低压侧电压圆轨迹分析

### 3 结 语

通过作出不接地系统单相接地故障时的零序等效电路图, 由向量分析, 结合数学公式推导证明了不接地系统发生单相接地故障时, 新的中性点会在以故障相为直径的圆轨迹上, 得出故障相的电压不一定最小的结论。在实际一起事故案例中, 运用所得结论并结合 CAD 软件作图准确快速地判断出故障相, 为实际现场事故分析提供一种新的分析思路。

#### 参考文献

[1] 黄涛, 陈禾. 中性点不接地系统高阻接地故障的特点及判别 [J]. 广东电力, 2008, 21(10): 32-34.

#### 作者简介:

李 飞 (1992), 男, 助理工程师, 从事发电厂继电保护相关工作。 (收稿日期: 2020-05-26)

(上接第 52 页)

[3] 陈刚, 于纪利. 一种城市轨道交通牵引供电系统短路试验的解决方案 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58(6): 133-136.  
[4] 王军, 翁创业. 直流牵引供电系统短路试验浅析 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(4): 64-66.  
[5] 城市轨道交通直流牵引供电系统: GB/T 10411—2005 [S], 2005.

[6] 黄海浪. 大连地铁直流牵引供电系统保护配置及整定研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(3): 93-95.  
[7] 高云霞. 直流牵引供电系统继电保护整定计算方法 [J]. 电气化铁道, 2011(4): 40-42.

#### 作者简介:

柳 鑫 (1984), 男, 工程师, 目前主要从事轨道交通直流供电系统设计。

(收稿日期: 2020-05-22)