

# 高速铁路 AT 接触网故障类型和方向的判别方法

王 丹, 范三龙, 孙金华

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

**摘 要:** 全并联 AT 供电方式是目前高速铁路采用的一种供电方式, 文章分析了不同类型故障方式下, 牵引网中的电流分布并得出其与故障点电流的关系表达式, 提出了根据故障点位置的不同, 通过比较各变电所、AT 所和分区所的接触线和正馈线的电流的有效值大小来区分故障类型和方向的方法。方法简单易行, 结合吸上电流比测距原理, 能准确获知故障位置、类型和方向, 从而为快速排除故障、恢复线路提供依据。

**关键词:** 高速铁路; 接触网故障; 吸上电流比; 类型和方向判别

## 0 引言

全并联 AT 供电方式的电气化铁路接触网作为高速电气化铁路牵引供电系统的重要部分, 对铁路运输供电安全稳定运行起着举足轻重的作用。由于采用受电弓滑动取流, 接触网故障概率非常高。不论是瞬时性还是永久性故障, 快速修复线路对保证供电的可靠性至关重要。

目前在国内高速电气化铁路上应用的故障测距装置都采用较成熟的吸上电流比原理来实现故障点距离的测定, 但是目前在故障类型和方向判别上存在以下问题:

问题 1: 只通过各变电所、AT 所和分区所采集的吸上电流来区分 T-F 故障还是 T-R 或 F-R 故障是可行的, 但是用其来判断故障方向是不可行的<sup>[1]</sup>。

问题 2: 由于 AT 供电方式下上行和下行接触网线路阻抗等参数相同, 所以当故障出现在 AT 所和分区所之间时, 变电所处采集的上行线路接触线 (T 线) 电流  $I_{T1}$  和正馈线 (F 线) 电流  $I_{F1}$  与下行线路的 T 线电流  $I_{T2}$  和 F 线电流  $I_{F2}$  分别相等, 无法判断故障方向在上行还是下行线路、而且也无法区分 T 线对钢轨 (T-R 故障) 和 F 线对钢轨故障 (F-R 故障)<sup>[2]</sup>。

问题 3: 有提出采用故障点两侧所亭的上下行并联线上的 T 线和 F 线电流矢量差  $I_{FH} - I_{TH}$  的方向来判定故障方向<sup>[2]</sup>, 但由于目前高速电气化铁路的 AT 所和分区所的主接线在上下行并联线上未安装电流互感器, 而是通过 T、F 线的电流来换算成等效的  $I_{FH} - I_{TH}$ , 计算繁复, 无法实现故障方向的准确

判断。

## 1 理论分析

高速铁路的变电所供电臂上一般设有一个 AT 所和一个分区所, 本节在不考虑钢轨泄漏电流、地中回流, 且认为自耦变压器为理想变压器, 其漏抗很低的情况下, 对故障发生在不同位置时的电流分布做一下分析。

### 1.1 F-R 故障分析

当接触网在 AT 所和分区所之间发生正馈线对钢轨即 F-R 短路故障时, 其电流示意图如图 1 所示。

图 1 中 AT 所和分区所之间的网孔电压方程如公式 1 所示:

$$\begin{cases} (\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2})Z_T D - (\dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2})Z_{TF} D = (2\dot{I}_0 - \dot{I}_{g3})Z_{TR} D + \dot{I}(Z_{TR} - Z_{TF})X \\ (\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2})Z_{TR} D - (\dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2})Z_{FR} D = (2\dot{I}_0 - \dot{I}_{g3})Z_R D + \dot{I}(Z_R - Z_{FR})X \\ (\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2})Z_{TF} D - (\dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2})Z_F D = (2\dot{I}_0 - \dot{I}_{g3})Z_{FR} D + \dot{I}(Z_{FR} - Z_F)X \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $Z_T$  为 T 线的单位自阻抗,  $Z_F$  为 F 线的单位自阻抗,  $Z_R$  为钢轨的单位自阻抗,  $Z_{TF}$  为 T 线和 F 线的单位互阻抗,  $Z_{TR}$  为 T 线和钢轨的单位互阻抗,  $Z_{FR}$  为 F 线和钢轨的单位互阻抗。

由式 1 可得到

$$\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{T2}, \quad \dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} = \frac{X}{D} \dot{I}, \quad \dot{I}_{g3} = \frac{X}{D} \dot{I} + 2\dot{I}_0 \quad (2)$$

对 AT 所和分区所的自耦变压器有如下公式:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} \\ \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F1} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g3} \\ \dot{I}_{F2} - \dot{I}_{F1} = \frac{1}{2} \dot{I}_{g3} \end{cases} \quad (3)$$

由式 2、3 可以推导出分区所、AT 所和变电所

的电流等式如下:

$$\begin{cases} \dot{I}T_1 = \dot{I}T_2 = \frac{1}{4}(\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3}) \\ \dot{I}F_1 = \dot{I}F_2 = \frac{1}{2}\dot{I} - \frac{1}{4}(\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3}) \end{cases} \begin{cases} \dot{I}T_1' = \dot{I}T_2' = \frac{1}{4}\dot{I}_{g2} \\ \dot{I}F_1' = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}\dot{I}_{g2} - \frac{D-X}{D}\dot{I}) \\ \dot{I}F_2' = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}\dot{I}_{g2} + \frac{D-X}{D}\dot{I}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}T_1'' = \dot{I}T_2'' = \frac{1}{4}\dot{I}_{g3} \\ \dot{I}F_1'' = \frac{1}{2}(\frac{X}{D}\dot{I} - \frac{1}{2}\dot{I}_{g3}) \\ \dot{I}F_2'' = \frac{1}{2}(\frac{X}{D}\dot{I} + \frac{1}{2}\dot{I}_{g3}) \end{cases} \quad (4)$$

同理可以得出, 当接触网在变电所和 AT 所之间 F-R 短路故障时 (如图 2 所示), 分区所、AT 所

和变电所的电流等式如下:

$$\begin{cases} \dot{I}T_1 = \dot{I}T_2 = \frac{1}{4}(\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3}) \\ \dot{I}F_1 = \frac{1}{2}\left[\frac{X}{D}\dot{I} - \frac{1}{2}(\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3})\right] \\ \dot{I}F_2 = \frac{1}{2}\left[\frac{2D-X}{D}\dot{I} - \frac{1}{2}(\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3})\right] \end{cases} \begin{cases} \dot{I}T_1' = \dot{I}T_2' = \frac{1}{4}\dot{I}_{g2} \\ \dot{I}F_1' = \frac{1}{2}(\frac{X}{D}\dot{I} - \frac{1}{2}\dot{I}_{g2}) \\ \dot{I}F_2' = \frac{1}{2}(\frac{X}{D}\dot{I} + \frac{1}{2}\dot{I}_{g2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}T_1'' = \dot{I}T_2'' = \frac{1}{4}\dot{I}_{g3} \\ \dot{I}F_1'' = \dot{I}F_2'' = \frac{1}{4}\dot{I}_{g3} \end{cases} \quad (5)$$

接触线对钢轨故障即 T-R 故障时的电流推导过程与 F-R 故障类似, 此处不再赘述。

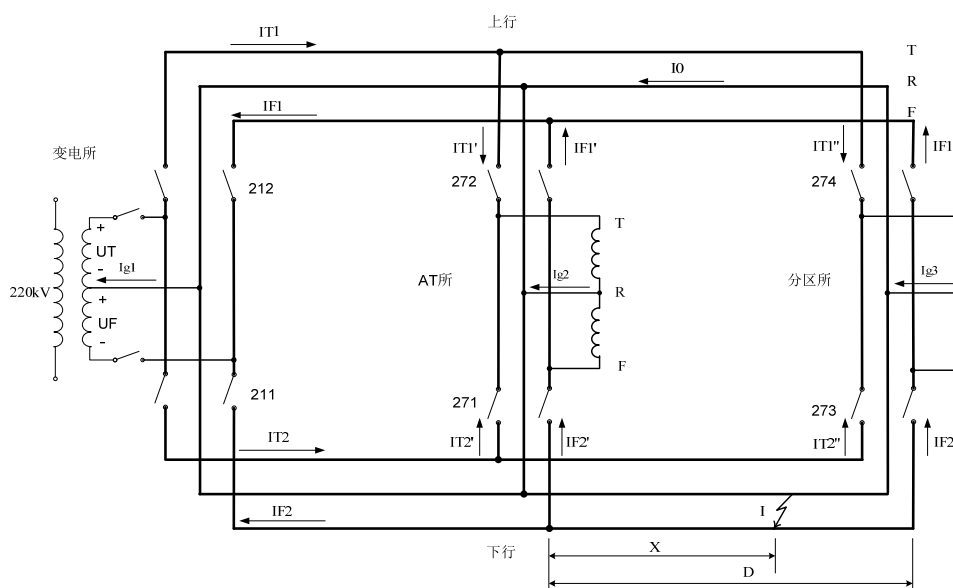


图 1 AT 所和分区所之间发生 F-R 短路故障时的电流示意图

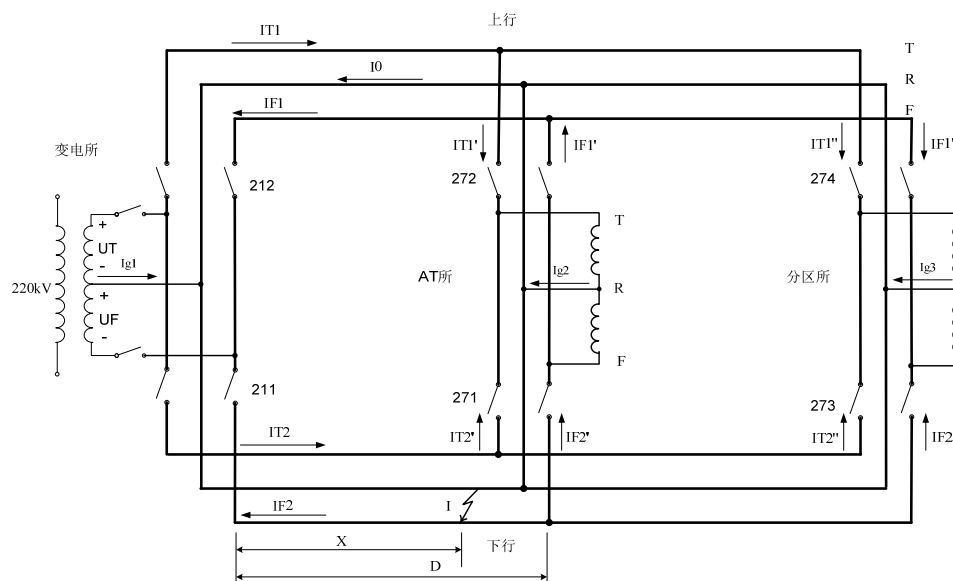


图 2 变电所和 AT 所之间发生 F-R 短路故障时的电流示意图

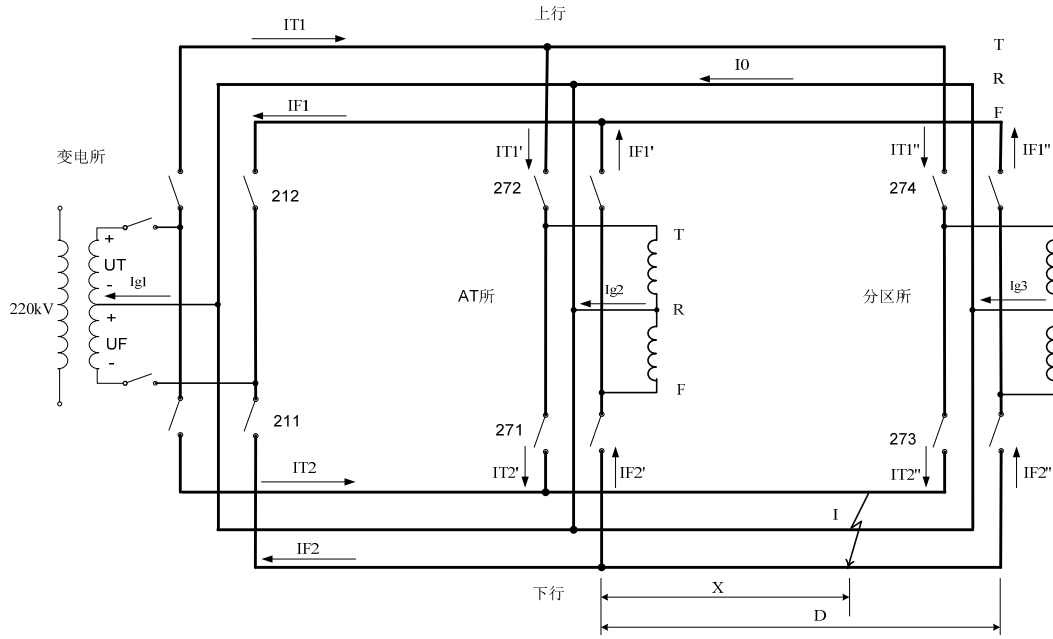


图 3 AT 所和分区所之间发生 T-F 短路故障时的电流示意图

## 1.2 T-F 故障分析

短路类型为 T-F 故障时（如图 3），假设故障点在下行线路上，AT 所和分区所之间的网孔电压方程如下：

$$\begin{cases} (\dot{I}_{T1}' + \dot{I}_{T2}')Z_T D - (\dot{I}_{F1}' + \dot{I}_{F2}')Z_{TF} D + [(2\dot{I}_{T1}' - 2\dot{I}_{T2}') - 2\dot{I}_0]Z_{TR} D = \dot{I}(Z_T - Z_{TF})X \\ (\dot{I}_{T1}' + \dot{I}_{T2}')Z_{TR} D - (\dot{I}_{F1}' + \dot{I}_{F2}')Z_{FR} D + [(2\dot{I}_{T1}' - 2\dot{I}_{T2}') - 2\dot{I}_0]Z_R D = \dot{I}(Z_{TR} - Z_{FR})X \\ (\dot{I}_{T1}' + \dot{I}_{T2}')Z_{TF} D - (\dot{I}_{F1}' + \dot{I}_{F2}')Z_F D + [(2\dot{I}_{T1}' - 2\dot{I}_{T2}') - 2\dot{I}_0]Z_{FR} D = \dot{I}(Z_{TF} - Z_F)X \end{cases} \quad (6)$$

由式 6 可得到

$$\dot{I}_{T1}' - \dot{I}_{T2}' = \dot{I}_0, \quad \dot{I}_{T1}' + \dot{I}_{T2}' = \dot{I}_{F1}' + \dot{I}_{F2}' = \frac{X}{D} \dot{I} \quad (7)$$

对 AT 所和分区所的自耦变压器有如下公式：

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}' - \dot{I}_{T2}' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} \\ \dot{I}_{F1}' - \dot{I}_{F2}' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g3} \end{cases} \quad (8)$$

由式 7、8 可以推导出如下关系式：

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}' = \dot{I}_{T2}' = \frac{1}{2}(\dot{I} + \frac{1}{2}\dot{I}_{g1}) \\ \dot{I}_{F1}' = \dot{I}_{F2}' = \frac{1}{2}(\dot{I} - \frac{1}{2}\dot{I}_{g1}) \end{cases} \quad (9)$$

## 2 故障类型和方向判别方法

### 2.1 判别方法

当 AT 所和分区所之间发生 T-R 或者 F-R 类型

的短路故障时，从公式 4 可以看出故障点两侧的 AT

所和分区所的 AT 吸上电流之和  $\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3} = 4\dot{I}_{T1}'$ ，又由

于变电所处吸上电流  $\dot{I}_{g1}$  很小， $\dot{I}_{T1}'$  与  $\dot{I}_{F1}'$  近似相等，

则  $\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3} \approx \dot{I}$ 。

当  $X < D/2$  时，即故障点位于 AT 所到分区所之间区段的前半段时，根据吸上电流比测距原理，有

$\dot{I}_{g2} > \dot{I}_{g3}$ ，令  $I_{\max} = \max\{\dot{I}_{T1}', \dot{I}_{T2}', \dot{I}_{F1}', \dot{I}_{F2}'\}$ ，此时若故障类型

为 F-R 故障，故障方向在下行线路上， $I_{\max} = \dot{I}_{F2}'$ ；

同理可以得出，当故障类型为 T-R 故障，故障方向在上行线路上时有  $I_{\max} = \dot{I}_{T1}'$  成立；当故障类型为 F-R 故障，故障方向在上行线路上时有  $I_{\max} = \dot{I}_{F1}'$  成立；当故障类型为 T-R 故障，故障方向在下行线路上有  $I_{\max} = \dot{I}_{T2}'$  成立。

反之，当  $X > D/2$  时，故障点位于 AT 所到分区所之间区段的后半段时，根据吸上电流比测距原理，有  $\dot{I}_{g2} < \dot{I}_{g3}$ ，令  $I_{\max} = \max\{\dot{I}_{T1}', \dot{I}_{T2}', \dot{I}_{F1}', \dot{I}_{F2}'\}$ ，若  $I_{\max} = \dot{I}_{T1}'$ ，则故障类型为 T-R 故障，故障方向在上行线路上；

若  $I_{\max} = I_{F1}$ , 则故障类型为 F-R 故障, 故障方向在上

行线路上; 若  $I_{\max} = I_{T2}$ , 则故障类型为 T-R 故障, 故

障方向在下行线路上; 若  $I_{\max} = I_{F2}$ , 则故障类型为 F-R

故障, 故障方向在下行线路上。

同理, 当故障发生在变电所和 AT 所之间时, 从公式 5 也可得出上述结论, 即当故障发生在变电所和 AT 所之间的前半段时, 变电所的 4 个电流的最大值  $I_{\max} = \max\{I_{T1}, I_{T2}, I_{F1}, I_{F2}\}$  所在线路即为故障线路; 当故障发生在变电所和 AT 所之间的后半段时, AT 所的 4 个电流的最大值  $I_{\max} = \max\{I_{T1}, I_{T2}, I_{F1}, I_{F2}\}$  所在线路即为故障线路。

故障类型为 T-F 短路时, 由于 AT 自耦变的漏抗很小,  $\dot{I}_{g1}, \dot{I}_{g2}, \dot{I}_{g3}$  的值很小, 一般在几十到几百安左右, 由公式 9 可以看出, 当故障点在上行线路上

时,  $|\dot{I}_{T1}'| < |\dot{I}_{T2}'|$ ; 反之当故障点在下行线路上时,  $|\dot{I}_{T1}'| > |\dot{I}_{T2}'|$ 。可以根据此特征来判别 AT 所和分区所之间发生 T-F 短路时的线路故障方向。

## 2.2 故障类型和方向判别流程图

见图 4。

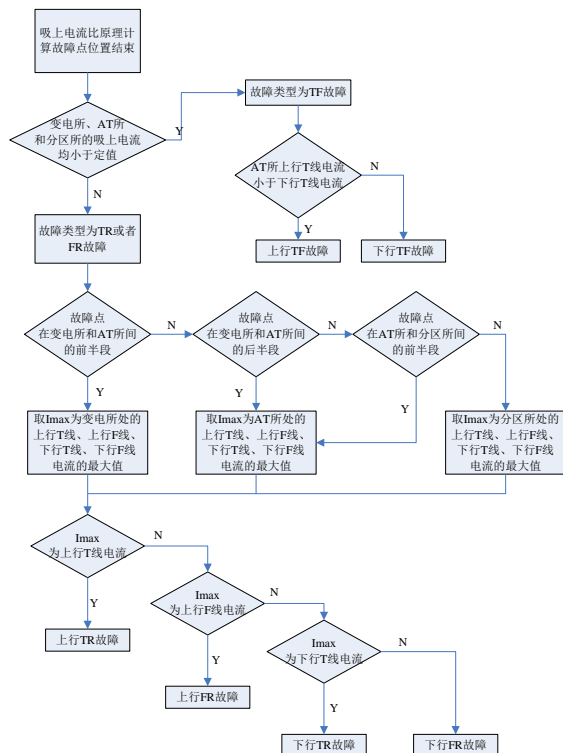


图 4 故障类型和方向判别流程图

## 3 结论

通过上述理论分析, 可以得出以下结论:

当接触网故障发生在 AT 所和分区所之间时, 变电所处的上行和下行线路的 T 线和 F 线电流几近相等, 无法通过变电所处的电压和电流来区分故障类型和故障方向。可根据故障点位置的不同, 通过故障点两侧的变电所、AT 所或者分区所的上行和下行 T 线及 F 线电流的有效值的大小来区分故障类型和方向。比较每个所亭采集的上下行 T 线和 F 线电流这 4 个电流有效值, 故障线路即是离故障点最近的所亭的 4 个电流中最大电流所在的线路。此判别方法不涉及矢量和角度的计算, 简单易行; 且无需增加额外的电流和电压互感器, 所涉及的电流均可直接采集; 该方法可与吸上电流比测距原理配合, 弥补吸上电流比测距原理只能提供故障点距离, 却无法判别故障类型和方向的缺陷。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [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.

## 作者简介:

王 丹(1979-), 女, 江苏大丰人, 工程师, 从事继电保护测控装置研发方面的工作, E-mail: sherly\_wang@163.com;

范三龙(1971-) 男, 河南焦作人, 工程师, 从事铁路供电变电站自动化方面的工作;

孙金华(1975-), 女, 江西吉水人, 工程师, 从事继电保护测控装置研发方面的工作。