

500 kV 变电站 35 kV 电压互感器爆炸事故分析

董继民

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 分析了不接地系统两相经过渡电阻接地, 非故障相电压升高, 产生电弧接地过电压, 激发铁磁谐振的复故障过程特征。基于故障数据, 采用相量分析方法, 对某 500 kV 变电站 35 kV 互感器爆炸事故进行了快速的故障定位分析和判定, 提出了有效的防范措施。现场实践证明了该方法的简捷有效性, 对变电站快速诊断事故及进行有效的防范具有一定的参考意义。

关键词: 变电站; 不接地系统; 两相接地故障; 电弧接地过电压; 铁磁谐振

Analysis of explosion on 35 kV voltage transformer in 500 kV substation

DONG Ji-min

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper deals with the process of a multiple fault occurring on non-earthed neutral system, which originates from two-phase grounding fault and non-fault phase voltage rising simultaneously, thus causing arc-grounding overvoltage and probably driving the voltage transformer saturated, resulting in ferro-resonance. In this paper, based on actual fault wave-form recorded data on a 500 kV substation and phasor analysis, the type of the fault and the causes of 35kV PT explosion are analyzed in a quite clear and effective way. Furthermore, measures are proposed to prevent such faults. Fault investigation on the spot shows that the analysis in this paper is valid and enables substation operator to identify such faults quickly and avoid serious consequences.

Key words: substation; non-earthed neutral system; two-phase grounding fault; arc-grounding overvoltage; ferro-resonance

中图分类号: TM63 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)13-0082-04

0 引言

变电站不接地系统中发生两相经过渡电阻接地时, 其短路电流及母线各相对地电压的变化受接地点和接地电阻的影响很大, 常规的继电保护难以准确反映两点接地故障及切除故障线路^[1,2]。同时由于非故障相的电压升高往往引起对地绝缘薄弱的地方闪络, 发生电弧接地。在多数情况下, 电弧接地点往往产生弧光过电压, 导致互感器饱和, 激发铁磁谐振, 造成互感器烧毁^[3,4]。本文在分析不接地系统两相经过渡电阻接地故障特征及电弧接地过电压激发铁磁谐振现象的基础上, 结合故障录波数据, 采用相量分析方法, 对某 500 kV 变电站 35 kV 互感器爆炸事故进行了快速的故障定位分析和判定, 并提出了有效的防范措施。对变电站快速诊断事故及进行有效的防范具有一定的参考意义。

1 不接地系统两相接地故障电压特征

假定在线路长度几乎相等的地方, 发生 B、C 相

经过渡电阻 R_b 和 R_c 接地, 见图 1 所示。

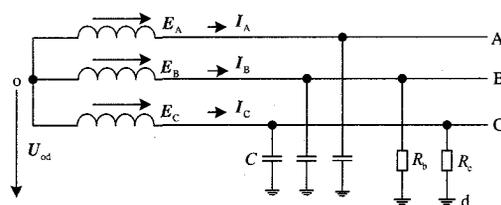


图 1 两相经过渡电阻接地示意图

Fig. 1 Two-phase grounding fault with transition resistance

根据图 1, 故障电流分量可表示为:

$$I_B = -I_C = E_{BC} / Z \quad (1)$$

$$\Phi = \arctan \frac{2X_B}{2R_b + R_b + R_c}$$

$$Z = R_b + R_c + Z_B + Z_C$$

$$Z_B = R_B + X_B = Z_C$$

式中: Z_B 表示系统到故障点的等值阻抗, Φ 为故

障电流 I_B 滞后或朝前 E_{BC} 的角度, 根据系统等值阻抗特性在 -90° 到 90° 之间变化。

显然, 当接地短路点远离电源侧, 或接地电阻较大时, 故障电流 I_B 很小, 难以准确测量。但故障时各相的对地电压却发生了很大变化。变化情况可以矢量图 2 说明。

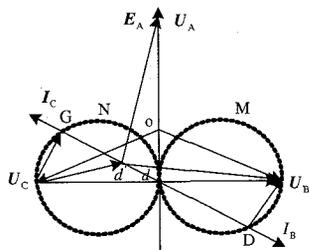


图 2 两相经过渡电阻接地电压矢量图 $R_b > R_c$

Fig.2 Voltage vector after two-phase grounding, $R_b > R_c$

当 $R_b = R_c$ 时, 故障点位于矢量图 2 的 d 点。不计系统等值电阻上的压降, 过渡电阻上的压降为 $U_{Rb} = dD$, $U_{Rc} = dG$, 且过渡电阻上的压降是随着过渡电阻的大小与 ϕ 角而变化, 其变化轨迹为 U_{Rb} 沿着 M 圆弧变化, U_{Rc} 沿着 N 圆弧变化。电源侧的电压值分别为 U_{Ad} , U_{Bd} , U_{cd} 。

当 $R_b \neq R_c$ 时, 接地点在相量图中沿 I_B 电流方向发生偏移, 如图 2 中, $R_b > R_c$ 时, 偏移至 d' 点所示, 同理可知, 电源侧的电压值。

根据图 2 的几何性质可知: ①接地点沿电流方向变动, 且落在以故障相 $\sqrt{3}/2$ 相电势为直径的一个圆内; ②非故障相对地的最大过电压为 1.98 倍的相电压值, 容易引起非故障相的电弧接地。

2 电弧接地过电压特征

如 A、B 相经过渡电阻 R_a 和 R_b 接地, C 相往往因电压升高而引起电弧接地, 见图 3 所示。

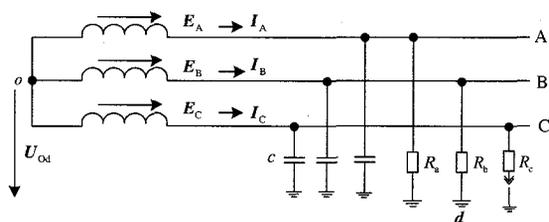


图 3 两相接地非故障相电弧接地示意图

Fig.3 Phase C arc-grounded and phase A and B grounded with resistance

为简单说明电弧的发展过程, 假定过渡电阻比较大, 且 $R_b = R_a$, C 相在工频电压正半周最大值, 即: $U_C = +U_\phi$, $U_A = U_B = -0.5U_\phi$ 时发生电弧接地, 则三相电压变为: $U_C = 0$, $U_A = U_B = -1.5U_\phi$ 。

显然, 发弧后, 形成一个对 A、B 两相电容的充电振荡过程, 其可能出现的最大过电压为:

$$U_{vv} = U_{st} + U_{os} = U_{or} + 2U_{os} = 2U_{st} - U_{or} \quad (2)$$

$$U_{os} = U_{st} - U_{or}$$

式中: U_{vv} , U_{st} , U_{os} , U_{or} 分别表示过电压、最后的稳定电压、振荡电压、初始电压。

以式 (2), 可计算出 A、B 相上的过电压为:

$$U_A = U_B = -2 \times 1.5U_\phi + 0.5U_\phi = -2.5U_\phi$$

经过 $T/2$ 周期, 电弧熄灭时各相上的电压为: $U_C = 0$, $U_A = U_B = 1.5U_\phi$ 。此时, A、B 相上电容聚集的电荷为 $Q = 2 \times C \times 1.5U_\phi$ 。此电荷将重新分配到三相对地电容上。于是在各相上会叠加一个直流位移分量, 其数值为 $U_{vd} = Q/3 = U_\phi$, 其方向为 C 相电压矢量方向, 使各相电压变为:

$$U_C = -U_\phi + U_{vd} = 0$$

$$U_A = U_B = 0.5U_\phi + U_{vd} = 1.5U_\phi$$

此值即成为新的各相电压初时值。

经过周期 T , C 相电压又达到最大值, 此时,

$$U_C = U_\phi + U_{vd} = 2U_\phi$$

$$U_A = U_B = -0.5U_\phi + U_{vd} = 0.5U_\phi$$

假定这个时候第二次燃弧, 则 C 相电压由 $2U_\phi$ 突然降为零, A、B 两相电容从 $0.5U_\phi$ 充电到 $1.5U_\phi$, 由 (2) 式可计算出其最大过电压为:

$$U_{max} = -2 \times 1.5U_\phi - 0.5U_\phi = -3.5U_\phi$$

显然, 暂态过电压随着接地电弧的重燃一次比一次高, 最大值不会超过 $3.5U_\phi$ 。在不接地系统中超过 3 倍相电压值的概率很低, 但如此高的过电压很容易引起测量互感器的饱和, 激发铁磁谐振。

3 互感器的饱和及铁磁谐振现象

设系统正常运行在空载状态, 三相保持平衡, 其单相等值回路可以图 4 表示。

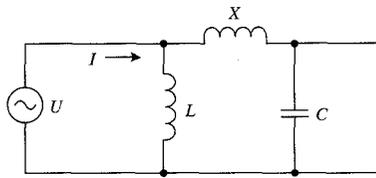


图 4 单相等值回路图

Fig. 4 Single-phase equivalent circuit

在图 4 中: U, L, X, C 分别代表系统等值电源, 互感器等值电感, 线路等值阻抗, 系统等值对地电容。

正常时, 电压互感器运行在额定电压, 铁芯没有饱和现象, 电感 L 大, 系统呈容性状态。当系统出现过电时, 互感器的激磁电流增大, 铁芯由正常状态向饱和状态过渡, 电感 L 变小。电压越高, 激磁电流增加越多。随着激磁电流的不断增大, 互感器等值感抗进一步降低。当系统等值回路感抗与容抗相等时, 将产生严重的谐振。谐振后互感器激磁电流很大, 并包含多种谐波。由于谐振电流的急速增大, 互感器会急剧发热, 如无及时保护, 互感器越聚越多的热能在无法释放时就会爆炸。

4 变电站互感器爆炸事故故障定位分析

某电站变压器为 500 kV/220 kV/35 kV, 35 kV 采用 Δ 接线方式。2007 年 7 月发生了一起 35 kV 侧互感器爆炸事故。在互感器爆炸前, 录波器连续两次启动, 记录了故障过程中的数据。

4.1 第一次启动数据故障定位分析

录波器第一次启动时间为 14 时 56 分 29 秒, 电压有效值见表 1 所示 (取故障前后一个周波)。

表 1 35 kV 互感器电压

Tab.1 35 kV PT voltage

故障前 典型值	主变 35kVPT 电压/V			
	A	B	C	$3U_0$
故障前	59.585	57.436	61.965	4.695
故障后	60.601	46.396	96.915	69.407

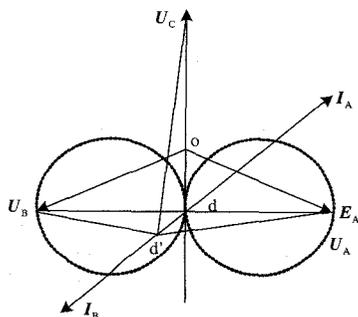


图 5 AB 相经过渡电阻接地电压相量图

Fig. 5 Voltage vector, phase A and B grounded through transition resistance

根据故障后 A, B, C 三相的电压值可以确定接地点在相量图 5 中的位置 d' 。

在 d' 点, 可以排除单相接地故障的可能^[5]。根据前面对不接地系统接地点的分析, 在两相短路故障中, 只有 A、B 相经过渡电阻接地故障, 且 $R_a > R_b$, 满足接地点区域范围。

零序电压为 69, 估计因零序互感器饱和而降低, 此后现场实践证明了该点。

4.2 第二次启动数据故障定位分析

系统在 A、B 相经高阻接地的故障状态下运行不到 2 min, 即在 14 时 56 分 29 秒, 录波器再次启动, 电压、电流有效值数据见表 2 所示。

表 2 35 kV PT 电压、CT 电流

Tab.2 35kV PT voltage and CT current

故障前	主变 35kVPT 电压/V				主变 35kVCT 电流/A			
	A	B	C	$3U_0$	A	B	C	$3I_0$
故障前	110.088	93.509	23.621	78.640	0.034	0.012	0.013	0.018
故障前	114.584	99.187	30.843	85.743	0.038	0.016	0.011	0.012
故障后	135.182	115.022	102.010	134.498	5.445	2.694	2.697	0.043
故障后	72.248	50.578	73.891	270.645	5.375	3.532	3.878	0.041
故障后	118.277	112.202	114.698	248.144	5.175	5.825	5.853	0.049

从表 2 故障前数据看, 第一周波 A 相电压为 110, B 相为 93, C 相为 23, 变化到第二周波 A 相电压为 114, B 相为 99, C 相电压为 30, 已表明了系统发生了 C 相电弧接地, 其过电压的上升过程可以图 6 表示。

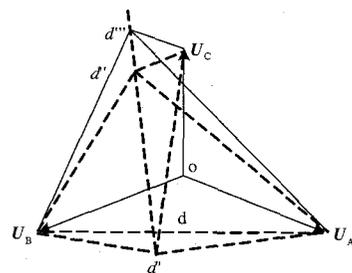


图 6 A、B 两相接地 C 相电弧接地故障发展过程相量图

Fig. 6 Voltages vector after two-phase grounding and non-fault phase arc-grounding

在图 6 中, 设电弧位移电压沿 $d'd''$ 轴线方向变化, d' 表示表 1 中, A、B 两相经过渡电阻的故障数据接地点; d'' 、 d''' 分别表示表 2 中的故障前第一周波数据和第二周波数据所代表的 C 相电弧接地点。

随着 C 相电弧接地过程的发展, 一方面 A、B 两相过电压不断上升, 互感器的激磁电流不断增大, 互感器向饱和状态过渡, 等值感抗降低。另一方面,

如果接地点突然消失,超过线电压的电容上的电能只能通过互感器高压绕组的中性接地点流入大地,在这个瞬变过程中,电压互感器绕组中将流过一个幅值很高的低频饱和电流,使互感器的铁芯严重饱和,导致铁磁谐振。谐振后电流急速增加,造成互感器的急剧发热而爆炸。表 2 中的 5 个周波故障数据清晰的表明了该过程。

综上,整个故障的发展过程见表 3 所示。

表 3 故障发展过程电压数据变化表

Tab.3 35kV PT voltage in the process of fault

	主变 35kVPT 电压/V			
	A	B	C	3U ₀
正常运行值	59	57	61	4
AB 相电阻接地	60	46	96	69
C 电弧接地	110	93	23	78
	114	99	30	85
铁磁谐振	135	115	102	134

从表 3 及图 6 中可明显看出电源侧电压在故障发展过程中的变化规律。

5 结论

500 kV 变电站高中压接地系统的保护配置一般很完善,但 35 kV 不接地系统的故障却往往影响变电站的安全运行。通过对变电站 35 kV 不接地系统发生的 A、B 两相经高阻接地,引发 C 相电弧接地过电压,产生铁磁谐振,导致互感器爆炸的故障特征分析,以加强对不接地系统发生故障时的保护措施。如提高故障的准确判定,进行保护装置灵敏度的校验,增加利用故障信息再分析的后备保护,加强消谐等,防止类似事故的发生。

致谢

本文故障数据由深圳市双合电脑股份有限公司提供,特此感谢!

参考文献

- [1] 张波,王越.中性点不接地系统同一点两相接地短路故障分析[J].继电器,2007,35(15):59-60.
ZHANG Bo,WANG Yue.Analysis of Two-phase Grounding Fault of Isolated Neutral System[J].Relay,2007,35(15):59-60.
- [2] 余水忠.小接地系统两相接地短路分析[J].继电器,2000,28(2):25-27.
YU Shui-zhong .Analysis of Two-phase Short Circuit Fault in the Power System with Floating Neutral[J].Relay,2000,28(2):25-27.
- [3] 高亚栋,等.中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J].高压电器,2004,40(5):345-348.
GAO Ya-dong, et al. Study on Arc-grounding Overvoltage in Distribution System with Neutral Point Grounded Through Low-resistance[J].High Voltage Apparatus,2004,40(5):345-348.
- [4] 翁利民,等.配电网电压互感器铁磁谐振的特点与抑制[J].继电器,2004,32(20):40-42.
WENG Li-min,et al. Characteristics and Suppression of Ferro-resonance of Electromagnetic PT in Distribution Network[J].Relay,2004,32(20):40-42.
- [5] 宗剑,等.配电网单相接地故障种类及程度的判据[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(4):27-29.
ZONG Jian,et al. Criterion of Single-phase Ground Fault Type and Its Degree for Distribution Network[J].Proceedings of the EPSA,2004,16(4):27-29.

收稿日期:2007-10-30

作者简介:

董继民(1960-),男,工程师,主要从事电力系统运行控制与保护的教学与研究。E-mail: jimin_dong@163.com

“中国电力系统保护与控制学术研讨会”预通知

“中国电力系统保护与控制学术研讨会”预定于 2008 年 10 月 18 日-21 日在山东烟台隆重召开,敬邀各单位和专家向大会投稿并届时参加。

会议征文内容:

超(特)高压交直流输电技术研究与应用;电力系统保护与控制的新理论、新技术;电力系统安全稳定分析与控制;电力系统规划与可靠性技术;电力市场;配电网自动化;厂、站自动化;调度自动化;电力系统通信技术;电气化铁道保护与控制技术;电网广域保护与自愈控制;数字化变电站技术研究;电力设备检测与故障诊断技术;电力电子技术在电力系统的应用;保护与控制设备运行经验与事故分析;保护与控制设备制造技术及电磁兼容;其他。

会议征文办法:

论文未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过;论文格式参照《继电器》论文格式,图表清晰、规范;论文篇幅在 6000 字以内(含空格,图表);来稿请务必写明:作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件;请用电子邮件投稿并使用回执确认收到投稿。

征文截止日期:2008 年 8 月 15 日,经专家评审后,由《继电器》杂志社在 8 月 31 日前发论文录用通知,并出版论文集。

投稿邮箱:dlbh2008@126.com; dlbh@dlwg.net 地址:河南省许昌市许继大道 32 号;邮编:461000 联系电话:0374-3212254 0374-3212234