

伏祥运, 李 红, 邱 涛

摘要: 本文对一起电压异常事故处理情况进行介绍,事故发生时虽然单相接地信号打出,但系统电压显示与单相接地时电压分布差异较大,造成故障分析判断困难。通过综合分析电压互感器开口三角电压输出和消弧线圈动作情况,判定系统发生了单相接地故障,并且电压二次接线存在错误。结合变电站一、二次接线情况,对系统运行工况进行详细深入的理论分析,并通过仿真验证理论分析的正确性。通过对比研究,理论分析、系统仿真和实际系统工况三者相互吻合,论证了对事故判断的正确性,并对二次接线存在的问题提出整改建议。通过对该事故处理和介绍,给从事相关专业人员对类似事件分析和处理提供一定的启示和参考。

1 事故过程简述

知现场对所内设备查看无异常后，对 10kV 出线进行试拉，并通知检修人员检查电压二次回路接线情况。当拉开 X 线出线开关时，10kVII 段母线电压恢复正常 A 相 6.1kV，B 相 6kV，C 相 6kV。通知 20:50，查 10kV X 线某一支线 A 相导线被风刮断，掉在地上，后将该段线路停电检修。处理结束后，送电正常。

经查该变电站 10kVII 段母线所采用的是 JDZXF11-10B 型电压互感器, 为测控、计量独立设置的单相独立式结构。电压互感器有三个二次绕组, 变比为:

在 10kV 系统中, 为了正确地指示各相的对地电压, 电压互感器的一次侧一般采用中性点接地的星形接法, 三个二次绕组分别作为计量、测控、零序电压检测电压输出绕组, 主接线方式如图 2 所示。

配调调度员按照单相接地故障的处理流程，通

压并列柜的零序电压输出 N 点，并单点接地。AM、BM、CM、N 分别接入测控单元，进行 A、B、C 三相线电压和相电压的检测；L、N 接入测控装置进行零序电压的检测。AJ、BJ、CJ 作为计量使用。

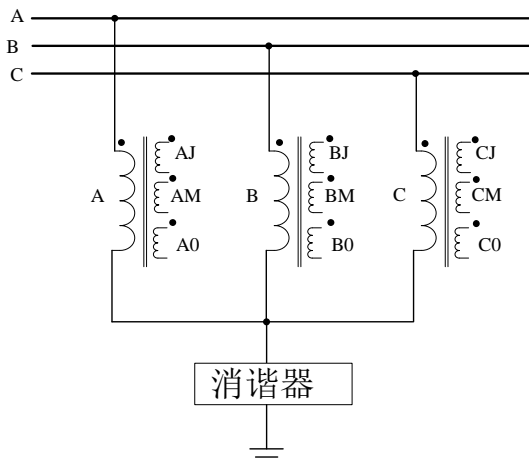


图 2 电压互感器接线示意图

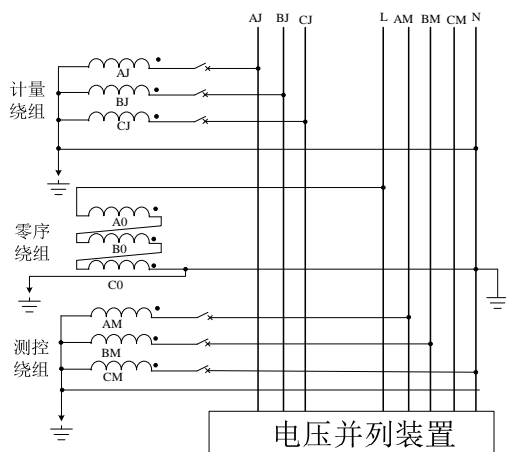


图 3 电压二次接线图

为分析方便，设 10kV 母线三相对地电压分别为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_A \angle \delta_A \\ \dot{U}_B &= U_B \angle \delta_B \\ \dot{U}_C &= U_C \angle \delta_C \end{aligned} \quad (1)$$

根据电压互感器变比及极性关系可知：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AM} &= \frac{1}{100} U_A \angle \delta_A \\ \dot{U}_{BM} &= \frac{1}{100} U_B \angle \delta_B \\ \dot{U}_{CM} &= \frac{1}{100} U_C \angle \delta_C \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AJ} &= \frac{1}{100} U_A \angle \delta_A \\ \dot{U}_{BJ} &= \frac{1}{100} U_B \angle \delta_B \\ \dot{U}_{CJ} &= \frac{1}{100} U_C \angle \delta_C \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} &= \frac{\sqrt{3}}{300} U_A \angle \delta_A \\ \dot{U}_{B0} &= \frac{\sqrt{3}}{300} U_B \angle \delta_B \\ \dot{U}_{C0} &= \frac{\sqrt{3}}{300} U_C \angle \delta_C \end{aligned} \quad (4)$$

由于零序电压检测二次绕组为开口三角形接线方式，开口三角输出电压 \dot{U}_{LN} 为：

$$\dot{U}_{LN} = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{C0} = \frac{\sqrt{3}}{300} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \quad (5)$$

3 检测电压分析

根据第 1 节对事故现象的介绍，结合上节对电压一、二次电压接线的介绍，通过分析判断为电压监测装置二次接线错误，误将 L 线作为 N 接入电压检测装置，下面通过理论分析进行验证。

假设系统三相电压对称，电压线电压有效值为 10kV，取原 A 相电压的反方向为相位参考 0° 。

当系统正常运行时，三相电压对称，根据式(5)

可知： $\dot{U}_{LN} = \frac{\sqrt{3}}{300} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 0$ ，即 L 点与 N 点同电位。因此 L 点接入和 N 点接入，三相电压检测结果相同。

则当 C 相接地时，A、B、C 三相对地电压向量图如图 4 所示，分别为：

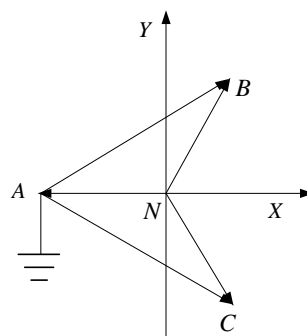


图 4 电压向量图

$$\begin{aligned}
\dot{U}_A^g &= 0 \\
\dot{U}_B^g &= 10000\angle 30^\circ \\
\dot{U}_C^g &= 10000\angle -30^\circ \\
\dot{U}_{LN}^g &= \frac{\sqrt{3}}{300}(10000\angle 30^\circ + 10000\angle -30^\circ) = 100\angle 0^\circ
\end{aligned} \quad (6)$$

$$(7)$$

将 L 误作为 N 接入测控装置, 则实际测量电压为:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{AL}^g &= \dot{U}_{AM}^g - \dot{U}_{LN}^g \\
\dot{U}_{BL}^g &= \dot{U}_{AM}^g - \dot{U}_{LN}^g \\
\dot{U}_{CL}^g &= \dot{U}_{AM}^g - \dot{U}_{LN}^g
\end{aligned} \quad (8)$$

由式 (2)、(6)、(7) 可得:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{AL}^g &= 0 - 100 = 100\angle 180^\circ \\
\dot{U}_{BL}^g &= 100\angle 30^\circ - 100 = 200\sin(15^\circ)\angle 105^\circ \\
\dot{U}_{CL}^g &= 100\angle -30^\circ - 100 = 200\sin(15^\circ)\angle -105^\circ
\end{aligned} \quad (9)$$

根据上式可知, 由于 $\sin(15^\circ) \approx 0.259$, 因此在 A 相接地时, B、C 相电压二次有效值约为 52V, 而 A 相电压二次有效值为 100V。由电压互感器变比折算可知 A 相电压显示为 10kV, 而 B、C 相电压显示 5.2kV。与 A 相接地时电压显示相符。

由于单相接地信号是根据开口三角输出电压超过某一限值触发的, 接线错误对此没有影响, 因此单相接地信号显示正常。

4 仿真验证

为了进一步验证上述理论分析的正确性, 本文利用 Matlab7.0 建立仿真模型, 进行分析验证, 系统模型如图 5 所示。

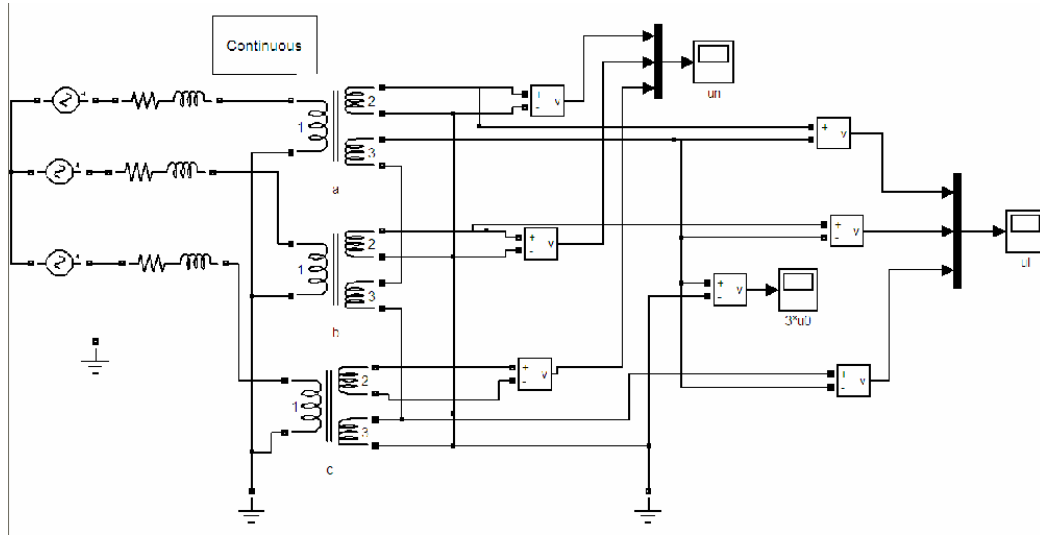
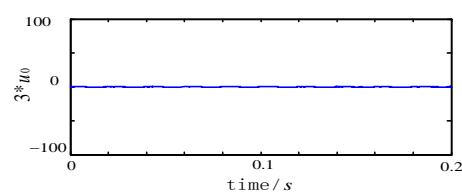


图 5 仿真模型图

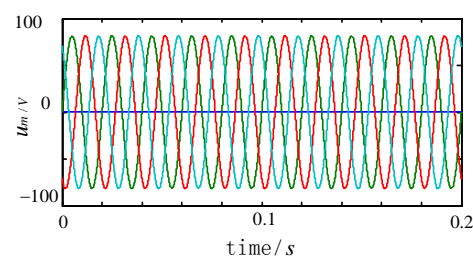
图 6 给出了 10kV 系统正常运行 (无接地) 时, 电压曲线。从图 6 可以看出, 在系统正常运行时, 正确接线和错误接线三相电压检测结果基本相同。从图 6 (a) 可知开口三角输出电压基本为 0, 即 L 点与 N 电基本为等电位, 因此三相对中性点 N 和对 L 点电压基本相同, 所以错误接线与正确接线电压检测结果基本一致。

图 7 给出了 10kV 系统 A 相接地时, 检测电压曲线。从图中可以看出: 当 A 相接地时, 开口三角

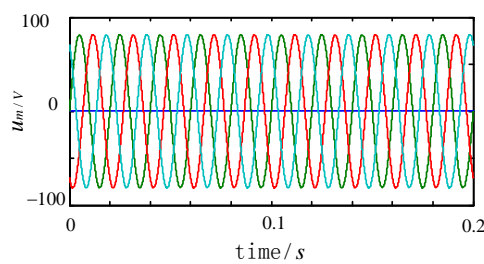
输出电压幅值约为 141V (有效值 100V)。这是正确接线情况下, A 相电压为 0, B、C 相电压幅值约为 141V (有效值 100V), 相位差为 60° 。在文中变电站错误接线的情况下, A 相电压为幅值约为 141V (有效值 100V), B、C 相电压幅值约为 73V (有效值 52V), B 相超前 A 相约 75° , C 相滞后 A 相 75° 。上述仿真结果与式 (9) 所示分析结果是吻合的。



(a) 开口三角输出电压

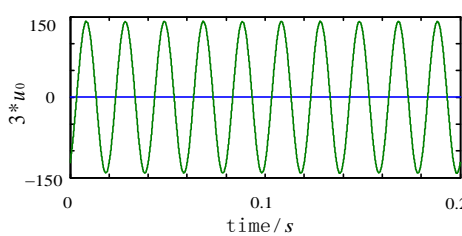


(b) 正确接线时三相检测电压

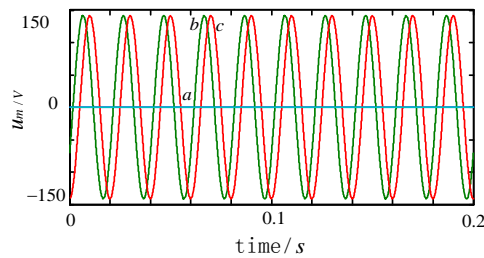


(c) 错误接线时三相检测电压

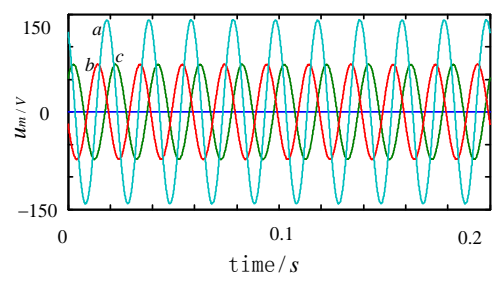
图 6 系统正常运行时检测电压曲线



(a) 开口三角输出电压



(b) 正确接线时三相检测电压



(c) 错误接线时三相检测电压

图 7 系统 A 相接地时检测电压曲线

仿真结果与第 3 节理论分析是一致的，验证了理论分析的正确性。

5 结论

对一起电压异常事故处理情况进行介绍，通过电压互感器开口三角和消弧线圈动作情况，在电压显示不正确的情况下准确判断了系统故障类型，并初步判断二次接线存在的问题。结合变电站一、二次接线情况，通过理论分析和仿真研究，论证了二次接线错误的判断的正确性，通过理论分析、仿真研究、系统实际情况进行对比，三者情况相互吻合，验证了对二次回路存在问题的判断。

由于新设备启动过程中，系统正常运行，开口三角等电压二次量接线正确性难以试验确定，因此在验收过程中要严格履行二次回路通流通压试验，并结合实际情况，探索二次回路新型试验验证方法。

参考文献：

- [1] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 北京：中国电力出版社，1981.
- [2] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京：水利电力出版社，1991.
- [3] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

作者简介：

伏祥运（1977-），男，江苏赣榆人，博士，高级工程师，高级技师，主要从事电力系统运行分析、无功功率补偿及谐波电流抑制、电能质量控制等方面的研究；
李 红（1980-），男，江苏连云港人，工程师，主要从事电网规划、变电设计等相关工作；
邱 涛（1971-），男，江苏连云港人，高级工程师，主要从事电网继电保护等相关工作。