

交直流混线电压互感器烧损剖析

魏晓云, 鞠艳杰

(大连交通大学 电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对交直流混线时电压互感器烧损, 对 10 kV 系统正常运行电压互感器三相阻抗不平衡时电压、过渡电阻接地系统电压以及过渡电阻接地又电压互感器三相阻抗不平衡时电压进行了研究, 并结合 10 kV 交流系统与 1 kV 直流系统混线实例, 分析了电压互感器烧损的具体过程; 指出窜入交流系统的高压直流, 促使电压互感器铁芯磁路迅速饱和导致阻抗的三相不平衡是造成电压互感器烧损的关键原因, 及时有效地处理单相接地故障可以避免事故扩大, 设计时在交直流线路交叉处采取有效的措施是避免出现混线事故的根本方法。

关键词: 过渡电阻; 中性点; 消弧线圈; 铁磁谐振; 位移电压

中图分类号: TM 451

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0045-03

对于 6~110 kV 中性点不接地或经消弧线圈接地方式^[1], 电压互感器(TV)在运行过程中, 可能由于铁磁谐振^[2-3]、超低频振荡过电流^[4]等导致铁芯磁路饱和、发热过量, 致使 TV 绝缘处于高温条件下, 出现绝缘击穿、绕组匝间短路、TV 烧毁的现象。在城市交通中有轨和无轨电车的供电系统均为直流系统, 如果直流窜入本地交流系统就会出现这种事故, 同时也会使直流设备损坏, 后果严重, 因此有必要对电压互感器的烧损进行深入的研究。

1 10 kV 系统正常运行时 TV 三相阻抗不平衡时各相电压分析

较常见的系统 TV 接线类型如图 1 所示, 图中(a)为无限大电源系统, (b)为四 TV 接线方式^[5], (c)为三 TV 接线方式, (d)为 A 相经过渡电阻 R_n 接地。

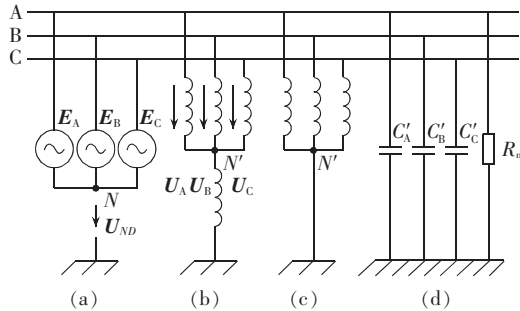


图 1 系统电压互感器等效接线图
Fig.1 Equivalent PT wiring diagrams

图 1 中, 方式(b) TV 接线的三相阻抗不等时各相电压的表达式为

$$\begin{aligned} U_A &= E_A + U_{NN'} \\ U_B &= E_B + U_{NN'} \\ U_C &= E_C + U_{NN'} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 E_A, E_B, E_C 是无限大电源系统^[6]的三相电势;

U_A, U_B, U_C 是三相电压; $U_{NN'}$ 是无限大电源中性点 N 与 TV 中性点 N' 之间的位移电压。

$$U_{NN'} = - \frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (2)$$

$Y_A = 1/Z_A, Y_B = 1/Z_B, Y_C = 1/Z_C$

由式(1)和式(2)可知, 当三相阻抗对称, 即 $Z_A = Z_B = Z_C$ 时:

$$U_{NN'} = 0, U_A = E_A, U_B = E_B, U_C = E_C$$

此时, 无限大系统中性点 N 对地的位移电压和 TV 中性点 N' 对地的位移电压皆等于零; TV 各相电压等于无限大系统相应相的电压。

当三相阻抗不对称时, 例如 A 相导纳由 Y_A 变为 Y'_A 时, 式(2)变为

$$U_{NN'} = - \frac{E_A Y'_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y'_A + Y_B + Y_C} = - \frac{E_A (Y'_A - Y_B)}{Y'_A + 2Y_B} \quad (3)$$

此时, 电源中性点与 TV 中性点之间将出现位移电压, 由式(1)可知各相电压不相等; 图 2 为各种情况下的三相电压相量图。

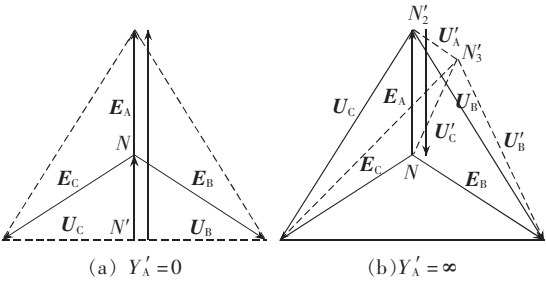


图 2 电压互感器三相阻抗不平衡相量图
Fig.2 Phasor diagrams of PT with unbalanced three-phase impedances

其中, 图 2(a)为 $Y'_A = 0$ 情况下, TV 中性点 N' 落在了系统 B、C 相线电压的中点上, 系统中性点与 TV 中性点之间, 出现了大小为 $0.5 E$ 的位移电压, A 相电压升高为 $1.5 E$; B、C 相电压降低为 $0.866 E$, 三相

电压严重不对称,但线电压不变。

图 2(b) N'_2 为 $Y'_A = \infty$ 时 TV 中性点位置,此时位移电压大小为 E , A 相电压等于零,另外两相电压升高为线电压,三相电压极不平衡,但线电压不变;如果 Y_A 是在 $0 \sim \infty$ 之间变化或三相阻抗均有差异,则 TV 中性点在相量图上的位移轨迹,将具有不确定性,图 2(b)的虚线部分,是假定负载中性点 N'_2 位移至 N'_3 的位置时绘出的,此时 B、C 相电压升高, A 相电压降低。

如果 TV 三次辅助线圈“角接”,则此时“开口三角”将出现 3 倍 $U_{NN'}$ 电压。若将“开口三角”短接,此时 A、B、C 三相 TV 的三次辅助线圈中均流有短路电流,长时间过热可能导致三相 TV 皆烧损。此时, $U_{NN'}$ 亦加于中性点 TV 上,若 $U_{NN'}$ 较大,可能引起接地报警装置误动。

将图 1(a)的 TV 中性点直接接地,即得图 1(c)的接线。由于其中性点电位恒等于地电位,故负载三相阻抗不等时,各相负载上的电压恒等于系统相应相的电压;系统中性点不发生电压偏移。

2 10kV 系统过渡电阻接地时各相电压分析

如图 1(d) 所示,当 A 相发生过渡电阻 R_n 接地,系统三相对地等值电容相等,系统中性点的位移电压是以 E 为直径的半圆

$$U_{ND} = -\frac{1}{1+j\omega CR_n} E_A \quad (4)$$

三相对地电压可以用式(1)计算:

$$\begin{aligned} U_{KA} &= E_A + U_{ND} \\ U_{KB} &= E_B + U_{ND} \\ U_{KC} &= E_C + U_{ND} \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(4)(5)可以绘出其相量图如图 3 所示。

当系统某相发生过渡电阻接地时,系统线电压三角形无畸变,与接地前同。对于中性绝缘系统,当接地程度大于 33% 时, B、C(非接地)相电压将高于电源的相电压,且接地相的引前相(即 C 相)最高。

3 10kV 系统一相发生过渡电阻接地又 TV 三相阻抗不平衡时各相电压分析

图 1(b) TV 接线下,系统线电压与接地故障前相同,对 TV 无影响。TV 三相阻抗不等时各相电压和其中性点对系统中性点位移电压的计算与系统正常运行时相同,只是 TV 中性点对地位移电压不再等于其中性点对系统中性点的位移电压。其相量图如图 3 虚线所示, TV 中性点对地位移电压可以按下式计算:

$$U_{N'D} = U_{NN'} - U_{ND} \quad (6)$$

图 1(c) TV 接线下,由于中性点是直接接地,各相电压恒等于系统各相对地电压。TV 中性点对地电压为零,其中性点对系统中性点的电压等于系统中性点对地的位移电压。

4 实例分析

2003 年大连某 66 kV 变电所 10 kV 配出线终端杆拉线被车刮歪倾于无轨电车直流馈线一侧(交直流线路交叉),导线松弛,当无轨电车通过时,直流馈线轻微抖动,造成了 10 kV 交流 A 相与 1 kV 直流线贴近进而混线,致使 10 kV 母线上的 JDZJ-10 型 TV 烧毁,电车直流设备包括逆变器、硅机组等多台烧毁,2 路电车全线停运,影响面极大。

4.1 接地事故性质分析

电车供电系统^[7-8]是直流一线一地系统,负极接地,导致交流对直流正极混线,由现场观察分析和设备损坏状况可知:交、直流混线之初,交叉处 A 导线并非直接接触而是贴近直流馈线正极,在直流设备未被击穿烧毁之前,10 kV 系统发生的是经过过渡电阻的单相接地故障,当直流设备被击穿烧毁以后,系统将由单相过渡电阻接地故障转变为直接接地故障。

4.2 TV 烧毁原因分析

4.2.1 直流助磁对 TV 工作的影响

10 kV 母线 TV 采用四 TV 接线方式,其一次侧线圈接线类型与图 1(b) 相同。当电车直流设备未被击穿之前,在 A 相和中性点 TV 的一次线圈上,施有系统交流电压和 1 kV 的直流电压。正常 A 相 TV 的一次励磁电流为 1.0 mA,中性点 TV 一次励磁电流为 1.4 mA,当 1 kV 直流电加于 A 相和中性点 TV 的一次线圈上时,其一次线圈流过的直流电流将达到 100 mA 以上。如此大的直流助磁电流,必将使 A 相和中性点 TV 铁芯迅速饱和,阻抗变小,致使 A、B、C 三相 TV 阻抗严重不平衡^[9]。

4.2.2 三相 TV 阻抗不平衡又 A 相经过过渡电阻接地的故障分析

在三相 TV 阻抗不平衡又 A 相经过过渡电阻接地情况下,系统各相对地电压、TV 线圈上各相电压以及中性点位移电压的分析与上述 10 kV 系统发生过渡电阻接地又负载三相不平衡时各相负载上的电压分析相同。此时, A 相 TV 一次线圈上的电压为 U_A ,而且 $U_A < E_A$;一次线圈与铁芯(即对地)之间的电压为 U_{KA} ,且 $U_{KA} < E_A$ 。B、C 相 TV 一次线圈上的电压分别为 U_B 、 U_C ,且 $U_B > E_B$ 、 $U_C > E_C$;其一次线圈与铁芯之间的电压分别为 U_{KB} 、 U_{KC} ,两者均大于电源的相应相电压 E_B 和 E_C ,且接地引前相 C 相电压最高。三相 TV 中性点与系统中性点之间出现位移电压 $U_{NN'}$,与地之间出现位移电压 $U_{N'D}$ 。

因 A、B、C 相 TV 的三次辅助线圈实施“△”接线,故此时在“开口三角”上将出现 3 倍零序电压,运行中“开口三角”是直接短接的,故三相 TV 的辅助线圈中

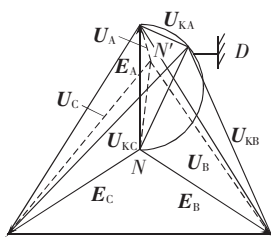


图 3 A 相经过过渡电阻接地相量图

Fig.3 Phasor diagram when phase A grounding via transition resistance

皆流过短路电流。JDZJ-10 型 TV 线圈绕组的排列,由内层到外层依次是三次、二次、一次。三次绕组在里层,紧贴铁芯。通常规定系统发生单相接地故障运行时间不得超过 2 h,故 TV 三次辅助线圈的热稳定按“ $1.2 A \times 2 h$ ”设计。如果三次线圈中的电流大于 1.2 A,则允许接地时间将相应缩短。

可见,在上述短路电流的作用下,必将使 A、B、C 三相 TV 的三次辅助线圈的匝间绝缘破坏,造成匝间短路进而对铁芯的绝缘破坏,发生接地。随着温度的不断升高,必将使二、三次绕组和一、二次绕组之间的绝缘损坏,B、C 相 TV 在较高的 U_{KB} 、 U_{KC} 的作用下,必将造成一、二、三次绕组绝缘被击穿并接地以及一、二次线圈的匝间短路。通过对 TV 外观检查发现,三相 TV 铁芯均有不同程度的烧灼、退火痕迹,亦说明三相 TV 的损坏亦是从小层辅助绕组开始的。

中性点 TV 上加的是 U_{ND} ,由于直流助磁的作用,将使 TV 阻抗减小,TV 的一次绕组中将流有较大的交流电流和直流电流,其结果是致使中性点 TV 的一次线圈过热,造成其匝间绝缘损坏和短路,外观检查发现 TV 环氧树脂开裂,亦说明烧损是由 TV 的一次绕组过热引起的。

5 结论

在交、直流混线造成电压互感器烧毁的过程中,直流助磁起到了关键性作用,直接导致电压互感器阻抗的三相不平衡;烧毁的过程是热量的累计过程,在电力系统运行中单相接地故障发生的几率最大^[10],应引起足够的重视,及时有效处理,避免事故扩大;对于交、直流线路交叉处在设计时应采取有效的措施,避免出现混线事故。

参考文献:

- [1] 李景禄,周羽生. 关于配网中性点接地方式的探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):85-86.
LI Jing-lu,ZHOU Yu-sheng. Study on neutral grounding modes of distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(8):85-86.
- [2] 王晓云,李宝树,庞承宗. 电力系统铁磁谐振研究现状分析[J].

电力科学与工程,2002(4):49-51.

WANG Xiao-yun,LI Bao-shu,PANG Cheng-zong. Research review on ferroresonance in power systems[J]. Electric Power Science and Engineering,2002(4):49-51.

- [3] 周浩,陈猷清,余宇红,等. 10 kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术,2005,29(22):24-34.
ZHOU Hao,CHEN You-qing,YU Yu-hong,et al. Comparative study on ferroresonance elimination measures in 10 kV power distribution system by simulation method[J]. Power System Technology,2005,29(22):24-34.
- [4] 陈飞,田园. 10 kV 电压互感器高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高压技术,2005,31(9):88-89.
CHEN Fei,TIAN Yuan. Frequent melting of 10 kV high voltage fuse link[J]. High Voltage Engineering,2005,31(9):88-89.
- [5] 黄金辉. “四 TV”方式消除铁磁谐振的机理和异常分析[J]. 华北电力,2000(10):20-24.
HUANG Jin-hui. Mechanisms and abnormal analysis of “Four TV” mode ferroresonance elimination[J]. East China Electric Power, 2000(10):20-24.
- [6] 陈衍. 电力系统暂态分析[M]. 2 版. 北京:水利电力出版社,1995.
- [7] HIMMELSTEIN G,王渤洪. 机电一体化走行装置的发展水平和可靠性分析[J]. 变流技术与电力牵引,2005(6):1-4.
HIMMELSTEIN G,WANG Bo-hong. Status of development and safety analysis of the mechatronic bogie[J]. Converter Technology & Electric Traction,2005(6):1-4.
- [8] 苏贵荣. 城市轨道交通牵引变电所[J]. 上海电器技术,2005(2):9-18.
SU Gui-rong. Traction power station in urban rail transit system [J]. Shanghai Electric Appliance Technology,2005(2):9-18.
- [9] 李谦,陈猷清,王晓瑜,等. 变压器和电磁式电压互感器铁芯励磁特性曲线转换方法的讨论[J]. 变压器,1993,30(12):10-13.
LI Qian,CHEN You-qing,WANG Xiao-yu,et al. Method of converting excitation characteristics of power transformers and potential transformers[J]. Transformer,1993,30(12):10-13.
- [10] 李冬辉,史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器,2004,32(18):74-78.
LI Dong-hui,SHI Lin-tong. Survey of the methods to select single-phase fault line in neutral point indirectly grounded power system[J]. Relay,2004,32(18):74-78.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

魏晓云(1973-),女,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事电力系统运行分析及电力电子技术研究(E-mail: xfg@dlgd.com);

鞠艳杰(1975-),女,辽宁本溪人,硕士研究生,主要从事电力电子技术研究。

Analysis of potential transformer burnout caused by AC and DC lines interconnection

WEI Xiao-yun, JU Yan-jie

(Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The interconnection of AC and DC lines causes the burnout of PT(Potential Transformer). Voltages of normal operating PT in 10 kV system under three conditions are studied;with unbalanced three-phase impedance,grounding with transition resistance and both. The process of PT burnout is analyzed in detail when 10 kV AC system interconnects 1 kV DC system. The high voltage DC flowing into AC system makes the PT iron core quickly saturated,causing the unbalance of three-phase impedances and the burnout of PT. To remove the single-phase grounding fault effectively and in-time may stop the fault spreading,and to avoid the interconnection of AC and DC lines in design is fundamental measures.

Key words: transition resistance; neutral point; arc suppression coil; ferromagnetic resonance; offset voltage