

# 中性点非有效接地系统电压互感器损坏原因分析

孙可赞 贾亮

国网河北省电力有限公司新乐市供电分公司

**摘要:**近年来,我国中性点非有效接地系统中电压互感器(简称PT)频繁发生故障,对电网安全造成了极大的危害。PT故障的根本原因是由于PT过励磁而造成的热损伤,由于间歇弧地过电压以及铁磁谐振过电压导致。抑制PT过励磁的重点在于抑制PT自身所承受的电弧过压及铁磁谐振过电压。基于此,本文对中性点非有效接地系统电压互感器损坏原因进行了分析,并阐述了其对策。

**关键词:**电压互感器;过励磁;铁磁谐振

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.09.070

## 引言

PT设备烧毁、PT高压熔断器等故障在电网中频繁出现,不仅对工人生命造成了极大的危害,还会造成母线短路、主变掉闸等重大事故。通过对PT故障产生的根本原因进行分析,认为PT过励磁是造成PT故障的根本原因。PT的过励磁是由单相电弧和铁磁谐振引起的。在单相接地断弧或再点火时,线路间的电容电荷会发生再分布,在该过程中会产生电磁振荡和3.5倍以上的过电压,会引起PT过励磁。在PT系统中,由于频繁的间断的孤光接地,会导致PT的过励磁发热,从而导致固态绝缘的破坏。而35 kV中性点不接地系统,若发生铁磁

谐振,将使PT长期处于过励磁状态,从而引发PT严重故障。

## 一、谐振过电压的概念

电磁式电压互感器铁芯饱和导致铁磁谐振过电压的产生,其实是电磁式电压互感器中的非线性电感和对地电容形成的铁磁谐振。实验研究发现,在系统发生谐振时,中性点会产生较大的位移,在此过程中,系统的相位电压会发生变化,但线路电压基本不变。由此,我们可以判断其为零序分量。

在小电流接地的情况下,具体的配电网的接线方式见图1。

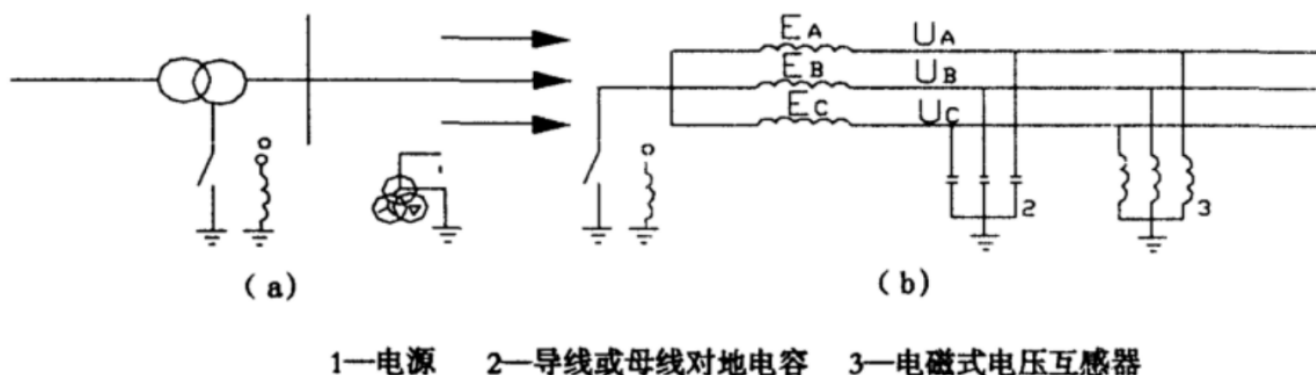


图 1

由于系统线的阻抗远小于电压互感器,所以可以忽略不计。但是,线路之间的电容和负荷对这一现象的影响很小,可以忽略不计。从该图中可以看出,对于各相,各相均存在由各接地电容 $C$ 及各相励磁电感所组成的并联支路,根据并联支路的伏安特性,可决定其性能。

在正常情况下,由于互感器铁芯未饱和,因此并联支路为容性。当 $L_1=L_2=L_3=L_0$ 时,并联的每一相的导纳 $Y_A, Y_B, Y_C$ 是相等的。

### 1. 工频位移过电压

在中性点位移的情况下,会产生“虚幻接地”的情

况。实践证明,在仅配有电压互感器的空载母线上,以及在系统发生单相间接地时,极易发生工频位移过电压。需要注意的是,尽管频率偏移过电压在某些特性上与单相接地类似,但是两者又有着显著的不同:在单相接地情况下,接地相为零,健全相电压则上升到线路电压,而不会超出线路电压;如果是不完整的金属性接地,虽然接地相上的电压不等于零,但仍然在线电压三角形内,而不是接地相的电压比线路电压低。电磁电压互感器产生的频率偏移过电压幅度一般在 $3U_{xg}$ 以下,少数可达到 $3.6U_{xg}$ 。基波谐振情况下,变压器额定励磁电流为4.0-17.5倍,这是变压器额定励磁电流的一个重要

指标。

### 2. 1/2分次谐波谐振

1/2分次谐振现象的一个重要特征是：三相电压同步上升，并且在低频范围内出现往复振荡。由于互感器铁芯在谐振状态下会出现严重的饱和现象，从而抑制过电压的增加。然而，也正因为如此，变压器的谐振频率仅为工频的二分之一，使得变压器的激磁感抗大幅降低，在其高压线圈中流动的过电流往往是变压器额定激磁电流的数十倍甚至数百倍，这将会对互感器的高压保险熔丝熔断，PT喷射，甚至烧毁变压器，引起停电。

### 3. 高次谐波谐振

电磁电压互感器产生的谐波过电压，除基波及1/2次谐波外，还有高次谐波。三次频谐振是最常见的。三次谐波谐振主要发生在接有互感器的母线上，当电网与变压器相接时。在变电所出线极短的情况下，还会发生三次谐波谐振。

三次谐波谐振仅发生在对地电容较小的情况下，也就是环路中的电流作为一种辅助磁场。换句话说，它只是一个必要条件，必须要有合适的电容与电感才能发生。

所以，当外部“激发”作用于互感器铁芯时，会引起互感器铁芯的饱和，并引起中点偏移，产生电网谐振过电压。激励的前提是：①在无负荷或有电磁电压互感器的情况下，在空载或空载情况下进行瞬间合闸。此时，虽然三相开关处于合闸状态，但三相电压差1200V，不能在同一时刻合闸，其中一相电压可能发生为零，电流最大时则可能发生合闸，造成电压互感器绕组内出现不对称涌流，造成铁芯饱和。

传递的过压也能引起变压器铁芯的饱和。比如，当变压器高压侧出现瞬时单相接地或断路器不同时动作时，零序电压同样会传导至与之相连的这一端。在这种转移过压的影响下，变压器铁芯的电感饱和。

### 4. 过电压特点

(1) 在对地绝缘时，由于电源中性点的位移电压，使得接地上产生了过电压。(2) 中性点位移相电压为零序电压，使电网产生“虚幻”的接地。(3) 电源中性点移动电压可为基本频率、低频率或高频率。

## 二、互感器铁磁谐振过电压的影响因素

### 1. 电压互感器

不同型号、不同生产厂家生产的电压互感器，谐振要通过实验来确定。在实际应用中，有三台单相互感器和三相五柱电压互感器，其谐振激励方式各不相同。实验结果显示，与三相五柱互感器相比，单相互感器的起振电压要小一些。即单相互感器极易发生谐振。其原因在于二者的磁路结构不同，导致了零序阻抗的差异。

互感器的零序磁通磁路与正序磁通磁路相同，各相均有其自身的闭合回路，故其零序阻抗与正序阻抗相等。而三相五柱变压器，零序磁通通过两侧回流，使其磁路长度大，且铁芯截面较小，从而产生零序磁通磁阻远远大于单相互感器。从上述分析可知，谐振源于零序磁通，三相五柱互感器零序磁通遭遇较大电阻，不易发生谐振。

### 2. 电网零序电容

随着电网零序电容的变化，XC0/XL也会发生变化，在回路中也会发生从一个谐振态向其他谐振态的过渡。若零序电容太大或太小，则有可能使系统从谐振区中脱出，从而使系统无法产生谐振。在实际应用中，通过对地电容电流的测定，可以求出对地电容值，再通过XC0/XL估计出电网是否进入了谐振区。如果在谐振区，则可做进一步的判断。

根据以下公式，可求出电力系统的电容电流： $I_c = (2.7-3.3) U_e L 10^{-3} 110\%$

其中： $U_e$ 是电力网的额定线路电压； $L$ 由输电线的长度公里来表示；2.7为无防雷线路的系数；3.3为带防雷线路的系数。

此外，零序电容也会对系统的谐振过电压、过电流及谐振频率产生一定的影响。

### 3. 其他影响

(1) 激发度。实际激励实验结果显示，虽然阻抗参数值XC0/XL落入谐振区，但并非每一次都能产生稳态谐振。这是由于激励因子除了XC0/XL外，还与激励因子如电压脉动、涌流幅值、开关相角等密切相关。在不同的激励条件下，变压器的饱和度也会发生变化，从而产生不同的谐振特性。

(2) 回路的减振效果。在发生非稳态过电压激励时，其所需要的能量始终由电源提供，不管是基波、三次或一/二次谐波。当输入与输出能量达到均衡时，谐振就会持续；当能量平衡被打破时，谐振就会消失。

由谐振理论可知，增加环路阻抗可以减小谐振区，增加维持谐振所需要的电压，可以抑制振荡。

(3) 电网频率的改变。当电网的频率改变时，谐振电路中的阻抗参量也会随之改变。是引起谐振不稳的一个主要因素。

## 三、防止和消除谐振的方法

根据上述分析，在电力系统中，可以采取一些预防或抑制谐振的方法，一是参数的变化，打破谐振发生的条件，在环路中加入了阻尼电阻器，增加了环路的减振效果。二是强化管理。

### 1. 正确选择互感器

选择具有良好伏安性能的互感器，其工作点位于其

伏安特征的直线段，在存在激励因子的情况下，铁芯不会饱和，从而难以产生谐振。在一定程度上，这是从根本上解决问题的办法

(1) 降低了互感器的并联数量；一方面是为了增加电压，另一方面是为了防止在电网中发生谐振，变压器受损的数量也可以减少。

(2) 降低互感器高压端（原边）零点接地个数；在中性点绝缘电网中，安装在用户变电站内的全部绝缘互感器，由于不需要监测系统的绝缘，可以把它的中间点变为不接地，以增加  $X$  值。

(3) 对操作方式进行合理的组织。对容易发生基波谐振的变电站，在合闸之前，可以将母线上的一条空载线投入，再对母线进行充电，从而改变系统参数，避开谐振区。

(4) 安装消弧线圈；在小电流系统中，中性点经消弧线圈接地可实现瞬时接地电弧的自动消弧，可有效避免单相接地过电压的发生。此外，该消弧圈还可以彻底消除由于互感器参数的改变而造成的电网铁磁谐振。

## 2. 提高电压互感器的伏安特性

由于电压互感器的非线性电感所导致的铁磁谐振，通常需要外部激励，使得电感瞬间进入饱和区，并在某些参量的匹配下产生。很明显，若其伏安特性很好，就有可能在普通的过压下不能深入到更深层的饱和区，使之不能与之相匹配，也就无法产生谐振。该方法已在多个企业和一些区域的生产实践中得到了验证。某水电部在预防PT铁磁谐振问题中，对PT的伏安特性提出了不低于1.5倍额定电压的要求。然而，现在很多生产出来的产品，其伏安性能较差，在额定电压下就会发生饱和，从而导致生产过程中经常发生意外，因此，需要相关部门在与厂家签订采购合同时，对此要有明确的规定。

## 3. 在同一网络中降低并联PT个数

因为同一网络中并联的PT数目愈多，其整体等效伏安特性愈趋平坦，愈趋饱和，与之对应的工频励磁电感抗  $X$  值愈低，故为防止谐振所必需之  $C$ 。随着并联数量的增大，当一台PT接入时，可能完全消除谐振，但当两个及以上时，可能会出现谐振，所以，除了在供电侧作为绝缘监测需要，PT高压侧中性点接地之外，其余PT，尤其是用电设备，都要尽量不接地。

## 4. 增加回路阻尼

(1) 将阻尼电阻器连接到变压器的开放三角形的末端。通过在互感器开口三角形线圈中加电阻  $R$ ，实现了对谐振的抑制。当发生谐振时，零序电流  $I$  会流经变压器的高电压线圈，而零序电压则会在三角形线圈上感应出来。在接地电阻  $R$  的情况下，必然会有零序电流  $I$  流过，这会使高电压线圈发生退磁，使谐振得到抑制。

随着  $R$  的减小和  $I$  的增大，退磁效果变得更加明显。

(2) 消谐设备的应用。在出现谐振的情况下，采用消谐设备进行试采，例如在景泰6-35kV电网：在互感器次级开口三角串接KFX型次级消谐设备，可有效地避免PT磁通量饱和产生的谐振，并有效地抑制单相接地后产生的激磁涌流；将LXQ-35等一次消谐器串联于35kV互感器原边接地中性点处，可有效抑制PT铁磁谐振，抑制初级线圈涌流，避免PT一次保险熔断，PT烧毁等。目前，景泰电网6-35kV小电流接地系统已全部装设完毕，并在35kV线路上装设了一次消谐设备，有效地解决了小电流接地系统的谐振问题。

## 四、结论

分析表明，以往35kV中性点不接地系统PT烧断，都是由单相间歇性接地引起的。当接地时，正常相的电压会升高到线路电压，而当接地消失后，故障相的电压也会急剧升高，从而使电压互感器绕组产生较大的励磁涌流，从而造成铁芯的严重饱和。小电流接地系统中，单相间歇性接地故障的发生率较高，而在实际中，大部分单相接地初期都伴随着间歇性接地。在发生谐振的情况下，由于电网中点的偏移，导致了电网的对面产生了过电压。例如，八泵变35kV电网、景泰变电站35kV电网因引起系统单相接地故障而不再出现系统谐振过电压现象。为此，提出了在小电流接地系统间歇性接地情况下，尽早将其与电网绝缘，并及时排除接地可能产生的隐患，从而保证电网的安全运行，降低设备的损失。在此还要指出的是，在出现单相接地的情况下，不允许PT及所用变刀闸的动作，以避免电弧短路引起母线断电。在上述分析的基础上，操作人员要对电网运行过程中发生的各种现象进行较为精确的分析和判断，掌握电网中为消除谐振而需要采取的运营管理措施和技术措施。

## 参考文献

- [1] 胡军, 李晓松, 杨毅, 鲍锡阳, 李俊呈. 220 kV 变压器中性点小电抗接地过电压分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 152-158.
- [2] 仲赞. 电流互感器的原理与事故预防[J]. 湖州师范学院学报, 2011, 33(S1): 256-258.
- [3] 易成星, 杨伟, 朱文艳. 电压互感器铁磁谐振过电压的研究[J]. 电工电气, 2013(9): 20-23.
- [4] 杨晟, 张剑彪, 杨凯. 中性点非直接接地系统的“虚幻接地”现象探讨[J]. 山西电力, 2013(6): 18-21.
- [5] 梁志瑞, 姜欣, 牛胜锁, 梁策, 吴群雄. 10kV 配电网多组母线TV并联运行时的消谐器安装方案研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(9): 110-114.