

全并联 AT 供电牵引网断线接地阻抗计算与分析

徐红红¹, 陈小川¹, 张雷², 刘航¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 铁道第四勘察设计院电化处, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对客运专线全并联 AT 供电牵引网发生断线接地故障时馈线保护装置拒动这一现象, 利用电路基本原理, 采用数学方法对全并联 AT 供电牵引网断线接地的阻抗进行了理论上的推导计算, 将其与短路故障的阻抗进行比较分析, 得出断线接地故障是一种高阻接地故障, 远远大于短路时的阻抗, 超出了馈线保护阻抗的整定值。并利用 Matlab/Simulink 软件建立牵引网故障模型并进行了仿真验证, 证明了本文理论推导的正确性, 从而找到了发生断线接地故障时馈线保护装置拒动的原因。

关键词: 全并联 AT 供电; 断线接地故障; 测量阻抗; 馈线保护

Calculation and simulation of the impedance of grounding fault with interruption in all-parallel AT traction network

XU Hong-hong¹, CHEN Xiao-chuan¹, ZHANG Lei², LIU Hang¹,

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. The Fourth Survey and Design Institute of China Railways, Wuhan 430063, China)

Abstract: The feeding-line protection equipment would not operate when the all-parallel AT traction network is interrupted with grounding. Aiming at the phenomena, the impedance of the fault is analysed and calculated by circuit knowledge and mathematics method. It is compared to the impedance of short fault. The fault is a high-impedance grounding one. The impedance value is too much bigger than the short fault's. The equipment don't operate because it is out of the fixed value of feeding-line protection. The result is simulated and validated by Matlab/Simulink.

Key words: all-parallel AT traction system; the complex grounding fault with interruption; measured impedance; feeding-line protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0006-04

0 引言

客运专线的牵引供电系统与电力系统相比具有牵引网结构复杂、方式多变等特点, 加之电力机车的受电, 是在露天条件下, 通过受电弓和接触网之间的滑动来实现的, 这就决定了接触网工作条件的恶劣性和故障的易发性。牵引网的故障主要有金属性短路故障和高阻短路故障, 断线接地故障是一种高阻短路故障。常规的馈线保护装置以距离保护作为主保护, 对金属性短路故障能可靠动作, 但是由于断线接地故障的测量阻抗的特殊性, 使得馈线保护装置容易发生误动或拒动。因此, 对断线接地故障的阻抗进行推导计算与分析, 具有重要的现实意义。

1 全并联 AT 供电方式

客运专线列车运行速度快、行车密度大, 要求列车牵引功率大、供电分区尽量少、可靠性高。全

并联 AT 供电方式由于受流大、供电区段长、适应高速、可靠性更高的特点, 而受到人们青睐。全并联 AT 供电方式是在复线 AT 供电方式的基础上, 将上下行牵引网的接触线 (T)、钢轨 (R) 和正馈线 (F) 在变电所出线处及 AT 所处通过横联线并联起来, 具体形式如图 1 所示。

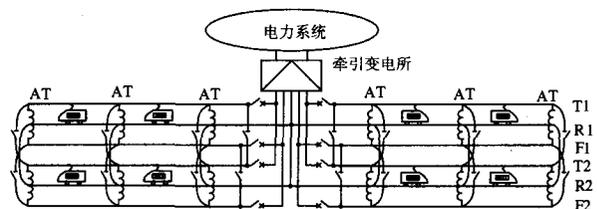


图 1 全并联 AT 供电方式示意图

Fig.1 All parallel AT traction power supply system

2 全并联 AT 馈线断线接地阻抗计算

馈线 F 断线接地有两种情况, 一种是靠近电源侧的端头接地, 另一个端头悬空; 另一种情况是远离

电源侧的端头接地, 靠近电源侧的端头悬空。由于全并联电路网络的复杂性和对称性, 电源侧接地和非电源侧接地两种情况的计算方法是一致的。本文以电源侧接地、非电源侧悬空为例进行阻抗推导计算。

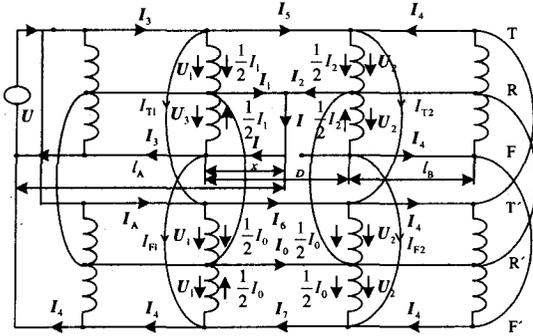


图 2 全并联 AT 馈线 (F) 断线接地

Fig 2 All-parallel AT traction system in grounding fault with interruption

假设自耦变压器为理想变压器, 接地为金属性接地, 忽略上下行之间的互感和钢轨的漏抗, 全并联 AT 牵引网发生断线接地情况下的电流分布规律和电压关系如图 2 所示。\$l_A\$ 为变电所到 AT 侧 (故障点靠近变电所侧的 AT) 的距离, km; \$x\$ 为 AT (故障点靠近变电所侧的 AT) 到故障点的距离, km; \$D\$ 为故障点所在 AT 段的长度, km; \$l_b\$ 为故障点远离变电所侧的 AT 到供电臂末端的距离, km; \$Z_T\$、\$Z_R\$、\$Z_F\$、\$Z_{TR}\$、\$Z_{RF}\$、\$Z_{TF}\$ 分别为接触线 (T)、钢轨 (R) 和正馈线 (F) 的单位自阻抗及它们之间的单位互阻抗, \$\Omega\$/km。

列节点电流方程得

$$\begin{cases} I_3 = I_5 + \frac{1}{2} I_1 + I_{T1} \\ I_5 = \frac{1}{2} I_2 + I_{T2} \\ \frac{1}{2} I_1 + I_3 + I_{F1} = I \\ I_4 + I_{T1} = I_6 + \frac{1}{2} I_0 \\ I_6 + I_{T2} + \frac{1}{2} I_0 = 0 \\ I_4 + \frac{1}{2} I_0 = I_{F1} + I_7 \\ 2I_7 = I_0 - I_2 \\ I_1 + I_2 = I \\ I_3 = I_4 \\ 2I_{F2} = -I_2 \end{cases} \quad (1)$$

列网孔电压方程得

$$\begin{cases} -U_1 + I_5 Z_T D + I_1 Z_{TR} x - I_2 Z_{TR} (D-x) - \\ I Z_{TF} x + U_2 + I_2 Z_R (D-x) - I_5 Z_{TR} (D-x) - \\ I_1 Z_R x - I_5 Z_{TR} x + I Z_{RF} x = 0 \\ -U_1 + I_1 Z_R x + I_5 Z_{TR} x - I Z_{RF} x + I Z_F x - \\ I_1 Z_{RF} x - I_5 Z_{TF} x = 0 \\ -U + I_3 Z_T l_A - I_3 Z_{TF} l_A + 2U_1 + I_3 Z_F l_A - \\ I_3 Z_{TF} l_A = 0 \\ -U_1 + I_6 Z_T D + I_0 Z_{TR} D - I_7 Z_{TF} D + U_2 - \\ I_0 Z_R D - I_6 Z_{TR} D + I_7 Z_{RF} D = 0 \\ -U_1 + I_0 Z_R D + I_6 Z_{TR} D - I_7 Z_{RF} D + U_2 + \\ I_7 Z_F D - I_0 Z_{RF} D - I_6 Z_{TF} D = 0 \\ I_5 Z_T D + I_1 Z_{TR} x - I_2 Z_{TR} (D-x) - I Z_{TF} x = \\ I_6 Z_T D + I_0 Z_{TR} D - I_7 Z_{RF} D \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{设} \begin{cases} Z_A = Z_T + Z_F - 2Z_{TF} \\ Z_B = Z_F + Z_R - 2Z_{FR} \\ Z_C = Z_R - Z_{TR} - Z_{RF} + Z_{TF} \\ Z_D = Z_T + Z_R - 2Z_{TR} \end{cases}$$

化简方程组 (2) 得

$$\begin{cases} U_1 - U_2 = -I x Z_C + \frac{1}{2} I_2 D [Z_D + (Z_R - Z_{TR})] + \\ I_{T2} D (Z_T - Z_{TR}) \\ U_1 = I Z_B x - I_2 x \left[Z_C - \frac{1}{2} (Z_{TF} - Z_{TR}) \right] + \\ I_{T2} x (Z_{TR} - Z_{TF}) \\ U - 2U_1 = \frac{1}{4} I Z_A l_A \\ U_1 - U_2 = -\frac{1}{2} I_0 D (Z_C + Z_D) + \frac{1}{2} I_2 D x \\ (Z_{TF} - Z_{RF}) + I_{T2} D (Z_{TR} - Z_T) \\ U_1 - U_2 = \frac{1}{2} I_0 D (Z_B + Z_C) + \frac{1}{2} I_2 D x \\ (Z_{RF} - Z_F) + I_{T2} D (Z_{TF} - Z_{TR}) \\ I_2 D (Z_T - 2Z_{TR} - Z_{TF}) + I_0 D x \\ (Z_T - 2Z_{TR} + Z_{TF}) - 2I x (Z_{TF} - Z_{TR}) + \\ 4I_{T2} D = 0 \end{cases} \quad (3)$$

设 \$Z_1\$、\$Z_2\$、\$Z_3\$、\$Z_4\$、\$Z_5\$、\$Z_6\$、\$Z_7\$、\$Z_8\$ 的含义如下:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_F + Z_{TF} - 2Z_{RF} \\ Z_2 = \frac{1}{2}(Z_C + Z_D) \\ Z_3 = Z_B + 2Z_C + Z_D \\ Z_4 = Z_C + Z_D + 2Z_{RF} - 2Z_{TF} \\ Z_5 = Z_T - 2Z_{TR} - Z_{TF} \\ Z_6 = Z_T - 2Z_{TR} + Z_{TF} \\ Z_7 = Z_{TF} - Z_{TR} \\ Z_8 = Z_R + Z_C - Z_{RF} \end{cases} \quad (4)$$

解方程组 (1) 和 (3) 得变电所处测得的阻抗值为:

$$Z_{SS} = \frac{U}{\frac{1}{-I}} = Z_A l_A + 8Z_B x - \frac{8x^2 Z_3 Z_7 (2Z_C - Z_7)}{D(Z_3 Z_5 + Z_4 Z_6)} + \left[\frac{Z_3 (2Z_3 + Z_2 Z_6)}{Z_3 Z_5 + Z_4 Z_6} - Z_7 \right] \cdot \frac{4x^2 Z_3 Z_4 Z_7 + 2x(Z_3 Z_5 + Z_4 Z_6) [D(Z_C + Z_D) - 2xZ_C]}{D[4(2Z_3 + Z_2 Z_6) - 2Z_T(Z_3 Z_5 + Z_4 Z_6)]} \quad (5)$$

3 断线故障的阻抗与短路故障的阻抗比较

根据文献[1]提供的常规短路故障的公式, 牵引变电所 ($l_A + x$) 的牵引网 T-R 短路阻抗, 则可求得短路阻抗为:

$$Z_{SST-R} = 2l_A \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) + 4x \left[Z_1 + Z_2 - x \frac{Z_3(Z_1 + Z_2) + Z_2(Z_1 + 2Z_2)}{2D(Z_2 + Z_3)} \right] \quad (6)$$

此时 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 表示的意义如下:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{1}{2}(Z_T + Z_{RF} - Z_{TR} - Z_{TF}) \\ Z_2 = Z_R + \frac{1}{2}(Z_T + Z_{TF} - Z_{RF} - 3Z_{TR}) \\ Z_3 = \frac{1}{4}(Z_F - Z_T) + \frac{1}{2}(Z_{TR} - Z_{RF}) \end{cases} \quad (7)$$

F-R 短路的故障分析与 T-R 短路的故障分析基本相同, 因此, F-R 短路阻抗表达式与 T-R 表达式相同, 只是在当量等值电路分析时将等值阻抗的参数 T 和 F 互换。

当 T-F 短路时, 可忽略钢轨电流, 从实际的牵引网电流网络中求得:

$$Z_{SST-F} = \frac{1}{2} Z_A \left[l_A + \frac{(2D-x)x}{D} \right] \quad (8)$$

运用 Matlab 计算出 AT 牵引网在 F 断线和短路故障下的阻抗特性曲线。图 3 中 Z_{cut} 是断线后的计算阻抗值, Z_{t-r} 是 T 和 R 短路的计算阻抗值, Z_{t-f} 是 T 和 F 的短路计算阻抗值。(假定牵引网的单位阻抗参数为: $Z_T = 0.146 + j0.580$, $Z_R = 0.211 + j0.553$, $Z_F = 0.319 + j0.738$, $Z_{TR} = 0.051 + j0.310$, $Z_{RF} = 0.050 + j0.312$, $Z_{TF} = 0.050 + j0.401$, 设每个 AT 段的长度分别是 15 km、13 km、14 km、12 km。)

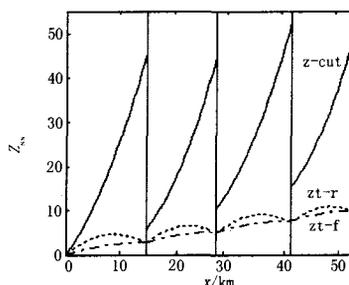


图 3 全并联馈线断线与短路的阻抗曲线

Fig.3 Impedance curve of grounding with interruption and short fault in all-parallel AT traction system

4 仿真验证

牵引网断线接地仿真模型由 4 个模块构成: 牵引网模块、牵引变电所模块、牵引网阻抗测量模块和牵引网断线故障模块。阻抗测量模块在牵引变电所出口处, 测量在短路、断线故障条件下的牵引网阻抗。表 1 统计出了 16 个采样点的理论计算值和仿真值, 把表 1 用图象表示为图 4, data1 指理论计算值, data2 为仿真出的采样的阻抗值, data3 为仿真与理论值间的误差率。

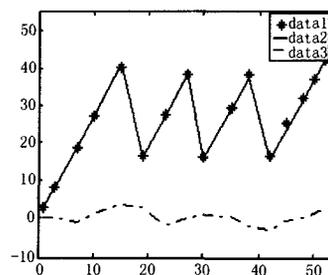


图 4 理论值与仿真值的比较

Fig.4 Comparison between theory value and simulation value

表 1 阻抗的理论值与仿真值

Tab.1 Theory value and simulation value

采样点位置	仿真数据	理论数据	误差量
1	2.6300+	2.6301+	-0.0001+
	5.5340i	5.5339i	0.0001i
3	7.9281+	7.9370+	-0.0089-
	15.7004i	15.7013i	0.0009i
7	18.6232+	18.7400+	-0.1168+
	33.1021i	32.4384i	0.6637i
10	27.1450+	27.0079+	0.1371-
	41.2543i	41.8432i	0.5889i
15	40.2351+	41.1032+	-0.8681-
	49.5231i	51.5217i	1.9986i
19	16.2101+	16.1081+	0.1020+
	17.7925i	17.7058i	0.9133i
23	27.5679+	27.0325+	0.5354+
	43.1567i	42.1366i	1.0201i
27	38.2485+	38.2481+	0.0004+
	51.1354i	51.0326i	0.1028i
30	15.9784+	15.4976+	0.4808-
	24.6452i	25.1722i	0.5270i
35	29.3562+	28.9873+	0.3689-
	45.8645i	46.3612i	0.4967i
38	38.2356+	37.2839+	0.9517+
	56.3245i	55.2199i	1.1046i
42	16.3215+	15.3300+	0.9915+
	21.9872i	21.6720i	0.3152i
45	25.3456+	23.2844+	2.0612-
	36.2345i	37.0355i	0.8010i
48	32.0456+	31.4162+	0.6294-
	48.6587i	49.0262i	0.3675i
50	37.1369+	36.9360+	0.2009-
	54.1236i	55.1461i	1.0225i
52	42.0136+	42.5347+	-0.5211-
	58.1457i	59.7671i	1.6214i

5 结论

(1)通过仿真验证,误差在-3%到5%之间,在误差允许的范围内(模型中的自耦变压器不是理想的),证明了全并联AT断线接地阻抗公式推导的正确性,由断线和短路故障阻抗的特性曲线可以看出,

T和R短路的阻抗成马鞍型递增,T和F短路的阻抗成正比例递增,而断线时的阻抗在每个AT段骤然增大。

(2)通过阻抗计算得出,断线时的阻抗大于短路时的阻抗,甚至可以达到十倍。因此,在AT段的某些地方会超过馈线保护阻抗的整定值,从而会使以距离保护为主保护的馈线保护装置拒动。

(3)通过断线阻抗的计算,可以知道,对于馈线保护仅仅用距离保护是不够的,还要增加针对于断线接地故障的后备保护,如文献[3]中提出的电流增量保护,它可以避开阻抗的关系,用电流的关系来整定,从而达到保护的目。

参考文献

- [1] 王继芳.全并联供电牵引网故障测距研究(硕士学位论文)[D].成都:西南交通大学,2006.
WANG Ji-fang.Research on Fault Location of All-Parallel at Traction System, Thesis[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2006.
- [2] 曾晓红,高仕斌.AT供电牵引网断线接地故障及其馈线保护动作分析[J].铁道学报,18(2):87-91.
ZENG Xiao-hong, GAO Shi-bin.Analysis of Complex Grounding Fault with Interruption and Behavior of Feeder Protection for AT Electric Traction System[J].Journal of the China Railway Society,18(2):97-91
- [3] 高仕斌.高速铁路牵引供电系统新型保护原理研究(博士学位论文)[D].成都:西南交通大学,2004.
GAO Shi-bin.Study on Novel Protection Schemes of Traction Power Supply Systems,Doctoral Dissertation[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004.

收稿日期:2007-07-20; 修回日期:2007-09-11

作者简介:

徐红红(1982-),女,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统继电保护;E-mail:xuhonghong001@163.com

陈小川(1963-),男,教授,主要从事微机保护及其自动化的研究;

张雷(1982-),男,助工,主要从事牵引供变电的研究。

继电器杂志社全体同仁祝广大读者新年快乐!