[故障处理]

# 浅谈电压异常的故障类型

文/彭潇楠
中韩（武汉）石油化工有限公司

*6 kV系统电压值显示异常，一般情况下即6 kV系统发生单相接地故障，或者PT发生一次、二次熔断器熔断。不同的故障情况下，6 kV系统电压显示情况亦不相同。结合某厂近年来发生的几次故障，分别阐述发生故障情况下，6 kV系统电压值显示的区别。*

## 6 kV系统电压测量原理简介

6 kV系统PT正常运行状态如图1所示，其一次侧绕组按星形接线，并配有三个高压熔断器，二次侧一般有两个绕组，一组接成星形接线，配有三个低压熔断器（或者三个单极断路器），主要供保护和测量使用；另一组接成开口三角形，配有一个低压熔断器（或者一个单极断路器），以供零序电压测量和保护使用。PT一次侧星形接线中性点必须接地，若中性点不接地，当系统发生单相接地故障时，中性点就会产生位移形成对地电压，但每一相对中性点的电压并没有改变，如此便会影响PT二次侧开口三角的零序电压测量，致使二次侧开口三角无法测出零序电压，从而不能实现对单相接地故障的监控、告警；若PT一次侧星形接线中性点接地，当系统发生单相接地故障时，每一相对中性点的电压即为相对地电压，PT二次开口三角处即可准确测出零序电压。PT二次侧中性点也必须接地，以防止PT一次侧故障，一次高电压窜至低压侧，伤及人员、设备。

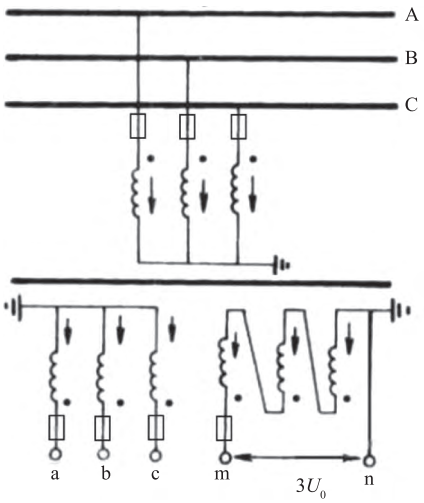



图1　PT原理接线图

## 6 kV系统一次侧单相接地故障时电压显示分析

1. 案例简介

2021年6月15日，我厂某开闭所（由一站6 kV直配的下级6 kV开闭所）的一个配出回路发生A相单相接地故障。故障发生后，出现了电压显示不同的现象：①监控系统一站6 kV II段电压显示A相电压为0，另外两相电压升为 6kV；一站6 kV II段现场配出回路电压显示三相均有电压但不平衡。②一站102柜进线柜综保零序电压显示177 V，104柜PT综保零序电压显示95 V。

2. 配出回路电压三相有不平衡电压分析

根据PT测量原理，当系统发生单相接地故障时，电压正常显示即如图2a所示，接地相A相电压显示为0 kV，另外两相电压升高为线电压6 kV，三相线电压均为6 kV且平衡。

（a）监控系统　　（b）现场表计

**图2　监控系统及现场表计电压显示**

一站6 kV II段现场配出回路电压显示A相电压3.2 kV，B相电压4.8 kV，C相电压2.9 kV，如图2b所示，这是一种中性点发生偏移的现象。在系统发生单相接地故障时，本应显示接地相A相电压为0 kV，另外两相电压升高为线电压，即如图2a所示。但出现上述三相均有电压但不平衡现象时，其主要原因是该表计未接入中性线$n$线，即该表计A相电压测量的是A相对表计内部中性点的电压$U_{a'n'}$，而非A相对地的电压$U_{an}$，如图3所示。

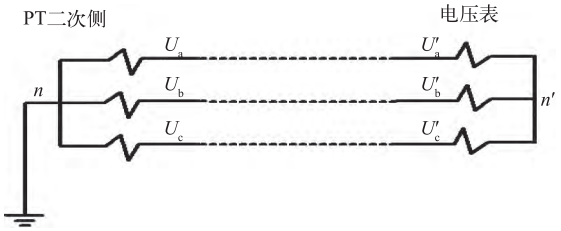



**图3　现场表计电压接线原理**

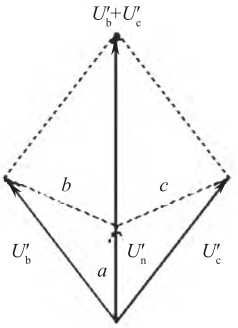
PT二次侧星形绕组作为该表计的电源，其三相线电压是平衡的。该表计作为星形接线负载，接在一个三相线电压平衡的电源上，因此该表计反映到每相的相电压是平衡的。假设$U'_a$、$U'_b$、$U'_c$、$U'_n$分别为该点对地电压，电压表三相内阻抗分别为$Z_1$、$Z_2$、$Z_3$，根据基尔霍夫电流原则，流入节点$n'$的电流为零，即

$$\frac{U'_a-U'_n}{Z_1}+\frac{U'_b-U'_n}{Z_2}+\frac{U'_c-U'_n}{Z_3}=0 \tag{1}$$

当$Z_1=Z_2=Z_3$时

$$U'_n=-\frac{1}{3}\left(U'_b+U'_c\right) \tag{2}$$

此时$U'_a$为0，$U'_b$和$U'_c$数值上均为1.5倍正常相电压，且$U'_b$与$U'_c$的夹角为60°，因此（$U'_b$+$U'_c$）数值上为3倍正常相电压。根据一次侧单相接地时，二次侧电压向量关系可知，$U'_n$数值上与正常相电压相等，$U'_n$方向与正常时的A相电压方向相反，如图4所示。




$a$、$b$、$c$为PT二次侧正常相对地电压，$U'_b$、$U'_c$为一次侧接地后$b$、$c$两相对地电压，$U'_n$为接地后电压表中性点对地电压

**图4　PT与表计二次电压相角关系**

$U_{a'n'}=U'_a-U'_n$，即$U_{a'n'}$方向与正常时的A相电压方向相同。同理可得，$U_{b'n'}$方向与正常时的B相电压方向相同，$U_{c'n'}$方向与正常时的C相电压方向相同。

据上述分析可知，一次侧发生单相接地时电压表因未接中性线$n$线，电压表三相电压应是三相平衡且均与正常相电压相同。但因为PT二次侧所带的表计阻抗不可能完全相同，即$Z_1\neq Z_2\neq Z_3$，故受电压表内阻不平衡及PT二次侧三相线电压的略微不平衡影响，因此出现中性点发生偏移的现象。电压表计不接PT二次侧中性点$n$线虽然不影响正常运行时电压显示，在发生故障时却易造成运行人员的误判。因此，正常情况下电压表计应接入PT二次侧中性点$n$线。

3. 零序电压显示不一致分析

根据PT测量原理，当系统发生单相接地故障时，102柜进线综保（如图5a）的零序电压是自产，即通过PT二次侧星形接线的三相相电压合成，而104柜PT综保的（如图5b）的零序电压是取自PT二次侧开口三角的直接测量值。

（a）进线柜综保　　（b）PT柜综保

**图5　进线柜综保与PT柜综保电压显示**

根据PT的电压比参数，即$\frac{6}{\sqrt{3}}$（一次侧）：$\frac{0.1}{\sqrt{3}}$

（二次量形侧）：$\frac{0.1}{3}$（二次开口三角形侧），当系统A相单相发生接地故障时，PT二次侧星形接线三相电压为$U_a$=0 V，$U_b$=102 V，$U_c$=103 V，其中$U_b$、$U_c$两相电压夹角为60°，因此合成自产零序电压3$U_0$值约为177 V，如图6所示。

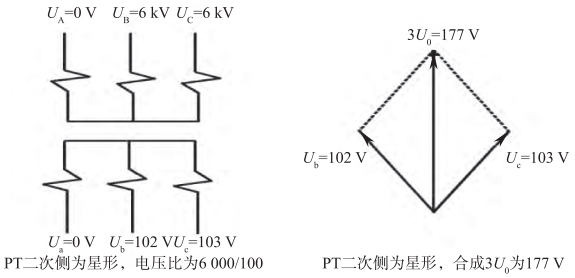



图6　进线柜综保星形电压接线与相角关系

当系统A相单相发生接地故障时，PT二次侧开口三角接线三相电压约为$U_a$=0 V，$U_b$=55 V，$U_c$=55 V，其中$U_b$、$U_c$两相电压夹角为60°，因此合成自产零序电压3$U_0$约为95 V，如图7所示。

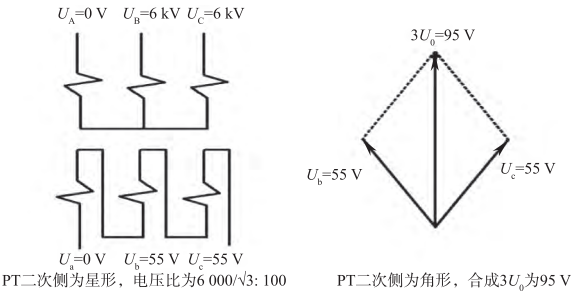



图7　PT柜综保角形电压接线与相角关系

由此可知，图5中两处零序电压显示不一致，其原因是PT的零序电压折算到二次侧时，因电压比不同而产生差异。

4. 其他分析

当系统发生单相接地故障时，电容器不平衡电压保护不跳闸。其原因是电容器不平衡电压取自电容器本体PT二次侧开口三角，因电容器本体中性点并不接地，如图8所示。根据式（1）、式（2）计算可知，单相接地故障时，电容器三相对其本体中性点电压仍为平衡的相电压，故容器本体PT二次侧开口三角仍为平衡状态，未产生不平衡电压，因此不跳闸。

当系统发生单相接地故障时，电容器低电压保护并跳闸，其原因是电容器低电压保护取自系统PT的线电压，因单相接地故障时线电压仍平衡，因此不跳闸。

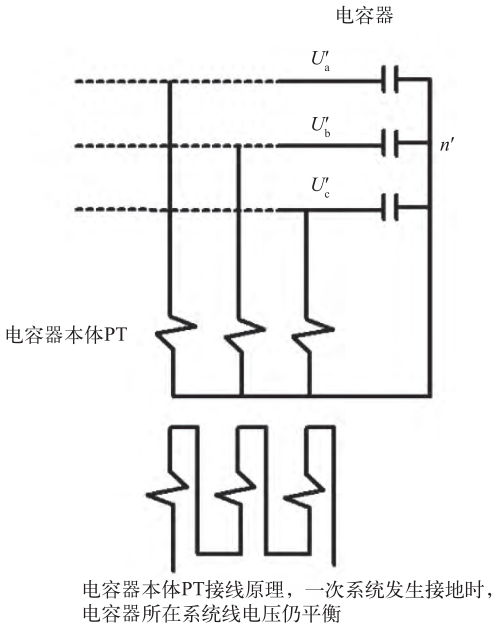



图8　电容器本体PT接线原理

当系统发生单相接地故障时，所有运行设备三相电流仍平衡，因变压器为角形接线单相接地故障时线电压仍平衡，故线电流也平衡。

## PT一次侧熔断器熔断时电压显示分析

1. 案例简介

2021年6月1日，我厂某开闭所II段PT发生一次熔断器熔断故障。故障发生后，集控系统上该开闭所显示电压值为$U_a$=3.6 kV，$U_b$=3.6 kV，$U_c$=2.7 kV。

2. 原因分析

参考图1，当一次侧C相熔断器熔断后，一次侧C相电压即为0 kV，正常情况下，二次侧C相电压相应的也为0 V。当$U_c$出现电压不为0时，说明在二次侧C相回路上接有AC或BC线电压的负载，如图9所示。$U_c$=2.7 kV并不是一个确定值，它与显示$U_c$的电压值的表计与C相回路上接有AC或BC线电压的负载分压后的结果。

## PT二次侧接地时电压显示分析

1. 案例简介

2021年3月13日，我厂一站6 kV II段PT发生PT二次侧B相接地故障。故障发生后，出现现象为监控后台I段、II段三相电压均为$U_a$=3.6 kV，$U_b$=3.6 kV，$U_c$=3.7 kV，一站6kV I段、II段所有现场配出回路电压显示$U_a$=3.0 kV，$U_b$=3.3 kV，$U_c$=4.8 kV（如图

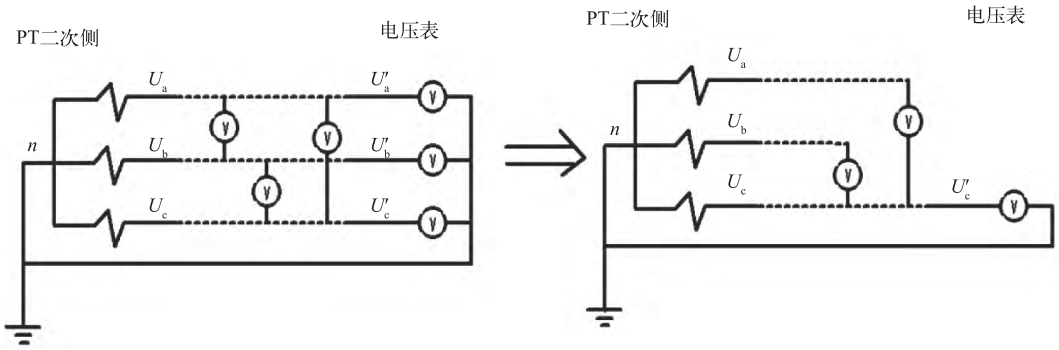
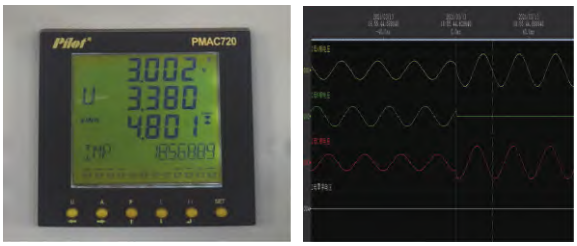



图9　PT一次侧C相断线时二次侧C相电压显示电压原理

10a），接地选线装置（如图10b）I段、II段三相电压均为$U_a$=105 V，$U_b$=0 V，$U_c$=106 V。




（a）现场电压表计　　（b）接地选线装置显示

图10　现场电压表计显示与接地选线装置显示

2. 原因分析

由于当时一站PT二次侧星形接线中性点并未接地，即PT二次侧星形接线类似于中性点不接地系统，如图11所示。当PT二次侧发生B相单相接地故障时，就会出现B相对地电压为零，另外两相对地电压升高为线电压，但三相对中性点的电压仍为正常相电压且平衡，可根据式（1）、式（2）推算。该现象与6 kV不接地系统发生一次侧单相接地故障的情况类似。

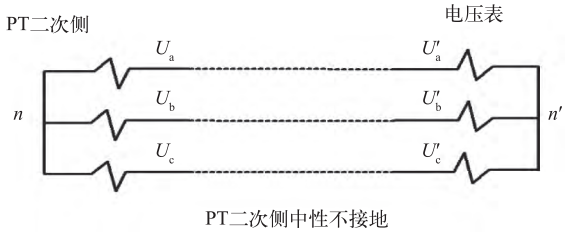



图11　PT二次侧中性点不接地接线原理

一站因I段、II段PT二次侧共用同一组$n$线，当II段PT二次侧B相发生接地故障时，导致I段、II段PT二次侧共用的$n$线对地电压均升高为B相相电压，I段、II段PT二次侧的B相对地电压均为零。参照中性点不接地系统发生单相接地故障分析，此时一站I段、II段PT二次侧三相对中性点电压仍为正常相电压且平衡（可根据式（1）、式（2）推算），图10a所示电压值即为该表计每相对中性点电压，虽有中性点偏移现象，但总体上基本平衡。

图10b所示为接地选线I段、II段装置电压显示值，由于一站I段、II段PT二次侧共用同一组$n$线，故接地选线I段、II段装置三相电压显示值相同。但接地选线装置的$n$线取自本柜接地线，与PT二次侧$n$线无电气连接，因此接地选线I段、II段装置电压显示值为每相对地电压值。参照中性点不接地系统发生单相接地故障分析，接地选线I段、II段装置三相电压应为$U_a$=105 V，$U_b$=0 V，$U_c$=106 V。

本次PT二次侧B相单相接地故障处理完毕后，一站PT二次侧星形接线已整改为中性点接地。

## PT二次侧熔断器熔断时电压显示分析

当PT二次侧一相熔断器熔断（或者断路器单相跳闸），正常情况下，若PT二次回路中没有接线电压类负载，其三相电压显示值为一相电压为零，另外两相电压仍为相电压。若PT二次回路中接有线电压类负载，其三相电压显示值为一相电压不为零但低于相电压，另外两相电压仍为相电压。

PT二次侧一相熔断器熔断（或者断路器单相跳闸）时，在PT二次侧熔断器（或断路器）两端处测量电压，将会出现一端电压为正常相电压，另一端电压为零或小于相电压。基于这种现象，可以准确判断出故障为PT二次侧一相熔断器熔断（或者断路器单相跳闸）。若在PT二次侧熔断器（或断路器）两端处测量电压值一致且均小于正常相电压，则可以判断出故障为PT一次侧发生熔断器熔断。

## 结束语

当6 kV系统电压显示异常时，基本上可分为一次接地或熔断器熔断、二次接地或熔断器熔断（或断路器跳闸）四种情况。其中二次接地时，由于PT二次侧中性点必须接地，因此会由接地发展成熔断器熔断（或断路器跳闸）。

当6 kV系统电压显示异常时，其故障现象及判断方法，可参考以下几点。

1）6 kV一次系统发生一次侧单相接地故障。现象及判断方法：接地相电压为0，另外两相升为线电压，三相线电压仍正常，PT开口三角出现零序电压，该6 kV系统上所有配出变配电室6 kV母线电压均有接地相电压为0，另外两相升为线电压现象。

2）6 kV PT一次侧一相熔断器熔断。现象及判断方法：熔断相相电压降低，另外两相相电压为正常相电压，三相线电压一个正常两个降低，PT开口三角出现零序电压，该6 kV系统上所有配出变配电室6 kV母线电压均为正常相电压。

3）6 kV PT二次一相熔断器熔断（或单极断路器跳闸）。现象及判断方法：熔断相相电压降低，另外两相相电压为正常相电压，三相线电压一个正常两个降低，PT开口三角不出现零序电压，该6 kV系统上所有配出变配电室6 kV母线电压均为正常相电压。

4）6 kV PT二次侧接地。现象及判断方法：①PT二次侧中性点直接接地时，当发生PT二次侧接地故障，则会迅速发展为PT二次熔断器熔断；②PT二次侧中性点不接接地时（此情况需整改为二次中性点接地），接地相电压为0，另外两相升为线电压，三相线电压仍正常，PT开口三角出不现零序电压（见图10b，其原因是接地选线装置接线方式造成，当时PT柜开口三角并未出现零序电压），该6 kV系统上所有配出变配电室6 kV母线电压均为正常相电压。

根据故障现象的判断，可以快速甄别出发生哪类故障，并迅速开展针对性处理。其他类型故障，比如一次或二次侧发生两相熔断器熔断，其判别可按一相故障类型推断，本文不再赘述。**EA**

（收稿日期：2025-03-25）