

# 三相四PT异常电压分析方法

李家斌, 徐 军

(江苏省电力公司, 江苏 常州 213003)

**摘 要:** 在小电流接地系统中, 三相四 PT 的电压互感器接线, 能够正确反应一次异常电压, 能准确判断单相接地和高压熔丝熔断等异常情况, 且其接线形式清晰, 因而三相四 PT 的电压互感器接线方式得到广泛应用。本文首先介绍了三相四 PT 接线方式二次电压的特征, 然后分别分析了正序、负序、零序电压在三相四 PT 接线方式的特征, 最后结合实际, 定量分析单相接地和高压熔丝熔断两种异常电压情况, 三相四 PT 电压特征, 本文分析逻辑严密, 分析方法清晰明确, 为我们其他类似问题分析提供借鉴。

**关键词:** 三相四 PT 接线; 电压相序分量; 单相接地; 高压熔丝熔断

## 0 引言

在小电流接地系统中, 为防止单相接地时出现谐振过电压, 很多系统采用了三相四 PT 接线方式, 其具体接线方式就是在星形接线母线压变中性点加装一只零序压变, 在系统中我们一般称为三相四 PT 接线方式。这种接线形式清晰, 满足二次电压回路设备采样要求, 能反应系统发生单相接地和高压熔丝熔断等异常, 还能有效防止铁磁谐振, 避免电压互感器烧毁, 三相四 PT 接线方式越来越多在现场得到了应用。

## 1 三相四 PT 的接线方式介绍

### 1.1 三相四 PT 的接线方式

三相四 PT 的接线方式如图 1 所示。

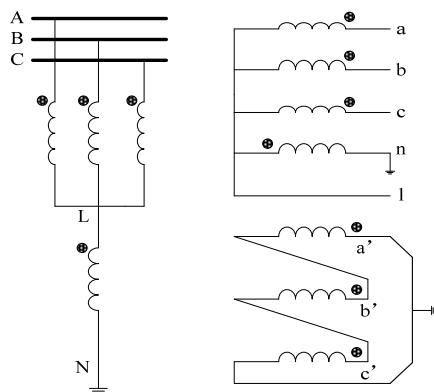


图 1 三相四 PT 接线方式图

以某变电站 10kV 母线电压采用三相四 PT 的接线方式为例, 其压变设备铭牌变比为:

3 只相 PT 变比为  $10/\sqrt{3} / 0.1/\sqrt{3} / 0.1/\sqrt{3} \text{ kV}$ ;

消谐 PT 的变比为:  $10/0.1 \text{ kV}$ 。

### 1.2 等效电路原理分析

三相四 PT 接线方式其等效电路图如图 2 所示。

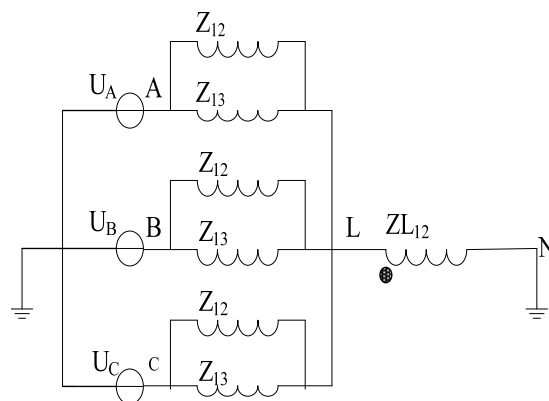


图 2 等效电路图

其中  $Z_{12}$ ,  $Z_{13}$  为相 PT 二次绕组回路和三次绕组（有地方称为剩余绕组）回路折算到一次侧的等效阻抗。 $Z_{L12}$  为消谐 PT（也有称为零序 PT）的二次绕组折算到一次侧的等效阻抗。 $Z_{12}$ （二次绕组阻抗）与  $Z_{13}$ （三次绕组阻抗）属于并联关系, 再与  $Z_{L12}$ （零序 PT 阻抗）串联。

## 2 三相四 PT 各序电压特征

### 2.1 正序等效网络理论分析

正序电压网络, 其矢量关系:

$U_{AN1} = U \angle 0^\circ$ ;  $U_{BN1} = U \angle -120^\circ$ ;  $U_{CN1} = U \angle 120^\circ$ ;  
其正序电压矢量图如图 3 所示。

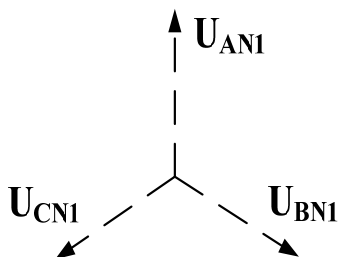


图3 正序电压矢量图

PT 二次绕组回路所接负载为采样模块内阻, 折算到1次侧在10M 欧左右

PT 三次绕组回路中, 二次 a' 和 c' 之间短接, 由于通过的是正序电压, 三相电压矢量之和为零, 故三次绕组二次回路中电流为零, 而三次绕组单独各相均有 57.7V, 可以认为个相 PT 三次绕组所带负载为 57.7/0, 即为无穷大, 即亦可作为开路分析。

零序 PT 回路中, 通过平衡三相正序电压, 理想条件下, 零序 PT 的 L 端电压为零, L 端与接地 N 端电压也为零, 故通正序电压时可以认为零序 PT 不起作用。

通过三相正序电压对称, 此时有一次电压:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{AL} = U_{AN1} = U \angle 0; \\ U_{BN} &= U_{BL} = U_{BN1} = U \angle -120; \\ U_{CN} &= U_{CL} = U_{CN1} = U \angle 120; \\ U_{LN} &= 0. \end{aligned}$$

二次电压可得:

$$\begin{aligned} u_{an} &= u_{al} = u_{an1} = u \angle 0; \\ u_{bn} &= u_{bl} = u_{bn1} = u \angle -120; \\ u_{cn} &= u_{cl} = u_{cn1} = u \angle 120; \\ u_{ln} &= 0. \end{aligned}$$

现场试验数据与上述理论分析相吻合, 充分证明了以上理论分析正确性。

## 2.2 负序等效网络理论分析

负序电压网络, 其矢量关系:

$$U_{AN2} = U \angle 0; U_{BN2} = U \angle 120; U_{CN2} = U \angle -120;$$

其负序电压矢量图如图4所示。

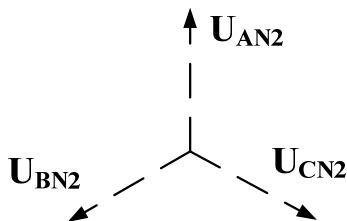


图4 负序电压矢量图

由于其负序电压和正序电压只是向量旋转方向相反, 故其负序电压分析方法和正序分析方法一样。

通过三相负序电压对称, 此时有一次电压:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{AL} = U_{AN1} = U \angle 0; \\ U_{BN} &= U_{BL} = U_{BN1} = U \angle 120; \\ U_{CN} &= U_{CL} = U_{CN1} = U \angle -120; \\ U_{LN} &= 0. \end{aligned}$$

二次电压可得:

$$\begin{aligned} u_{an} &= u_{al} = u_{an1} = u \angle 0; \\ u_{bn} &= u_{bl} = u_{bn1} = u \angle 120; \\ u_{cn} &= u_{cl} = u_{cn1} = u \angle -120; \\ u_{ln} &= 0. \end{aligned}$$

## 2.3 零序等效零序供电网络

零序电压网络, 其矢量关系:

$$U_{AN0} = U_{BN0} = U_{CN0} = U \angle 0;$$

其零序电压矢量图如图5所示。

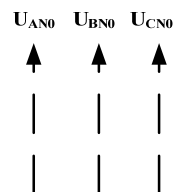


图5 零序电压矢量图

PT 二次绕组回路所接负载为采样模块内阻, 折算到一次侧在10M 欧左右。

PT 三次绕组回路中, 由于通过的是零序电压, 三相电压矢量相同, 故三次绕组回路中有电压差, 并且三次 a' 和 c' 之间短接, 故  $Z_{13}$  (三次绕组阻抗) 折算到一次的阻抗特别小,  $Z_{12}$  (二次绕组阻抗) 与  $Z_{13}$  (三次绕组阻抗) 属于并联关系, 再与  $Z_{L12}$  (零序 PT 阻抗) 串联, 故对一次电压, 零序电压降几乎都加在零序 PT 上。

加零序电压, 电压大部分压降都承担在零序 PT 上, 只有很少电压降加在三相 PT 上, 故虽然三次绕组 a' 和 c' 之间短接, 三相 PT 承受的容量不大, 三相 PT 任然可以正常运行。

根据分压原理, 零序电压基本都集中在消谐 PT, 三相 PT 上几乎无零序电压。

通过三相零序电压, 此时有一次电压:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{BN} = U_{CN} = U_{AN0} = U_{BN0} = U_{CN0} = U \angle 0; \\ U_{AL} &= U_{BL} = U_{CL} = 0; \\ U_{LN} &= U \angle 0; \end{aligned}$$

二次电压可得:

$$u_{an}=u_{bn}=u_{cn}=u\angle 0$$

$$u_{a1}=u_{b1}=u_{c1}=0;$$

$$u_{ln}=u\angle 0。$$

现场试验数据与上述理论分析相吻合，充分证明了以上理论分析正确性。

### 3 异常电压分析

线性电路回路中，任何三相不平衡电压都可以分解为正序、负序和零序电压向量之和，运用正序网络、负序网络、零序网络电压进行等效叠加方法来分析异常电压，可以化复杂电压为简单对称电压来分析。

正序、负序和零序电压向量与不平衡三相电压向量的关系如下：

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

其中运算符  $a=e^{j120^\circ}$ 。

小电流接地电网运行中，常见异常电压回路情况：单相接地和单相高压熔丝熔断。本文将详细分析这两种情况，推而广之，可以应用到其他任何不平衡电压回路中。

#### 3.1 单相接地异常电压分析

小电流接地系统发生单相接地时（以 A 相接地为例），其电压矢量关系如图 6 所示。

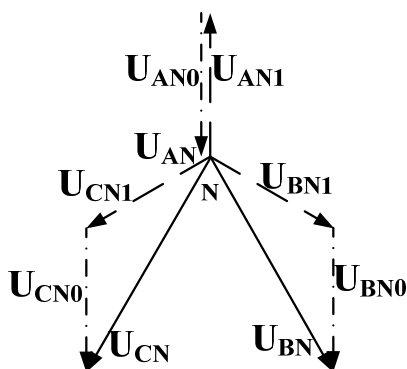


图 6 单相接地运行时电压矢量图

单相接地的电压网络可以分解为正序和零序电压向量之和，其等效矢量图如图 7 所示。

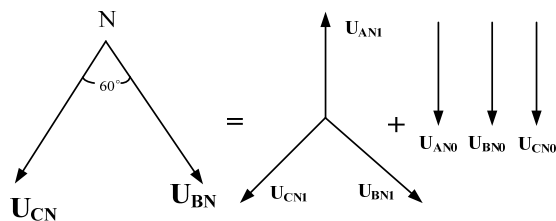


图 7 单相接地运行时各序电压矢量等效分解图

其一次电压向量叠加如下：

$$U_{AN}=U_{AN1}+U_{AN0}=U+U\angle 180=0;$$

$$U_{BN}=U_{BN1}+U_{BN0}=U\angle -120+U\angle 180=\sqrt{3}U\angle -150;$$

$$U_{CN}=U_{CN1}+U_{CN0}=U\angle 120+U\angle 180=\sqrt{3}U\angle 150;$$

$$U_{LN}=U_{LN1}+U_{LN0}=0+U\angle 180=U\angle 180;$$

由线性电路回路电压叠加原理，和上节分析结果可得二次电压：

$$u_{an}=u_{an1}+u_{an0}=u+u\angle 180=0;$$

$$u_{bn}=u_{bn1}+u_{bn0}=u\angle -120+u\angle 180=\sqrt{3}u\angle -150;$$

$$u_{cn}=u_{cn1}+u_{cn0}=u\angle 120+u\angle 180=\sqrt{3}u\angle 150;$$

$$u_{ln}=u_{ln1}+u_{ln0}=0+u\angle 180=u\angle 180;$$

综合上述，在小电流接地系统中，发生单相接地时，三相四 PT 接线方式能正确反应一次电压，通过零序 PT，能正确反应中心点电压偏移，且每个电压互感器电压基本限制为相额定电压，避免了 PT 因过压饱和而导致的铁磁谐振。

#### 3.2 高压熔丝熔断异常电压分析

小电流接地系统发生高压熔丝熔断时（以 A 相熔丝熔断为例），单相高压熔丝熔断可以分为正序、负序和零序分量向量和，其一次电压等效矢量叠加图如图 8 所示。

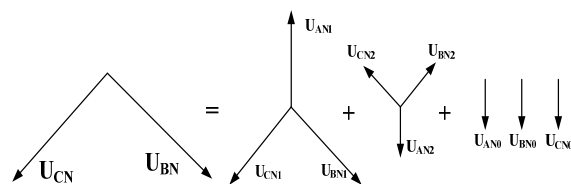


图 8 高压熔丝熔断时电压矢量等效分解图

一次电压向量叠加如下：

$$U_{AN}=U_{AN1}+U_{AN2}+U_{AN0}=2/3U\angle 0+1/3U\angle 180+1/3U\angle 180=0;$$

$$U_{BN}=U_{BN1}+U_{BN2}+U_{BN0}=2/3U\angle -120+1/3U\angle -30+1/3U\angle 180=U\angle -120;$$

$$U_{CN}=U_{CN1}+U_{CN2}+U_{CN0}=2/3U\angle 120+1/3U\angle 30+1/3U\angle 180=U\angle 120;$$

$$U_{LN}=U_{LN1}+U_{LN2}+U_{LN0}=0+0+1/3U\angle 180=1/3U\angle 180$$

;

由上分析可得二次电压:

$$u_{an}=u_{an1}+u_{an2}+u_{an0}=2/3u+1/3u\angle 180+1/3u\angle 180=0;$$

$$u_{bn}=u_{bn1}+u_{bn2}+u_{bn0}=2/3u\angle -120+1/3u\angle -30+1/3u\angle 180=0=0\angle -120;$$

$$u_{cn}=u_{cn1}+u_{cn2}+u_{cn0}=2/3u\angle 120+1/3u\angle 30+1/3u\angle 180=u\angle 120;$$

$$u_{ln}=u_{ln1}+u_{ln2}+u_{ln0}=0+0+1/3u\angle 180=1/3u\angle 180;$$

以上为理论分析结果,实际情况种可能高压熔丝是不完全熔断,这时熔断相电压不完全为零,正常相电压比相电压稍微高,零序PT可能比1/3相电压大一点。

综合上述,发生高压熔丝熔断时,三相四PT接线方式能正确反映一次电压,通过零序PT能正确发出告警信号。

#### 4 结束语

本文通过理论分析,可以得出结论:

(1) 三相四PT接线方式能清晰准确地反映系统中的各序分量。

(2) 通过不平衡电压分解等效为正序、负序和零序电压矢量之和的方法,化复杂为简单,这种分析方法值得我们借鉴。

(3) 在系统发生单相短路时,三相四PT接线方式能将各PT两端电压限制在相电压,能有效避免铁磁谐振。

(4) 在高压熔丝熔断时,三相四PT接线方式能反应其电压异常并发报警。

#### 参考文献:

- [1] 张雄伟,谢晖,马凯,等. 三相四PT接线方式原理分析及电气实验[A].第十三届保护和控制学术研讨会论文集[C]. 2011. 61-64.
- [2] 陈远鹏,周华勇. 10kV母线电压互感器的接线变迁及刍议[J].重庆电力技术监督,2008(4): 21-26.
- [3] 张亚平. 10kVPT消谐及相关二次接线问题的探讨[A].京津冀晋蒙鲁电机工程(电力)学会第十四届学术交流会论文[C]. 2004. 116-118.
- [4] 郭伯宇,金旭.10kV零序压变二次线圈极性反接对系统故障判断的影响[J]. 浙江电力,2008(3): 72-75.
- [5] 滕永禧,许明.10kVTV高压熔丝频繁熔断的分析[J].高压技术,2008,34(1):204-206.

#### 作者简介:

李家斌(1983-),男,湖北黄石人,助理工程师,主要从事变电运行维护工作, E-mail: liyabin\_2000@163.com;

徐军(1973-),男,江苏常州人,助理工程师,从事变电运维工作。