

基于分相法的牵引供电系统等值阻抗分析及对距离保护的校核

王敬军, 张予鄂, 刘华, 臧睿, 杜凌

(河南省电力公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 电气化铁路负荷是不对称性的负荷, 对于依据序分量法求解电气参数的方法将失效。利用分相法分析了 V/v 型接线电铁牵引变压器的等值阻抗, 并计算了各种短路情况下距离保护的最小感受阻抗, 通过深入分析找到了距离保护感受阻抗的特点, 在对线路距离保护进行整定计算的基础上对距离保护的整定值进行了修正, 防止了距离保护的保护区范围伸出牵引变低压侧, 从而保证了距离保护的选择性。

关键词: V/v 接线; 电铁牵引站; 等值阻抗; 距离保护; 工程应用

Analysis on the equivalent impedances based on respective phase method in traction power supply system for electrified railway and the checkback for line distance protection

WANG Jing-jun, ZHANG Yu-e, LIU Hua, ZANG Rui, DU Ling
(Electric Power of Henan, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The load in electrified railroad is asymmetry, so the method for calculating the electrical parameters based on sequence component will be faulty. This paper analyzes the equivalent impedances of transformer used in electrified railway traction station with V/v structure and the minimum detecting impedances in transmission line distance protection for all kinds of faults. The detecting impedances are found by deeply analysis. And based on the setting calculation of line distance protection, the setting value of distance protection is corrected, so it can prevent the line distance protection from the false action and ensure the selectivity of protection, which is reference valuable for engineering application.

Key words: V/v structure; electrified railway traction station; equivalent impedances; line distance protection; engineering application

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0141-04

2009年河南电网将有7座220 kV电铁牵引站投运, 考虑到电气化铁路是两相供电系统, 因此按照序分量计算的电气参量不再适用。本文针对即将投运的电铁牵引站具体接线形式, 分析了V/v接线变压器的等值阻抗, 为不对称负荷的计算提供了理论基础, 最后对220 kV电铁牵引站进线的距离保护进行了校核。

1 两相供电系统简介

1.1 两相供电系统的特殊性

电力系统是一个三相对称的系统, 因此可以用任一相分析系统中的各种故障情况^[1], 而电铁负荷采用两相供电, 打破了电力系统的对称性, 因此不能使用序分量法求解系统中的电气参数^[2], 不平衡负荷的引入给正常运行的电力系统带来了负序和谐波分量^[3]。

1.2 电气化铁道供电系统的要求

1.2.1 负荷等级要求

铁道部标准《铁路电力牵引供电设计规范》^[4]中规定, 电力牵引为一级负荷, 牵引变电所应有两路电源供电; 当其中任一路发生故障时, 另一路应能够正常供电^[4]。

1.2.2 供电电压的要求

供电电压有110 kV和220 kV两种。110 kV变电站数量多分布广, 可以就近供电, 牵引变电站投资小, 但是牵引站受电电压低。220 kV系统容量大, 电压稳定, 承受负序和谐波电流能力强, 但是牵引站一次投资大^[4]。

2 220 kV牵引变压器等值模型

220 kV牵引站采用V/v接线, 两路进线, 一路运行, 另一路热备用, 由四台单相变压器向两个供

电区段供电，示意图如图 1 所示，图中四台单相变压器表示为 1#B、2#B、3#B 和 4#B，正常运行时变压器 1#B、2#B 运行，变压器 3#B、4#B 热备用，供电区段 1 和 2 的接触网分别用 T1 和 T2 表示，正馈线用 F1 和 F2 表示。

V/v 接线变压器如图 2 所示（其中 T1 和 T2 含义同图 1），简化等值电路如图 3 所示，变压器阻抗计算方法在文献[5]中有明确阐述。

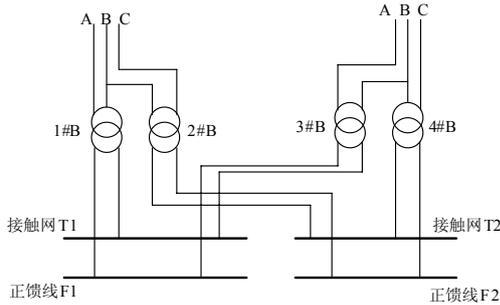


图 1 220 kV 牵引站主接线图
Fig.1 Wiring diagram of 220 kV station

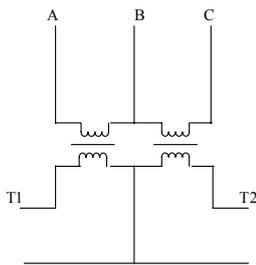


图 2 V/v 接线变压器
Fig.2 Transformer with V/v structure

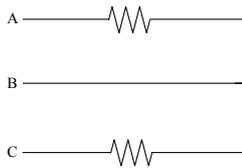


图 3 变压器等值电路
Fig.3 Equivalent circuit of transformer

3 V/v 接线牵引变压器低压侧短路计算及对距离保护的校核

V/v 接线高压侧短路与三相对称系统短路情况一致，但是 V/v 接线变压器低压侧短路只有相间短路的情况，并且由于高压侧没有接地点，所以不产生零序电流，也没有单相接地故障的情况。

3.1 三相短路

图 4 为系统等值电路图，其中 X_s 、 X_L 、 x' 和 Z_L 分别表示系统等值阻抗、线路阻抗、单相牵引变压器等值阻抗和机车负荷阻抗，定义 $x=X_s+X_L$ 。 U_A 、

U_B 、 U_C 是电铁路电源侧（线路保护安装处）的母线电压， I_A 、 I_B 、 I_C 是电铁供电线路电流， E_A 、 E_B 、 E_C 是系统电势。

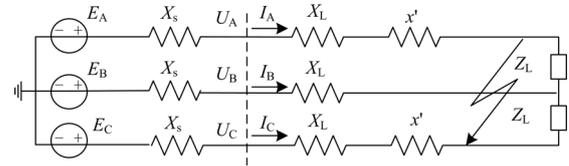


图 4 系统等值电路图

Fig.4 Equivalent circuit of power system

根据 KVL 得到

$$\begin{cases} E_A - E_B = I_A \times j(x + x') - I_B \times jx \\ E_B - E_C = I_B \times jx - I_C \times j(x + x') \\ I_A + I_B + I_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

保护安装处三相电压为：

$$\begin{cases} U_A = E_A - (I_A + k3I_0) \times jX_s \\ U_B = E_B - (I_B + k3I_0) \times jX_s \\ U_C = E_C - (I_C + k3I_0) \times jX_s \end{cases} \quad (2)$$

由式（1）解得：

$$\begin{cases} I_A = E_A \frac{3x + (1 - a^2)x'}{j(x + x')(3x + x')} \\ I_B = E_A \frac{3a^2(x + x')}{j(x + x')(3x + x')} \\ I_C = E_A \frac{3ax + (a - a^2)x'}{j(x + x')(3x + x')} \end{cases}$$

接地、相间阻抗为：

$$\begin{cases} Z_A = \frac{U_A}{I_A + k3I_0} = \frac{j(x + x')(3x + x')}{3x + (1 - a^2)x'} - jX_s \\ Z_B = \frac{U_B}{I_B + k3I_0} = j(X_L + x'/3) \\ Z_C = \frac{U_C}{I_C + k3I_0} = \frac{j(x + x')(3x + x')}{3x + (1 - a)x'} - jX_s \\ Z_{AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = \frac{j(1 - a^2)(x + x')(3x + x')}{3(1 - a^2)x + (1 - 4a^2)x'} - jX_s \\ Z_{BC} = \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} = \frac{j(a - 1)(x + x')(3x + x')}{3(a - 1)x + (4a - 1)x'} - jX_s \\ Z_{CA} = \frac{U_C - U_A}{I_C - I_A} = j(X_L + x) \end{cases} \quad (3)$$

3.2 两相短路情况

1) AB 相短路

$$\begin{cases} E_A - E_B = I_A \times j(x+x') - I_B \times jx \\ I_A = -I_B \\ I_C = 0 \end{cases}$$

$$\text{解得: } I_A = -I_B = E_A \frac{1-a^2}{j(2x+x')}, I_C = 0 \quad (4)$$

保护安装处三相电压同式 (2), 将式 (4) 代入式 (2), 则接地、相间阻抗为:

$$\begin{cases} Z_A = \frac{U_A}{I_A + k3I_0} = \frac{j(2x+x')}{1-a^2} - jX_s \\ Z_B = \frac{U_B}{I_B + k3I_0} = \frac{j(2x+x')}{1-a} - jX_s \\ Z_C = \frac{U_C}{I_C + k3I_0} = \infty \\ Z_{AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = j(X_L + \frac{x'}{2}) \\ Z_{BC} = \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} = \frac{j(2x+x')}{1+a^2} - jX_s \\ Z_{CA} = \frac{U_C - U_A}{I_C - I_A} = \frac{j(2x+x')}{a+1} - jX_s \end{cases} \quad (5)$$

2) BC 相短路

$$\begin{cases} E_B - E_C = I_B \times jx - I_C \times j(x+x') \\ I_B = -I_C \\ I_A = 0 \end{cases}$$

$$\text{解得: } \begin{cases} I_A = 0 \\ I_B = -I_C = E_A \frac{a^2 - a}{j(2x+x')} \end{cases} \quad (6)$$

保护安装处三相电压同式 (2), 将式 (6) 代入式 (2), 则接地、相间阻抗为:

$$\begin{cases} Z_A = \frac{U_A}{I_A + k3I_0} = \infty \\ Z_B = \frac{U_B}{I_B + k3I_0} = \frac{j(2x+x')}{1-a^2} - jX_s \\ Z_C = \frac{U_C}{I_C + k3I_0} = \frac{j(2x+x')}{1-a} - jX_s \\ Z_{AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = j(1+a^2)(2x+x') - jX_s \\ Z_{BC} = \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} = j(X_L + \frac{x'}{2}) \\ Z_{CA} = \frac{U_C - U_A}{I_C - I_A} = -j(\frac{2x+x'}{a} + X_s) \end{cases} \quad (7)$$

3) AC 相短路

$$\begin{cases} E_A - E_C = (I_A - I_C)j(x+x') \\ I_A = -I_C \\ I_B = 0 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} I_A = -I_C = E_A \frac{1-a}{j(2x+2x')} \\ I_B = 0 \end{cases} \quad (8)$$

保护安装处三相电压同式 (2), 将式 (8) 代入式 (2), 则接地、相间阻抗为:

$$\begin{cases} Z_A = \frac{U_A}{I_A + k3I_0} = \frac{j(2x+2x')}{1-a} - jX_s \\ Z_B = \frac{U_B}{I_B + k3I_0} = \infty \\ Z_C = \frac{U_C}{I_C + k3I_0} = \frac{j(2x+2x')}{1-a^2} - jX_s \\ Z_{AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = j(1+a)(2x+2x') - jX_s \\ Z_{BC} = \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} = -ja(2x+2x') - jX_s \\ Z_{CA} = \frac{U_C - U_A}{I_C - I_A} = j(X_L + x') \end{cases} \quad (9)$$

3.3 小结

分析以上公式, 可知:

1) 两台电铁牵引变低压侧同时发生故障时 (三相短路情况), 线路保护安装处感受到的阻抗中, 特殊相 (B 相) 的接地距离阻抗与系统阻抗没有关系, 为 $j(X_L + X'/3)$, 其他相接地距离阻抗与系统阻抗有关系; 非特殊相 (CA 相) 的相间阻抗与系统阻抗没有关系, 为 $j(X_L + X')$, 能够正确反映保护安装处到故障点的阻抗, 其他相间阻抗与系统阻抗有关系。

2) 单台电铁牵引变压器低压侧发生故障时, 线路保护安装处感受到的阻抗中, 与故障无关相的接地距离阻抗为无穷大, 其他相的接地距离阻抗与系统阻抗有关系; 与故障有关的相间阻抗与系统阻抗无关, 为 $j(X_L + X'/2)$, 其他相间阻抗与系统阻抗有关系。

4 220 kV 电铁牵引线路距离保护整定计算及校核

4.1 距离保护整定计算

按文献[7]中距离保护的整定原则对电铁牵引站进线的接地距离保护进行整定, 相间距离保护的定值直接取用接地距离保护定值^[8]。如图 5 所示为

省内某一 220 kV 电铁牵引站的接线示意图, 220 kV 变电站由两路同杆并架线路向其供电, 电铁牵引站两路进线引自不同 220 kV 母线。线路 L1、L2 距离保护定值已知 (同塔双回线路定值相同, 见表 1), 线路正序阻抗: $X_{L1}=5.52 \Omega$, $X_{L2}=6.34 \Omega$, 牵引站进线和单相变压器的阻抗分别为: $X_L=2.1 \Omega$, $X'=67 \Omega$; 系统阻抗 $X_s=5.7 \Omega$ 。

表 1 线路距离保护整定值
Tab.1 Setting of line distance protection

	I 段		II 段		III 段	
线路 L1	3.67 Ω	12.47 Ω	1.5 s	17.78 Ω	5 s	
线路 L2	4.22 Ω	12.93 Ω	1.5 s	22.09 Ω	5 s	

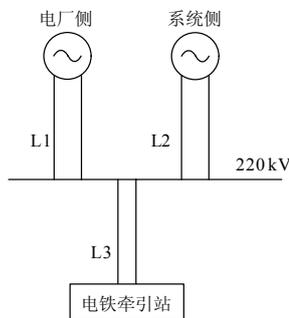


图 5 220 kV 电铁牵引站接线图

Fig.5 Wiring diagram of 220 kV traction station

考虑正常运行时同杆并架线路 L1 或 L2 停运, 此时助增系数为 1, 线路 L3 距离保护整定计算如下所示:

①距离 I 段: 按可靠躲过本线路对侧母线接地故障整定 $Z_{DZ1} \leq 0.7X_L=1.47 \Omega$ 。

②距离 II 段:

a. 按本线路末端发生金属性故障有足够灵敏度整定 $Z_{DZII} \geq 1.3X_L=2.73 \Omega$ 。

b. 按与线路 L1 或 L2 距离 II 段配合, 取二者大值得到: $Z_{DZII} \geq (Z'_{DZII}-0.7X_{L1})/0.7K_Z=(12.47-0.7 \times 5.52)/0.7=12.29 \Omega$, Z'_{DZII} 为线路 L1 阻抗定值。

c. 按躲变压器其他侧母线故障整定 $Z_{DZII} \leq 0.7X_L+0.7K_Z Z' =48.37 \Omega$ (Z' 为牵引变压器正序阻抗)。

因此: $12.29 \Omega \leq Z_{DZII} \leq 48.37 \Omega$ (10)

③距离 III 段:

a. 按本线路末端故障有足够灵敏度整定 $Z_{DZIII} \geq 1.3X_L=2.73 \Omega$ 。

b. 按可靠躲过本线路的最大事故过负荷电流对应的最小阻抗整定 (220 kV 系统静稳电流按 1 200 A 计算) $Z_{DZIII} \leq 0.7Z_{FH}=0.7 \times 110=77 \Omega$ 。

c. 按与线路 L1 或 L2 距离 III 段配合, 取二者大

值得到: $Z_{DZIII} \geq (Z'_{DZIII}-0.7X_{L2})/0.7=(22.09-0.7 \times 6.34)/0.7=25.22 \Omega$, Z'_{DZIII} 为线路 L2 阻抗定值。

因此: $25.22 \Omega \leq Z_{DZIII} \leq 77 \Omega$ (11)

4.2 距离保护的校核

与常规线路保护配置不同, 本次新建的电铁牵引进线由于没有铺设纵联保护通道, 并且牵引变低压侧没有接地点, 因此牵引进线以距离保护作为其主保护。针对上述情况, 距离保护整定原则应该作出相应的修改。

1) 距离保护 I 段作为瞬时性保护, 保护线路全长, 否则在母线附近故障将没有相应的速动保护切除故障。

2) 根据本文第 3 小结得到的结论, 牵引变低压侧三相短路时 B 相接地距离继电器的最小测量阻抗 $Z_{min}=Z_L+Z'/3=24.43 \Omega$, 相间短路时距离继电器的最小测量阻抗 $Z'_{min}=Z_L+Z'/2=35.6 \Omega$ 。可以看出如果阻抗定值整定不合理将会造成牵引变低压侧故障, 线路 L3 保护误动作切除牵引变的恶性事故, 因此, 考虑一定裕度后 $Z_{DZII} \leq (0.7 \sim 0.8) \times 24.43=17.1 \sim 19.54 \Omega$, 另外按配合原则整定的 Z_{DZIII} ($25.22 \Omega \leq Z_{DZIII} \leq 77 \Omega$) 在牵引变低压侧三相故障时 ($Z_{min}=24.43 \Omega$) 将会误动, 为了满足与上级线路的配合只能在时间上躲过牵引变低压侧三相故障, 考虑到 Z_{DZIII} 的时间定值一般整定较大 (5 s), 易于躲过牵引变低压侧故障, 所以距离 III 段依靠时间弥补。

距离保护整定结果如表 2 所示。

表 2 线路距离保护整定值

Tab.2 Setting of line distance protection

	I 段		II 段		III 段	
线路 3	2.1 Ω	15 Ω	1.0 s	30 Ω	5 s	

5 结语

由于 V/v 型电铁牵引变压器接线形式的特殊性, 在保护定值配合计算过程中不能采用常规的计算方法, 应该充分考虑不对称接线方式对保护测量阻抗带来的影响。

参考文献

[1] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 三版. 武昌: 华中科技大学出版社, 2005.
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin. Analysis of electric power system[M]. Third Edition. Wuchang: HUST Press, 2005.

[2] 符德川. 三相V/v接线牵引变压器的应用[J]. 铁道机车车辆, 1994, 26 (2): 47-51.

(下转第 148 页 continued on page 148)

的单根连接改为多根不同点连接, 保证接地的可靠性。

② 解除断路器本体操作箱合闸回路 107 的接地, 将 KL3-12 接线解除, 使 107 回路对地电阻为无穷大。

③ 解除断路器本体操作箱中的不必要的连线, 将 SF₆ 压力闭锁信号, 弹簧储能信号的公共端与断路器的控制电源连线解开; SF₆ 压力闭锁信号, 弹簧储能信号提供无源接点, 开入电源由测控装置开入回路提供。

④ 对交流回路与直流回路混用同一根控制电缆的错误现象加以改进, 应敷设独立的电缆供交流回路使用, 交流回路与直流回路使用各自独立的电缆。

⑤ 将测量 CT 回路, 保护 CT 回路的接地, 改接在保护柜内接地, 不在端子箱接地。

⑥ 由于直流系统的负极有接地的现象, 对安全运行埋下隐患, 应予尽快消除, 使直流系统恢复正常。

4 结论

由于接地网作为隐蔽工程长期深埋地下, 容易被人忽视, 不能对其进行有效监控。当接地网出现断裂, 脱焊等隐患时, 容易出现接地网解裂运行, 如果发生接地故障, 将会危及二次设备和人身安全。在我国, 因接地不良引起的二次设备烧毁事故屡有

发生, 接地问题已经越来越受到重视。如何及时有效地发现接地网的缺陷, 已经成为电力系统研究的一个主要方向。

参考文献

[1] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.
HE Jin-liang, ZENG Rong. The grounding technology of electric system[M]. Beijing: Science & Technology Press, 2007.

[2] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[Z]. 2005.
State Electric Power Dispatch and Communication Center. 18 State Grid Corporation of major anti-accident measures[Z]. 2005.

[3] DL/T621—1997 交流电气装置的接地[S].
DL/T621—1997 the grounding for AC electrical installations[S].

收稿日期: 2009-07-22; 修回日期: 2009-09-11

作者简介:

湛志成 (1978-), 男, 专科, 助理工程师, 从事发电端继电保护应用研究及技术管理工作; E-mail: zhanzhicheng2008@sina.com

郭化冰 (1979-), 女, 专科, 助理工程师, 从事发电端继电保护应用研究及技术管理工作;

苗智峰 (1979-), 女, 专科, 助理工程师, 从事发电端继电保护试验、系统联调及技术支持工作。

(上接第 144 页 continued from page 144)

FU De-chuan. The application of three phase V/v connection traction transformer[J]. Railway Locomotive&CAR, 1994, 26 (2) : 47-51.

[3] 张太升. 电力机车谐波的计算[J]. 河南电力, 1996, 3 (4) : 21-27.
ZHANG Tai-sheng. The calculation of electric locomotive's harmonic[J]. Henan Electric Power, 1996, 3 (4) : 21-27.

[4] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 二版. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
TAN Xiu-bing. Analysis of electric power system [M]. Second Edition. Chengdu: SWJTU Press, 2007.

[5] 崔家佩, 孟庆炎. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
CUI Jia-pei, MENG Qing-yan. Analysis of electric power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[6] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2000.
State Electric Power Dispatching and Communication

Center. Power system relay protection rules collection [M]. Second Edition. Beijing China Electric Power Press, 2000.

[7] 廖晓玉, 张太升. 继电保护整定计算的简化[J]. 继电器, 2003, 31 (8) : 37-41.
LIAO Xiao-yu, ZHANG Tai-sheng. Simplify calculation of line protection settings[J]. Relay, 2003, 31 (8) : 37-41.

[8] 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
Setting Guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment[S].

收稿日期: 2009-07-31; 修回日期: 2009-11-18

作者简介:

王敬军 (1981-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护整定计算及管理工作; E-mail: wangjingjun_2001@sina.com

张予鄂 (1963-), 女, 高级工程师, 学士, 从事电力系统继电保护整定计算和管理工作;

刘 华 (1955-), 男, 高级工程师, 学士, 从事电力系统继电保护管理工作。