

220 kV 线路距离保护在 V/X 接线牵引变压器 短路时的测量阻抗分析

汤大海¹, 严国平², 易 新²

(1. 镇江供电公司, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于 V/V 接线牵引变压器低压侧短路时短路电流分析, 推导出该短路情况下, 电源侧变电所 220 kV 线路距离保护相间阻抗元件和接地阻抗元件的测量阻抗计算式, 并根据计算式给出了 V/V 接线牵引变压器低压侧两相短路和三相短路时的 220 kV 线路距离保护的最小测量阻抗。对 V/X 接线牵引变压器的各种短路类型进行了分析, 发现只要将牵引变压器等值参数 Z 变为 Z' 或 Z'' , V/V 接线牵引变压器短路时对 220 kV 线路距离保护的测量阻抗的分析, 同样适用于 V/X 接线牵引变压器短路情况。通过仿真实验, 验证了所推导的测量阻抗计算式的正确性, 其适用于 V/X 接线牵引变压器。最后基于上述理论分析和仿真实验结果, 给出了 220 kV 线路距离保护整定计算公式和注意事项。

关键词: 220 kV 线路距离保护; 牵引变压器; V/X 接线; 短路电流; 测量阻抗

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.029

0 引言

沪宁城际铁路、京沪高速铁路及其他目前国内设计的高速铁路 220 kV 供电的牵引变电所均由 2 回独立可靠的 220 kV 电源供电, 接成线路变压器组; 牵引变电所内 220 kV 牵引变压器均采用了 2 台单相牵引变压器接成 V/X 接线^[1-2], 一台 V/X 接线的牵引变压器运行, 另一台 V/X 接线的牵引变压器固定备用, 共设置 4 台单相牵引变压器。220 kV 线路故障时, 由各自投装置完成牵引变压器供电的自动切换。2 回 220 kV 供电线路均配置 2 套完整的线路保护^[3-9](沪宁城际的线路两侧保护为光纤分相电流差动保护和相间距离、接地距离、零序电流等保护, 京沪高铁只在 220 kV 线路的电源侧配置了 2 套相间距离、接地距离、零序电流等保护)。V/X 接线牵引变压器使得 220 kV 系统的供电负载不平衡, 除正常运行时产生负序电流对线路距离保护产生影响^[1,10-15]外, 其低压侧短路时, 对电源侧变电所的 220 kV 线路距离保护的测量阻抗和动作特性也有所影响。不同于电网中常规变压器相应的短路情况, 对 V/X 接线牵引变压器进行 220 kV 线路距离保护整定计算非常困难, 且无资料参考。分析表明对其进行保护定值整定时, 不能按常规变压器进行整定处理, 否则将产生整定错误。由于牵引变压器的 V/X 接线是由 2 个极性相反的 V/V 接线构成的, 所以先对 V/V 接线变压器低压侧短路进行短路电流分析和 220 kV 线路距离保护进行测量阻抗分析, 在此基础上进一步分析 V/X 接线变压器低压侧短路时 220 kV 线路距离保护的测量阻抗, 为铁路牵引供电的 220 kV 线路保护整定计

算提供理论依据。

1 V/V 接线牵引变压器低压侧短路电流分析

首先分析 V/V 接线牵引变压器的短路电流及其对线路距离保护的测量阻抗的影响。图 1 是采用 220 kV 电源供电的 V/V 接线铁路牵引供电系统, 其中 220 kV 铁路牵引变电所通过 220 kV 三相交流线路供电, 由 2 台单相牵引变压器接成 V/V 接线构成 1 台完整的铁路牵引变压器运行。牵引变压器低压侧 b 相接地并接铁轨, a 相接上行铁路电气化机车负载, c 相接下行铁路电气化机车负载。

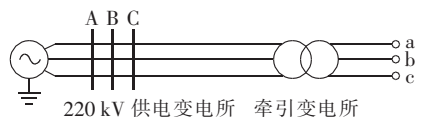


图 1 V/V 接线铁路牵引供电系统图

Fig.1 Railway traction power supply system with V/V connection

图 2 是铁路牵引供电系统的等值电路图, 图中所有的参数均折算至铁路牵引变压器高压侧。其中, Z_{st} 为系统等值正序阻抗; Z_L 为 220 kV 线路正序阻抗; Z 为单相变压器的正序阻抗 (已折算至高压侧); E_A, E_B, E_C 为电源电势; 图中 A', B', C' 与 a、b、c 之间

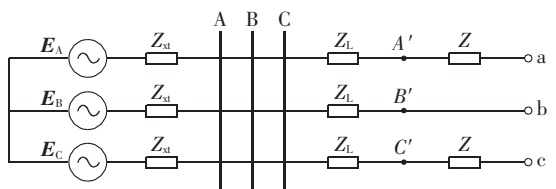


图 2 V/V 接线铁路牵引供电系统的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of railway traction power supply system with V/V connection

对应牵引变压器的等值电路^[8,16]。

1.1 V/V 接线牵引变压器低压侧两相短路

假设电源系统对称,系统等值阻抗和线路阻抗对称,根据图 2 有 $E_A = \alpha E_B = \alpha^2 E_C$, 其中 $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。以 ab 两相短路为例,则 220 kV 线路电流为: $I_A = -I_B, I_C = 0$, 即 220 kV 线路没有零序电流。根据回路电压,列出方程如下:

$$E_A - E_B = I_A(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z) - I_B(Z_{\text{xt}} + Z_L) \quad (1)$$

$$I_A = \frac{E_A(1 - \alpha^2)}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} = \frac{\sqrt{3} E_A e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \quad (2)$$

$$I_B = -\frac{\sqrt{3} E_A e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \quad (3)$$

因为电源的中性点电位为 0, 则供电变电所 220 kV 母线上电压分别为:

$$U_A = E_A - I_A Z_{\text{xt}} = \frac{E_A e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j30^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \quad (4)$$

$$U_B = E_B - I_B Z_{\text{xt}} = \frac{E_A e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j150^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \quad (5)$$

$$U_C = E_C - I_C Z_{\text{xt}} = E_C \quad (6)$$

同理,可推导出牵引变压器低压侧 bc、ca 两相短路时的 220 kV 线路电流和供电变电所 220 kV 母线电压如式(7)~(10)所示,其中式(7)、(9)对应 bc 两相短路,式(8)、(10)对应 ca 两相短路。

$$\begin{cases} I_A = 0 \\ I_B = \frac{\sqrt{3} E_B e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \\ I_C = -\frac{\sqrt{3} E_B e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_A = -\frac{\sqrt{3} E_C e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + 2Z} \\ I_B = 0 \\ I_C = \frac{\sqrt{3} E_C e^{j30^\circ}}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + 2Z} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} U_A = E_A \\ U_B = \frac{E_B e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j30^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \\ U_C = \frac{E_B e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j150^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + Z} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_A = \frac{E_C e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j150^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + 2Z} \\ U_B = E_B \\ U_C = \frac{E_C e^{j30^\circ} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z) e^{-j30^\circ}]}{2Z_{\text{xt}} + 2Z_L + 2Z} \end{cases} \quad (10)$$

1.2 V/V 接线牵引变压器低压侧三相短路

同样假设电源系统对称,根据回路电压,结合图 2 可列出方程如下:

$$I_A(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z) - I_B(Z_{\text{xt}} + Z_L) = E_A - E_B \quad (11)$$

$$I_B(Z_{\text{xt}} + Z_L) - I_C(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z) = E_B - E_C \quad (12)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (13)$$

由式(13)可知,牵引变压器低压侧三相短路时,220 kV 线路没有零序电流。解式(11)~(13),可得:

$$I_A = \frac{E_A [3(Z_{\text{xt}} + Z_L) + (1 - \alpha^2)Z]}{(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z)(3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z)} \quad (14)$$

$$I_B = \frac{3E_A \alpha^2}{3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z} \quad (15)$$

$$I_C = \frac{\alpha E_A [3(Z_{\text{xt}} + Z_L) + (1 - \alpha)Z]}{(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z)(3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z)} \quad (16)$$

因为电源的中性点电位为 0, 所以供电变电所 220 kV 母线电压分别为:

$$U_A = E_A - I_A Z_{\text{xt}} = \frac{E_A [(3Z_{\text{xt}} + Z)(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z) + (2 + \alpha^2)ZZ_{\text{xt}}]}{(3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z)(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z)} \quad (17)$$

$$U_B = E_B - I_B Z_{\text{xt}} = \frac{E_A \alpha^2 (3Z_L + Z)}{3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z} \quad (18)$$

$$U_C = E_C - I_C Z_{\text{xt}} = \frac{E_A \alpha [(3Z_{\text{xt}} + Z)(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z) + (2 + \alpha)ZZ_{\text{xt}}]}{(3Z_{\text{xt}} + 3Z_L + Z)(Z_{\text{xt}} + Z_L + Z)} \quad (19)$$

2 V/V 接线牵引变压器短路时 220 kV 线路距离保护测量阻抗分析

2.1 V/V 接线牵引变压器两相短路时测量阻抗分析

以 ab 两相短路为例,根据上述短路电流分析结果,推导出 220 kV 线路相间距离保护的 AB 相测量阻抗为:

$$Z_{2AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = \frac{I_A(Z_L + Z) - I_B Z_L}{2I_A} = Z_L + Z/2 \quad (20)$$

同理可得 BC 相和 CA 相测量阻抗为:

$$Z_{2BC} = (2Z_L + Z)e^{j60^\circ} + j\sqrt{3} Z_{\text{xt}} \quad (21)$$

$$Z_{2CA} = (2Z_L + Z)e^{-j60^\circ} - j\sqrt{3} Z_{\text{xt}} \quad (22)$$

按同样的分析方法可推导出 220 kV 线路接地距离保护的测量阻抗为:

$$Z_{2A} = \frac{U_A}{I_A + K \cdot 3I_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} [-jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z)e^{-j30^\circ}] \quad (23)$$

$$Z_{2B} = \frac{1}{\sqrt{3}} [jZ_{\text{xt}} + (2Z_L + Z)e^{j30^\circ}] \quad (24)$$

$$Z_{2C} = \infty \quad (25)$$

其中, $K = (Z_0 - Z_1)/(3Z_1)$, 为 220 kV 线路零序补偿系数, Z_1 为 220 kV 线路正序阻抗, Z_0 为 220 kV 线路零序阻抗, I_0 为 220 kV 线路短路或牵引变压器低压侧短路时流过为牵引变压器供电的 220 kV 线路的零序电流(牵引变压器低压侧短路时 220 kV 供电线路的零序电流为 0)。

同理,可推出 bc 两相短路、ca 两相短路时,220 kV 线路相间距离保护、接地距离保护的测量阻抗如式(26)~(37)所示,其中,式(26)~(31)对应 bc 两相短路,式(32)~(37)对应 ca 两相短路。

$$Z_{2AB} = (2Z_L + Z)e^{-j60^\circ} - j\sqrt{3}Z_{xt} \quad (26)$$

$$Z_{2BC} = Z_L + Z/2 \quad (27)$$

$$Z_{2CA} = (2Z_L + Z)e^{j60^\circ} + j\sqrt{3}Z_{xt} \quad (28)$$

$$Z_{2A} = \infty \quad (29)$$

$$Z_{2B} = \frac{-jZ_{xt} + (2Z_L + Z)e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

$$Z_{2C} = \frac{jZ_{xt} + (2Z_L + Z)e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

$$Z_{2AB} = (2Z_L + 2Z)e^{j60^\circ} + j\sqrt{3}Z_{xt} \quad (32)$$

$$Z_{2BC} = (2Z_L + 2Z)e^{-j60^\circ} - j\sqrt{3}Z_{xt} \quad (33)$$

$$Z_{2CA} = Z_L + Z \quad (34)$$

$$Z_{2A} = \frac{jZ_{xt} + (2Z_L + 2Z)e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

$$Z_{2B} = \infty \quad (36)$$

$$Z_{2C} = \frac{-jZ_{xt} + (2Z_L + 2Z)e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} \quad (37)$$

2.2 V/V 接线牵引变压器三相短路时测量阻抗分析

根据上述三相短路电流分析结果推导出 220 kV 线路相间距离保护 AB 相的测量阻抗为:

$$Z_{3AB} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} = \frac{I_A(Z_L + Z) - I_B Z_L}{I_A - I_B} = \frac{Z}{1 - I_B/I_A} + Z_L = \frac{Z}{1 - \frac{3\alpha^2(Z_{xt} + Z_L + Z)}{3(Z_{xt} + Z_L) + (1 - \alpha^2)Z}} + Z_L \quad (38)$$

同理可得 BC 相、CA 相的测量阻抗为:

$$Z_{3BC} = \frac{Z}{1 - \frac{3\alpha(Z_{xt} + Z_L + Z)}{3(Z_{xt} + Z_L) + (1 - \alpha)Z}} + Z_L \quad (39)$$

$$Z_{3CA} = Z_L + Z \quad (40)$$

用同样的分析方法可推导出 220 kV 线路接地距离保护的 A 相测量阻抗为:

$$Z_{3A} = \frac{U_A}{I_A + K \cdot 3I_0} = \frac{E_A - I_A Z_{xt}}{I_A} = \frac{Z_{xt} + Z_L + Z}{1 - \frac{\alpha^2 Z}{3Z_{xt} + 3Z_L + Z}} - Z_{xt} \quad (41)$$

同理可得到 B 相、C 相的测量阻抗为:

$$Z_{3B} = Z_L + Z/3 \quad (42)$$

$$Z_{3C} = \frac{Z_{xt} + Z_L + Z}{1 - \frac{\alpha Z}{3Z_{xt} + 3Z_L + Z}} - Z_{xt} \quad (43)$$

2.3 220 kV 线路距离保护的测量阻抗分析

由 2.1 节可以看出,在铁路牵引变压器低压侧发生 ab 两相或 bc 两相短路时,220 kV 线路相间距离保护故障相之间阻抗元件的测量阻抗总是 $Z_L + Z/2$,且为最小值,其他 2 个相间阻抗元件的测量阻抗均大于该值;在铁路牵引变压器低压侧发生 ca 两相短路时,220 kV 线路相间距离保护故障相之间阻抗元件的测量阻抗为 $Z_L + Z$,且为最小值,其他 2 个相间阻抗元件的测量阻抗均大于该值。在铁路牵引变压器

低压侧发生两相短路时,由于系统阻抗 Z_{xt} 一般远小于 $2Z_L + Z$,所以,此时 220 kV 线路接地距离保护的测量阻抗值约为相间距离保护阻抗元件的最小测量阻抗值的 $2/\sqrt{3}$,并有 30° 的角度偏移。

由于 $Z_{xt} + Z_L$ 一般远小于 Z ,所以忽略 $Z_{xt} + Z_L$,由式(38)、式(39)可得三相短路时 AB 相间和 BC 相间最小测量阻抗为:

$$Z_{3AB} \approx \frac{Z}{1 - \frac{3\alpha^2}{1 - \alpha^2}} + Z_L = \frac{Z}{1 - \sqrt{3}e^{-j150^\circ}} + Z_L = \frac{\sqrt{7}}{7}Z e^{-j19.1^\circ} + Z_L \quad (44)$$

$$Z_{3BC} \approx \frac{Z}{1 - \frac{3\alpha}{1 - \alpha}} + Z_L = \frac{Z}{1 - \sqrt{3}e^{j150^\circ}} + Z_L = \frac{\sqrt{7}}{7}Z e^{j19.1^\circ} + Z_L \quad (45)$$

所以,在铁路牵引变压器低压侧发生三相短路时,相间阻抗元件测量阻抗 Z_{3AB} 、 Z_{3BC} 均略大于 $Z_L + Z/3$,且小于 $Z_L + Z$ 。

由于 $Z_{xt} + Z_L$ 一般远小于 Z ,所以忽略 $Z_{xt} + Z_L$,由式(41)、式(43)可得三相短路时,A 相和 C 相最小测量阻抗为:

$$Z_{3A} \approx \frac{Z}{1 - \alpha^2} + Z_L = \frac{1}{\sqrt{3}}Z e^{-j30^\circ} + Z_L \quad (46)$$

$$Z_{3C} \approx \frac{Z}{1 - \alpha} + Z_L = \frac{1}{\sqrt{3}}Z e^{j30^\circ} + Z_L \quad (47)$$

所以,在铁路牵引变压器低压侧发生三相短路时,接地阻抗元件测量阻抗 Z_{3A} 、 Z_{3C} 均大于 $Z_L + Z/3$,接地阻抗元件测量阻抗 $Z_{3B} = Z_L + Z/3$ 。

3 V/X 接线牵引变压器短路时线路距离保护测量阻抗分析

3.1 V/X 接线牵引变压器绕组分析

铁路牵引变电站变压器一般为 2 台,其中 1 台供电,1 台备用。每台变压器各由 2 台接成 V/X 接线的单相变压器组成^[2](见图 3),其中一台单相变压器的 T 和 F 接南京方向的上行和下行列车,另一台单相变压器的 T' 和 F' 接上海方向的上行和下行列车。每台单相变压器有 1 个一次绕组和 2 个二次绕组,一次绕

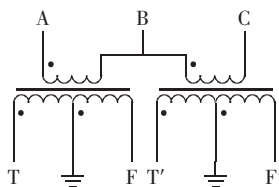


图 3 V/X 接线牵引变压器接线图
Fig.3 Wiring diagram of traction transformer with V/X connection

组和 2 个二次绕组结构对称,出线 T 和 F、出线 T' 和 F'均为反极性,2 个二次绕组的另一条出线连接在一起接地并接到铁轨,因此 2 个二次绕组参数对称。

3.2 V/X 接线牵引变压器短路类型

V/X 接线牵引变压器短路类型主要有:

- a. 1 台单相变压器的 1 个二次绕组或引线对地短路,如一个引线遭雷击,这是最常见的短路;
- b. 2 台单相变压器各有 1 个二次绕组或引线同时对地短路,这种短路不常见;
- c. 1 台单相变压器的 2 个二次绕组或引线对地同时短路(简称单相变短路),如跨越铁路的电力线、通信线等断线落在牵引线路和地上;
- d. 2 台单相变压器的 2 个二次绕组或引线均对地短路(简称全部短路),这种情况主要发生在变压器检修结束忘记拆除接地线时;
- e. 1 台单相变压器的 2 个二次绕组或引线之间短路(简称单相变引线间短路),如跨越铁路的电力线、通信线等断线落在牵引线路上但未落在地上;
- f. 2 台单相变压器的 2 个二次绕组或引线之间均短路,这种短路不常见。

3.3 V/X 接线牵引变压器短路分析

对于 V/X 接线牵引变压器短路类型 a 和 b,等值电路如图 2 所示,分析结论同 V/V 接线牵引变压器。对于短路类型 c,由于每台单相变压器的 2 个二次绕组参数对称,此时 V/V 接线牵引变压器的短路和 220 kV 线路距离保护测量阻抗的分析结论也适用于 V/X 接线牵引变压器,但牵引变压器的等值参数 Z 变为 Z' ,而 $Z'=Z_1+Z_2//Z_3$ (Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为单相变压器一次绕组、2 个二次绕组折算到高压侧的等值阻抗,其中 $Z_2=Z_3$)。对于短路类型 e,由于每台单相变压器的 2 个二次绕组参数对称,牵引变压器的等值参数 Z 变为 Z'' , $Z''=Z_1+(Z_2+Z_3)\times 0.5^2$ (2 个二次绕组串联,电压为 55 kV,即单相变压器一、二次变比标幺值为 0.5),可见 $Z''=Z'$,则 V/X 接线牵引变压器短路类型 c 和 e 的分析结果相同。同理可得 V/X 接线牵引变压器短路类型 d 和 f 的结果相同。

综上,V/V 接线牵引变压器的短路和 220 kV 线路距离保护测量阻抗的分析结论同样适用于 V/X 接线牵引变压器,但此时 Z 变为 Z' 或 Z'' 。

4 仿真试验

在 MATLAB 中搭建仿真模型,利用 2 个单相变压器元件模拟 V/X 接线牵引变压器,通过改变变压器低压侧出线的连接方式设置各种类型的短路故障。仿真模型中根据测量点的短路电流和电压经傅里叶变换元件变换后得到的测量电流、电压的幅值和

相位,计算出测量阻抗。
为验证上述推导和结论,需进行 ab 两相、ca 两相短路和 abc 三相短路试验(bc 两相短路与 ab 两相短路的推导相同,故未进行验证)。为了验证 V/X 牵引变压器的 2 个二次绕组或引线对地同时短路时存在 Z 变为 Z' 现象,三相短路试验考虑该短路情况。试验参数如下: $Z_{kl}=0.44+j5.97\ \Omega$, $Z_l=0.33+j2.13\ \Omega$; $Z_1=j18.15\ \Omega$, $Z_2=Z_3=j102.85\ \Omega$, $Z=j121\ \Omega$, $Z'=Z''=j69.575\ \Omega$ 。仿真试验和理论推导结果比较如下。

- 1 台单相变压器(接系统 AB 相)的 1 个二次绕组对地短路,理论表达式见式(20)——(25),结果比较见表 1。
- 2 台单相变压器各有 1 个二次绕组或引线同时对地短路,理论表达式见式(32)——(37),结果比较见表 2。
- 2 台单相变压器 2 个二次绕组均对地短路,理论表达式见式(38)——(43),其中 Z 变为 Z' ,结果比较见表 3。

表 1 ab 两相短路时理论推导和仿真结果的比较
Tab.1 Comparison of measured impedance between theoretical analysis and simulative experiment for a-b inter-phase short circuit

测量阻抗	阻抗值/ Ω	
	理论推导	仿真试验
Z_{2AB}	$62.63\angle 89.7^\circ$	$62.27\angle 89.55^\circ$
Z_{2BC}	$134.65\angle 151.64^\circ$	$134.72\angle 151.71^\circ$
Z_{2CA}	$133.99\angle 27.22^\circ$	$133.96\angle 27.20^\circ$
Z_{2A}	$74.13\angle 57.88^\circ$	$74.06\angle 57.46^\circ$
Z_{2B}	$74.30\angle 121.91^\circ$	$73.86\angle 122.00^\circ$
Z_{2C}	∞	$128\ 949\angle 37.20^\circ$

表 2 ca 两相短路时理论推导和仿真结果的比较
Tab.2 Comparison of measured impedance between theoretical analysis and simulative experiment for c-a inter-phase short circuit

测量阻抗	阻抗值/ Ω	
	理论推导	仿真试验
Z_{2AB}	$255.62\angle 150.86^\circ$	$256.16\angle 150.74^\circ$
Z_{2BC}	$254.91\angle 28.54^\circ$	$255.15\angle 28.77^\circ$
Z_{2CA}	$123.13\angle 89.85^\circ$	$123.82\angle 89.89^\circ$
Z_{2A}	$144.14\angle 120.99^\circ$	$144.64\angle 120.94^\circ$
Z_{2B}	∞	$142\ 607\angle 45.30^\circ$
Z_{2C}	$143.72\angle 58.61^\circ$	$144.31\angle 58.81^\circ$

表 3 三相短路结果比较
Tab.3 Comparison of measured impedance between theoretical analysis and simulative experiment for three-phase short circuit

测量阻抗	阻抗值/ Ω	
	理论推导	仿真试验
Z_{3AB}	$29.55\angle 68.91^\circ$	$29.39\angle 68.84^\circ$
Z_{3BC}	$29.53\angle 109.47^\circ$	$29.47\angle 110.02^\circ$
Z_{3CA}	$71.71\angle 89.74^\circ$	$72.32\angle 89.73^\circ$
Z_{3A}	$46.20\angle 60.99^\circ$	$46.20\angle 60.74^\circ$
Z_{3B}	$25.32\angle 89.25^\circ$	$25.16\angle 89.50^\circ$
Z_{3C}	$45.80\angle 117.49^\circ$	$45.99\angle 117.95^\circ$

由表1—3可见,理论推导结果和仿真结果是一致的。

5 220 kV 线路距离保护整定注意事项

V/X 铁路牵引变压器的低压侧单相变短路时,220 kV 线路相间距离保护最小测量阻抗为 $Z_L + Z'/2$; 而牵引变压器低压侧全部短路时,220 kV 线路相间距离保护最小测量阻抗均大于 $Z_L + Z'/3$, 所以为可靠起见,相间距离Ⅰ段或Ⅱ段若按躲过铁路牵引变压器低压侧短路故障整定,建议按式(48)整定,同时相间距离Ⅱ段应保证全线有大于1.5的灵敏度^[3-5]。

$$Z_{zd} \leq K_K Z_L + K_{Kb} Z' / 3 \quad (48)$$

其中, Z_{zd} 为整定阻抗; K_K 、 K_{Kb} 为可靠系数,一般取0.7~0.8。

同样在铁路牵引变低压侧发生三相短路时,总有一相接地阻抗元件测量阻抗等于 $Z_L + Z'/3$, 所以接地距离Ⅰ段或Ⅱ段若按躲过铁路牵引变压器低压侧短路故障整定时,也建议按式(48)整定,同时接地距离Ⅱ段应保证全线有大于1.5的灵敏度^[3-5]。

6 结语

理论分析和仿真试验表明,若铁路牵引变压器采用 V/X 接线,则电源侧变电所 220 kV 线路距离保护在铁路牵引变压器发生短路故障时,该保护相间、接地阻抗元件的测量阻抗不同于电网中常规变压器发生短路故障时的测量阻抗,应引起各继电保护整定计算人员的重视,从而防止继电保护误整定和 220 kV 线路距离保护越级跳闸事故的发生。该整定结论已运用在沪宁城际铁路(2010年5月投运)和京沪高速铁路牵引变电所(2011年2月投运)的 220 kV 铁路牵引供电线路保护上,保护运行正常,并已在江苏省内 220 kV 铁路牵引供电线路保护上推广。由于目前国内设计的牵引变电所内 220 kV 牵引变压器均采用了 V/X 接线,该推导结论对国内的 220 kV 高速铁路牵引线路距离保护的整定具有指导意义。

参考文献:

- [1] 杨振龙. V/X 接线与 Scott 接线牵引变压器的工程应用比较[J]. 电气化铁道,2006(3):4-7.
YANG Zhenlong. Comparison between engineering application of V/X wiring and Scott wiring traction transformer[J]. Electric Railway,2006(3):4-7.
- [2] 张亚杰,龚永纲,李静. 电气化铁路 VX 接线牵引变压器的设计特点[J]. 变压器,2012,46(3):1-4.
ZHANG Yajie, GONG Yonggang, LI Jing. Design characteristics of VX connection traction transformer of electrification railway[J]. Transformer,2012,46(3):1-4.
- [3] 冯匡一,袁季修,宋继成,等. GB14285 继电保护和安全自动装置

技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

- [4] 李天华,高文启,王梅义,等. DL/T584—2007 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [5] 陈建民,韩学军,胡宏,等. DL/T594—2007 220~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 韩正庆,许龙,刘淑萍,等. 高速铁路牵引变压器后备距离保护[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):27-30,50.
HAN Zhengqing, XU Long, LIU Shuping, et al. Traction transformer backup distance protection for high-speed railway[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):27-30,50.
- [7] 魏光. 基于 V 型接线的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):60-65.
WEI Guang. Cophase traction power supply system based on V connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):60-65.
- [8] 薛艳霞,任仕宜. 电气化铁路牵引站供电线路保护定值整定问题探讨[J]. 电力技术,2010,19(3):67-72.
XUE Yanxia, REN Sheyi. Discussion of protection setting adjustment for power supply line of electrified railway traction station[J]. Electric Power Technology,2010,19(3):67-72.
- [9] 陈剑,李炜. 武广客运专线 220 kV 线路保护相关问题探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(19):84-87.
CHEN Jian, LI Wei. Research of 220 kV line protection in WuGuang electrified railway[J]. Power System Protection and Control,2009,37(19):84-87.
- [10] 刘谋君,罗隆福,张志文,等. 星形-双梯形接线平衡变压器负序及效率分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):66-70,74.
LIU Moujun, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. Analysis of negative sequence and efficiency of balance transformer connected in Y and double trapezoids[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):66-70,74.
- [11] 江睿,刘光晔,邹宇. 电气化铁路用 Yd11 型变压器两相平衡协调控制系统[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):85-90.
JIANG Rui, LIU Guangye, ZOU Yu. Two-phase-balance coordinated control system of Yd11 traction transformer for electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):85-90.
- [12] 王慧芳,何奔腾. 电气化铁路负荷最大电流突变量的估算方法[J]. 电力系统自动化,2008,34(9):79-82,103.
WANG Huifang, HE Benteng. Calculation method of maximal current mutation in electrical railway load[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,34(9):79-82,103.
- [13] 钱海. 哈大电铁 220 kV 线路继电保护运行相关问题探讨[J]. 电力自动化设备,2002,32(12):68-71.
QIAN Hai. Discussion of 220 kV line-protection operation in Ha-Da electrified railway road[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,32(12):68-71.
- [14] 周勇,刘中元,王绪雄. 牵引变压器负序电流的分析[J]. 变压器,2003,40(2):11-13.
ZHOU Yong, LIU Zhongyuan, WANG Xuxiong. Analysis of negative phase-sequence current in traction transformer[J]. Transformer,2003,40(2):11-13.
- [15] 王果,任恩恩,田铭兴. 不同类型牵引变压器负序电流特性的分析比较[J]. 变压器,2012,46(1):1-4.
WANG Guo, REN Enen, TIAN Mingxing. Analysis and comparison of negative sequence current characteristics of traction transformers[J]. Transformer,2012,46(1):1-4.

[16] 崔家佩. 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,2003:6.

作者简介:

汤大海(1963-),男,江苏镇江人,高级工程师,从事电网

继电保护运行管理工作(E-mail:zhuweici@vip.sina.com);

严国平(1965-),男,江苏常州人,高级工程师,从事电网继电保护运行管理工作;

易 新(1981-),男,江苏南京人,工程师,硕士,从事电网继电保护整定计算工作。

Measured impedance of 220 kV line protection during short circuit of traction transformer with V/X connection

TANG Dahai¹,YAN Guoping²,YI Xin²

(1. Zhenjiang Power Company,Zhenjiang 212001,China;

2. Jiangsu Provincial Power Company,Nanjing 210024,China)

Abstract: The low voltage side short circuit current of traction transformer with V/V connection is analyzed,based on which,the formulas for calculating the measured impedance of inter-phase impedance element and grounding impedance element of 220 kV line distance protection are deduced. The minimal measured impedances of 220 kV line distance protection are thus calculated for two-phase and three-phase short circuits at low voltage side. Different short circuit kinds of traction transformer with V/X connection are analyzed and it is found that,the measured impedance of 220 kV line distance protection analyzed for the LV-side short circuit current of traction transformer with V/V connection is applicable to that with V/X connection as long as the equivalent parameter Z is replaced by Z' or Z'' ,which is verified by simulative experiment. The formulas for calculating the settings of 220 kV line distance protection are given with notes.

Key words: 220 kV line distance protection; traction transformer; V/X wiring; electric short circuit currents; measured impedance

广 告 索 引

国电南京自动化股份有限公司 (封面)
南京南瑞继保电气有限公司 (封二,前插 1)
国电南京自动化股份有限公司 (前插 2,3)
广州虹科电子科技有限公司 (前插 4)
珠海优特电力科技股份有限公司 (前插 5)
绵阳市维博电子有限责任公司 (前插 6)
上海安科瑞电气股份有限公司 (前插 7)
日东工业(中国)有限公司 (前插 8)
济南无线电十厂有限责任公司 (前插 9)
广州致远电子股份有限公司 (前插 10)
山东迪生电气股份有限公司 (前插 11)
珠海瑞捷电气有限公司 (前插 12)
南京科明自动化设备有限公司 (前插 13)
上海良信电器股份有限公司 (前插 14,15)
广东雅达电子股份有限公司 (前插 16)

重庆新世纪电气有限公司 (前插 17)
国电南京自动化股份有限公司 (前插 18,19)
艾默生网络能源有限公司 (前插 20)
武汉百年基业通信科技有限公司 (文前页)
施恩禧电气(中国)有限公司 (封三)
北京博电新力电气股份有限公司 (封底)
航天长峰朝阳电源有限公司 (后插 1)
珠海博威电气有限公司 (后插 2)
武汉市豪迈电力自动化技术有限责任公司
..... (后插 3)
浙江中凯科技股份有限公司 (后插 4)
中国工控网 (文后 1)
第 13 届中国哈尔滨国际工业自动化及仪器仪表
展览会 (文后 2)