

高速铁路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:全并联自耦变压器(AT)供电方式是目前高速铁路采用的一种供电方式,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所和分区所接触线和正馈线电流有效值的大小来区分故障类型和方向的方法。该方法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

中图分类号:U226.5

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)05-0042-04

全并联自耦变压器(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组成部分,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比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:(1)只通过各变电所、AT所和分区所采集的吸上电流来区分接触线对正馈线故障(T-F故障)还是接触线对钢轨故障(T-R故障)或正馈线对钢轨故障(F-R故障)是可行的,但是用其来判断故障方向是不可行的^[1]。(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-R故障和F-R故障^[2]。(3)有作者提出采用故障点两侧所停的上下行并联线上的T线和F线电流矢量差 $\dot{I}_{FH}-\dot{I}_{TH}$ 的方向来判定故障方向^[2],但由于目前高速电气化铁路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 $\dot{I}_{FH}-\dot{I}_{TH}$,计算繁复,无法实现故障方向的准确判断。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,根据故障点位置的不同,提出了区分故障类型和方向的方法。

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,文中在不考虑钢轨泄漏电流、地中回流,并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进行了分析。

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。

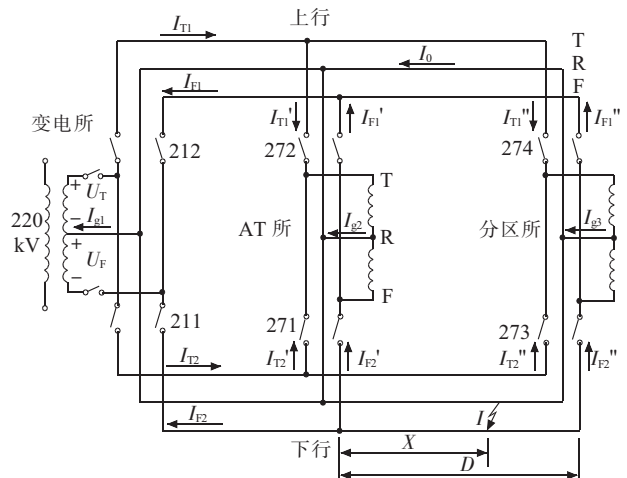


图1 AT所和分区所之间发生F-R短路故障时的电流

图1中AT所和分区所之间的网孔电压方程如式(1)所示:

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

式中: 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_{TF} 为T线和F线的单位互阻抗; $i_{T1}, i_{F1}, i_{T2}, i_{F2}$ 分别为AT所处上行和下行的T线和F线电流; $i_{T1}', i_{F1}', i_{T2}', i_{F2}'$ 分别为变电所处上行和下行的T线和F线电流; $i_{T1}'', i_{F1}'', i_{T2}'', i_{F2}''$ 分别为分区所处上行和下行的T线和F线电流; i_{g1}, i_{g2}, i_{g3} 分别为变电所、AT所和分区所的变压器吸上电流; i 为下行短路点处的故障电流; i_0 为AT所与分区所间上行线路的轨道回流; X 为短路点至AT所的距离; D 为AT所至分区所的距离。由式(1)可得到:

$$i_{T1}'' = i_{T2}'' \quad (2)$$

$$i_{F1}'' + i_{F2}'' = \frac{X}{D} i \quad (3)$$

$$i_{g3} = \frac{X}{D} i + 2i_0 \quad (4)$$

对AT所和分区所的AT有如下公式:

$$\begin{cases} i_{T1}' + i_{T2}' = \frac{1}{2} i_{g2} \\ i_{F1}' + i_{F2}' = \frac{1}{2} i_{g2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{T1}'' + i_{T2}'' = \frac{1}{2} i_{g3} \\ i_{F2}'' - i_{F1}'' = \frac{1}{2} i_{g3} \end{cases} \quad (6)$$

由式(2—6)可以推导出分区所、AT所和变电所的电流等式如下:

$$\begin{cases} i_{T1} = i_{T2} = \frac{1}{4} (i_{g2} + i_{g3}) \\ i_{F1} = i_{F2} = \frac{1}{2} i - \frac{1}{4} (i_{g2} + i_{g3}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{T1}' = i_{T2}' = \frac{1}{4} i_{g2} \\ i_{F1}' = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} i_{g2} - \frac{D-X}{D} i \right) \\ i_{F2}' = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} i_{g2} + \frac{D-X}{D} i \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} i_{T1}'' = i_{T2}'' = \frac{1}{4} i_{g3} \\ i_{F1}'' = \frac{1}{2} \left(\frac{X}{D} i - \frac{1}{2} i_{g3} \right) \\ i_{F2}'' = \frac{1}{2} \left(\frac{X}{D} i + \frac{1}{2} i_{g3} \right) \end{cases} \quad (9)$$

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), i_0 为变电所与AT所间上行线路的轨道回流; X 为短路点至变电所的距离; D 为变电所至AT所的距离。同理可以得出,分区所、AT所和变电所的电流等式如下:

$$\begin{cases} i_{T1} = i_{T2} = \frac{1}{4} (i_{g2} + i_{g3}) \\ i_{F1} = \frac{1}{2} \left[\frac{X}{D} i - \frac{1}{2} (i_{g2} + i_{g3}) \right] \\ i_{F2} = \frac{1}{2} \left[\frac{2D-X}{D} i - \frac{1}{2} (i_{g2} + i_{g3}) \right] \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} i_{T1}' = i_{T2}' = \frac{1}{4} i_{g2} \\ i_{F1}' = \frac{1}{2} \left(\frac{X}{D} i - \frac{1}{2} i_{g2} \right) \\ i_{F2}' = \frac{1}{2} \left(\frac{X}{D} i + \frac{1}{2} i_{g2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{T1}'' = i_{T2}'' = \frac{1}{4} i_{g3} \\ i_{F1}'' = i_{F2}'' = \frac{1}{4} i_{g3} \end{cases} \quad (12)$$

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。

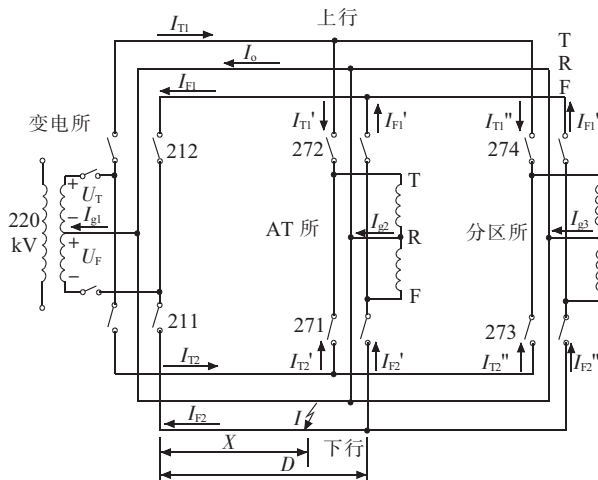


图2 变电所和AT所之间发生F-R短路故障时的电流

1.2 T-F故障分析

短路类型为T-F故障时(如图3所示),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:

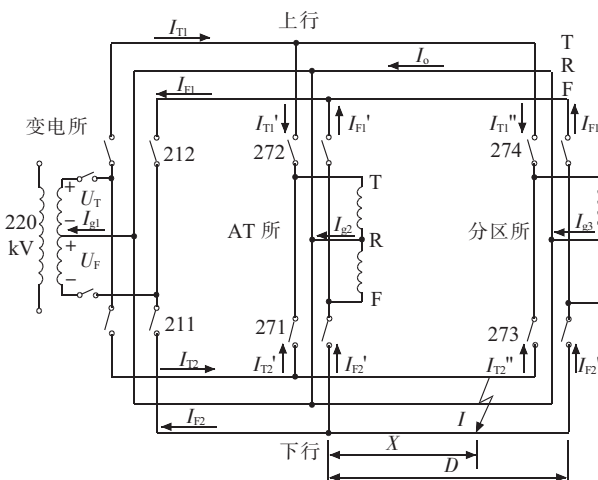


图3 AT所和分区所之间发生T-F短路故障时的电流

$$\begin{cases} (\dot{I}_{T1}'' + \dot{I}_{T2}'')Z_T D - (\dot{I}_{F1}'' + \dot{I}_{F2}'')Z_{TF} D + \\ [(2\dot{I}_{T1}'' - 2\dot{I}_{T2}'') - 2\dot{I}_0]Z_{TR} D = \dot{I}(Z_T - Z_{TF})X \\ (\dot{I}_{T1}'' + \dot{I}_{T2}'')Z_{TR} D - (\dot{I}_{F1}'' + \dot{I}_{F2}'')Z_{FR} D + \\ [(2\dot{I}_{T1}'' - 2\dot{I}_{T2}'') - 2\dot{I}_0]Z_R D = \dot{I}(Z_{TR} - Z_{FR})X \\ (\dot{I}_{T1}'' + \dot{I}_{T2}'')Z_{TF} D - (\dot{I}_{F1}'' + \dot{I}_{F2}'')Z_F D + \\ [(2\dot{I}_{T1}'' - 2\dot{I}_{T2}'') - 2\dot{I}_0]Z_{FR} D = \dot{I}(Z_{TF} - Z_F)X \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可得到:

$$\dot{I}_{T1}'' - \dot{I}_{T2}'' = \dot{I}_0 \quad (14)$$

$$\dot{I}_{T1}'' + \dot{I}_{T2}'' = \dot{I}_{F1}'' + \dot{I}_{F2}'' = \frac{X}{D} \dot{I} \quad (15)$$

对 AT 所和分区所的 AT 有如下公式:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}' - \dot{I}_{T2}' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} \\ \dot{I}_{F2}' - \dot{I}_{F1}' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g2} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}'' - \dot{I}_{T2}'' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g3} \\ \dot{I}_{F2}'' - \dot{I}_{F1}'' = \frac{1}{2} \dot{I}_{g3} \end{cases} \quad (17)$$

由式(14)至式(17)可以推导出如下关系式:

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1} = \dot{I}_{T2} = \frac{1}{2} (\dot{I} + \frac{1}{2} \dot{I}_{g1}) \\ \dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \frac{1}{2} (\dot{I} - \frac{1}{2} \dot{I}_{g1}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}' = \dot{I}_{F2}' = \frac{1}{2} (\frac{D-X}{D} \dot{I} + \frac{1}{2} \dot{I}_{g2}) \\ \dot{I}_{T2}' = \dot{I}_{F1}' = \frac{1}{2} (\frac{D-X}{D} \dot{I} - \frac{1}{2} \dot{I}_{g2}) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{T1}'' = \dot{I}_{F2}'' = \frac{1}{2} (\frac{X}{D} \dot{I} + \frac{1}{2} \dot{I}_{g3}) \\ \dot{I}_{T2}'' = \dot{I}_{F1}'' = \frac{1}{2} (\frac{X}{D} \dot{I} - \frac{1}{2} \dot{I}_{g3}) \end{cases} \quad (20)$$

2 故障类型和方向判别方法

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,从式(7)可以看出故障点两侧的 AT 所和分区所的 AT 吸上电流之和为变电所上行 T 线电流的 4 倍,即:

$$\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3} = 4\dot{I}_{T1} \quad (21)$$

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,则有以下公式成立:

$$\dot{I}_{g2} + \dot{I}_{g3} \approx \dot{I} \quad (22)$$

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^[3],有 $\dot{I}_{g2} >$

\dot{I}_{g3} 成立,令:

$$I_{\max} = \max\{\dot{I}_{T1}', \dot{I}_{T2}', \dot{I}_{F1}', \dot{I}_{F2}'\} \quad (23)$$

若故障类型为 F-R 故障,故障方向在下行线路上, I_{\max} 与 AT 所下行 F 线电流 \dot{I}_{F2}' 相等;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} 与上行线路 T 线电流 \dot{I}_{T1}' 相等;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:

$$I_{\max} = \max\{\dot{I}_{T1}'', \dot{I}_{T2}'', \dot{I}_{F1}'', \dot{I}_{F2}''\} \quad (24)$$

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 $I_{\max} = \dot{I}_{F1}''$,则故障类型为 F-R 故障,故障方向在上行线路上;若 $I_{\max} = \dot{I}_{T2}''$,则故障类型为 T-R 故障,故障方向在下行线路上;若 $I_{\max} = \dot{I}_{F2}''$,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,从式(10)至式(12)也可得出上述结论: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 \dot{I}_{T1} , \dot{I}_{T2} , \dot{I}_{F1} , \dot{I}_{F2} 中的最大值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 \dot{I}_{T1}' , \dot{I}_{T2}' , \dot{I}_{F1}' , \dot{I}_{F2}' 中的最大值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} 和 \dot{I}_{g3} 的值很小,一般在几十到几百安左右,由式(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。故障类型和方向判别流程如图 4 所示。

3 实际跳闸案例

上述推导出的故障类型和方向的判别方法,已经运用到多条高铁供电线路的测距装置中,实际的跳闸测距报告如表 1 所示。

从表 1 可以看出,比较变电所、AT 所和分区所 3 处的吸上电流,变电所吸上电流最小,所以故障应该是

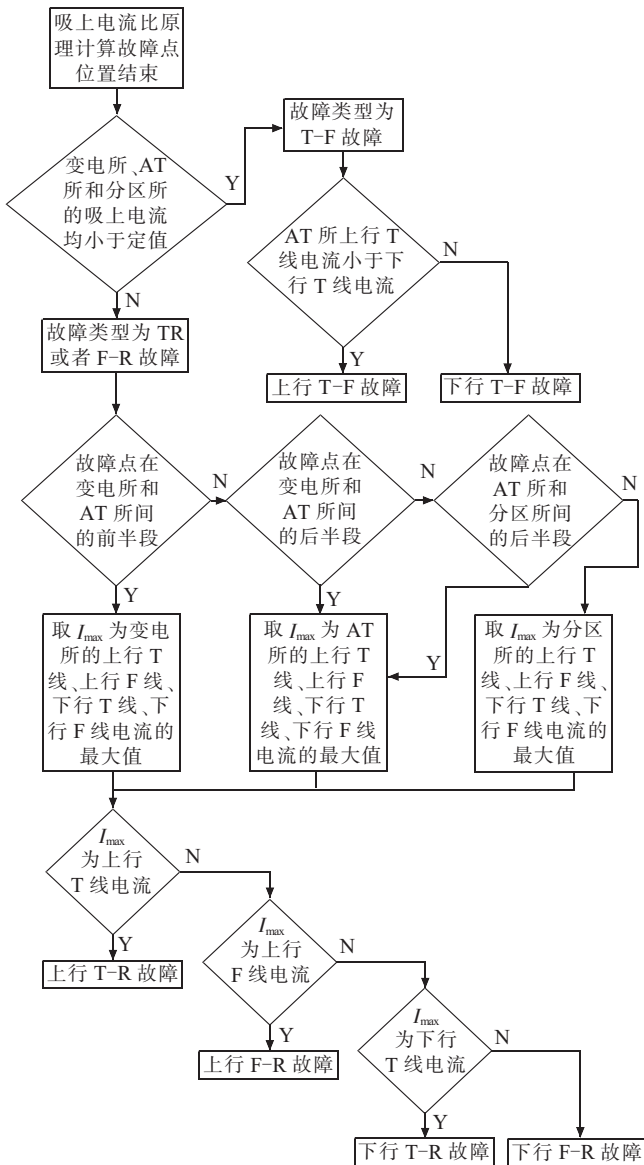


图4 故障类型和方向判别流程

在AT所和分区所之间,且是靠近分区所处;比较分区所处T、F线电流,最大值为上行T线电流,那么故障应该是上行T线对钢轨故障。而实际线路发生的故障正是分区所附近的上行T-R类型故障。

4 结束语

通过上述理论分析,可以得出以下结论:(1) 当接

表1 某高铁牵引变电所跳闸测距报告 A

电量名称	变电所	AT所	分区所
上行T线电流	1 145	1 055	1 782
上行F线电流	860	322	532
下行T线电流	1 134	409	719
下行F线电流	859	324	530
AT吸上电流	561	1 293	2 124

故障类型为AT所至分区所上行,T-R类型短路

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。(2) 推导出不同故障类型下,供电网络中各变电所、AT所和分区所的T线、F线电流以及自耦变吸上电流与故障电流的关系表达式。为故障分析提供有力的理论依据。(3) 提出的故障类型和方向判别方法,根据故障点位置的不同,通过比较变电所、AT所或分区所的上行和下行T线及F线电流有效值的大小来区分故障类型和方向,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,所涉及的电流量均可直接采集。(4) 该判别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:西南交通大学博士学位论文,2010.
 [2] 王继芳.全并联AT供电牵引网故障测距研究[D].成都:西南交通大学硕士学位论文,2006.
 [3] 贺威俊.晶体管与计算机继电保护原理[M].成都:西南交通大学出版社,1990.

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;
 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。

Method for Fault Type and Direction Judgment of High-speed Railway

WANG Dan, FAN San-long, SUN Jin-hua

(Guodian Nanjing Automation Co.Ltd., Nanjing 210032,China)

Abstract: Parallel connected double-track-lines based auto-transformer(AT) is a common way to supply power to high-speed railway (HSR). The distribution of current and its relation with the current of fault site are formulized for different faults. A method to identify fault type and its direction base on the comparison of the virtual values at Traction Substation, AT Post and Subsection Post is proposed for various faults. The proposed method combines the principal of "AT neutral current ratios", which is effective to identify fault's type and direction accurately which is valuable for power supply restoration.

Key words: high-speed railway; contact system fault; AT neutral current ratios; fault type and location judgment