

关于 4PT 电压互感器防谐振与开口三角接线说明

前言：电压互感器作为开关柜主要设备之一，进行电力计量、测量及继电保护作用。但是由于电力系统的不稳定性、特别是频繁发生谐振地区，对电压互感器的危害是很大的，大部份都导致电压互感器烧毁。

一、产生铁磁谐振的原因

由非线性电感（铁心线圈）和线性电容组成的回路，当外施电压发生变化时，由于电感的变化而产生谐振，这种现象称为铁磁谐振。

1、在中性点不接地系统中，虽然电源侧的中性点不直接接地，但电压互感器的高压侧中性点是接地的，若 C_a , C_b , C_c 为各回线路(包括电缆出线和架空线路)三相对地的等值电容，而 L_a , L_b , L_c 则为母线电压互感器的一次侧三个线圈的对地阻抗(忽略其线圈电阻)，假设系统发生单相接地。此时，电压互感器的铁心线圈相当于与电容器并联，构成了可能产生谐振的并联电路，由于相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，有可能使得电压互感器的铁心出现饱和或接近饱和，阻抗变小，电路中出现容抗和阻抗相等的情况，从而产生了并联谐振，此时互感器一次侧的电流最大，这样有可能使电压互感器的高压侧熔断件熔断，或者烧坏电压互感器。

此种情况往往在变电所投产初期(线路出线回路少)不是很明显，但随着线路出线回路的增多(各回线路对地的等值电容量增大，容抗增大)出现谐振的情况较多。

2、操作过电压：包括互感器在内的空载母线或送电线路的突然合闸，使得 PT 的某一相或二相绕组内产生巨大的涌流和磁饱和现象；

①由于合闸瞬间的三相触头不同期性，此时最慢接触的一相在触头间相当于串联上一个电容(如 A 相)。当电容的容抗等于互感器的感抗时即产生谐振，但该状态下只是使中央信号装置的电铃响了一下，仪表摆动一下，但随着操作的完成该现象随之消失。

②由于合闸过程中产生操作过电压，此时假设断路器在合闸操作过程中 A 相出现过电压，则有可能使 A 相电压互感器铁心出现饱和，使 A 相电压互感器线圈感抗变小，从而三相的总阻抗出现不平衡，使电压互感器的中性点对地电压发生位移现象。

3、雷击过电压：由于雷击或其它原因，线路中发生瞬间弧光接地，使得其它两相电压瞬间升到线电压，而故障相电压在接地消失后又瞬间恢复至相电压，以至造成暂态励磁电流的急剧增大和铁芯的磁饱和；

4、磁饱和的产生也可能由于另一绕组瞬间传递过来的过电压或者系统运行方式的突然改变、负荷剧烈波动等所引起的系统电压的强烈扰动。

二、铁磁谐振的种类

铁磁谐振是一个非常复杂的非线性振荡过程，PT 伏安特性饱和得越快，谐振的区域越广。谐振大致分为分频谐振、基波谐振、高频谐振，基波和高次谐波的谐振过电压的幅值很少超过 $3U_j$ ，故除非存在弱绝缘设备，是不会产生危险的。对于分频谐波，由于频率只有工频的一半，励磁感抗相应降低一半，使得励磁电流急剧增加，有时甚至达到额定值的 100 倍以上，使得互感器发生严重的磁饱和现象，因而限制了过电压幅值，通常在 $2U_j$ 以下，中性点位移电压一般不超过 U_j ，但大电流持续时间过长，势必引起 TV 高压熔丝熔断，或者造成 TV 本身冒油和烧毁。

三、消除铁磁谐振的措施和方法

电力系统过电压现象十分普遍，如果没有防范措施，随时都有可能造成电气设备损坏和大面积的停电事故。目前，我国 35 kV 及以下配电网，仍大部分采用中性点不接地方式或采用老式的消弧线圈接地。从电网的运行实践证明，中性点不接地系统中由于电压互感器铁芯饱和引起的铁磁谐振过电压比较多，尽管采取了不少限制谐振过电压的措施，如：消谐灯、消谐器等等，但始终没有从根本上得到解决。由于谐振过电压作用时间长，所引起谐振现象的原因又很多，因此在选择保护措施方面造成了很大的困难。为了尽可能的防止谐振过电压的发

生，应着重从以下几个方面采取措施：

- (1) 采用质量好，技术性能优，铁心不易饱和的电压互感器。目前电压互感器采用的铁心都是由无取向硅钢片卷制而成，具有非线性特性。
- (2) 提高断路器的检修质量，确保合闸操作的同期性，减少操作过电压。
- (3) 必要时可采用改变操作顺序，以避免操作过程中产生谐振的条件。
- (4) 对在空载母线的充电中产生的谐振，可以采用投入空载线路的方法，以改变其谐振的条件。
- (5) 传统采用消谐的措施是在电压互感器的开口三角侧接上一个灯泡，该方法属于较为原始的方法，随着系统容量的增大和电缆线路的增加，实践运行表明该方法的消谐效果不是很明显。
- (6) 另一种方法是采用在电压互感器二次侧的开口三角上加装一种可控硅多功能消谐装置的方法，但该方法需要采用外加交流电源，有时由于装置的电子器件发生短路也会影响消谐效果。
- (7) 在电压互感器的一次侧中性点上串接 LXQ 型非线性电阻，以限制其产生谐振的方法。但是非线性电阻绝缘不好也会影响消谐效果。
- (8) 在电压互感器的一次侧中性点上串接一个相应绝缘水平的电压互感器，以限制产生谐振时避免电压互感器不损伤，保证工作人员查出故障并排除故障。此方法只要接线正确，一般不易烧毁互感器。

四、电磁式电压互感器的励磁特性

接地电压互感器的额定电压因数与系统中性点接地方式密切相关，三相系统的中性点有以下几种不同接地方式：

中性点绝缘系统 除经保护、测量用的高阻抗接地外，中性点不接地的系统。在这种系统发生单相接地故障时，接地短路电流也就是对地电容电流很小，系统线电压的对称不被破坏，可以维持较长时间的运行，以便运行人员寻找故障点并设法消除故障。

中性点经阻抗（例如消弧线圈或适当的阻抗）接地系统 随着线路的增长和电压的提高，中性点绝缘系统发生单相接地故障时，接地短路电流增加，接地电弧往往发生重燃，出现过电压。为此，在系统中性点和地之间接入一消弧线圈以补偿电容电流，减少流经故障点的电流。中性点经消弧线圈接地的系统又称谐振接地系统。

上述两种系统又称中性点非有效接地系统，或小接地电流系统。在我国，额定电压 66kV 及以下电力系统都是中性点非有效接地系统。

中性点直接接地系统 又称大接地电流系统。因为中性点直接接地，当发生单相接地故障时，短路电流很大。为了限制短路电流，往往只将部分变压器的中点接地，或经低阻抗接地。这种系统又称中性点有效接地系统。在我国，额定电压 220kV 及以上系统都是中性点有效接地系统。110kV 系统大多是中性点有效接地系统，只在少数雷击较频繁地区的 110kV 系统才采用中性点非有效接地系统

为了满足不同系统的使用要求，GB1207 规定了电压互感器的额定电压因数的要求。额定电压因数是一个与额定一次电压相乘的系数，用以确定互感器必须满足规定时间内的有关热性能要求并满足有关准确级要求的最高电压。额定电压因数的标准值列于下表：

额定电压因数	额定时间	一次绕组连接方式和系统接地方式
1.2	连续	任一电网的相间 任一电网中的变压器中性点与地之间
1.2	连续	中性点有效接地系统中的相与地之间
1.5	30s	
1.2	连续	带有自动切除对地故障装置的中性点非有效接地系统中的相与地之间
1.9	30s	
1.2	连续	无自动切除对地故障装置的中性点绝缘系统或无自动切除对地故障装置的中性点共振接地系统中的相与地间
1.9	8h	

注：按制造厂与用户协议，表中所列的额定时间允许缩短

(1) 按系统接地方式，电压互感器分为接地电压互感器和不接地电压互感器。注意，这里所指的“接地”是一次绕组接地。二次绕组无论哪种互感器都是要求接地的。不接地电压互感器的一次绕组对地是绝缘的。

为了检测接地故障，一般都采用接地电压互感器。接地电压互感器均设有剩余电压绕组，利用剩余电压绕组的输出电压，检测系统的接地与否或对地绝缘状况。

(2) 电压互感器有额定电压的规定，这个参数实际是针对接地电压互感器的，对不接地电压互感器，额定电压因数均取 1.2。

接地电压互感器的额定电压因数与系统接地方式有关。除了在额定电压因数 1.2 情况下，长期连续运行外，不同接地方式下的接地电压互感器对额定电压因数另有规定。

1) 额定电压因数是在可能的最高工作电压下，发生单相接地故障时，系统完好相对地电压对额定电压的比值。根据这一定义，额定电压因数取决单相接地情况下的系统完好相对地电压，显然，该电压取决于系统接地方式。额定电压因数为 $F_v = 1.1 \times \sqrt{3} K_e$ (K_e 为接地系数)

2) 对中性点有效接地系统： $K_e = 80\%$ ；中性点非有效接地系统： $K_e=100\%$ 。则相应的额定电压因数分别为： $1.1 \times 0.8 \times \sqrt{3} = 1.5$ 和 $1.1 \times \sqrt{3} = 1.9$ 。注意，在接地故障情况下，中性点有效接地系统应通过保护装置在 30s 内切除；而中性点非有效接地系统，则应通过检测装置，探测其位置，并在 8h 内予以切除。

五、4PT 消谐原理

1、原理图如下图所示。

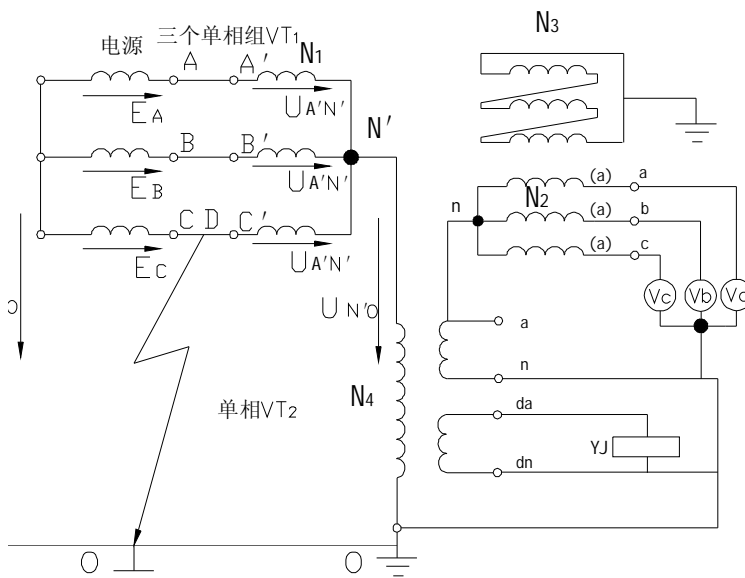


图1 三相中性点经单相电压互感器接地接线图
 N1-三相组VT的一次绕组 N2-三相组VT的二次绕组 N3-三相组VT的剩余电压绕组 N4-单相VT的一次绕组 Va、Vb、Vc-电压表 YJ-接地监视继电器

中性点绝缘系统中电磁式电压互感器的铁磁谐振发生的根本原因在于互感器铁心在某些激发条件下饱和而使其感抗变小而与线路对地电容的容抗相等所致。如果互感器一次绕组中性点不接地或经高阻抗接地，则各相绕组跨接在电源的相间电压上，不在与接地电容相并联，因而 PT 不会发生中性点位移，也就不产生谐振。因此采用了互感器中点经单相电压互感器接地的接线方式。

因单相电压互感器 VT2 工作时承受的是零序电压，因此也称零序电压互感器。由于该互感器励磁阻大，又具有普通电压互感器的绝缘水平，因此可以近似看作 N' 是对地绝缘，即为不接地点。

2、互感器中性点经单相电压互感器接地的运行原理

在正常运行时，三相电源对地电压对称，N' 与 N 点对地均为 0，即零序电压互感器不承受电压，其二次绕组没有输出电压，YJ 继电器不会动作。当系统出现单相接地时（例如 C 相在 D 点接地，即 D 点电位为 0），根据克希科夫电路定律可列出如下方程式：

对电源侧，在 NODCN 回路里：

$$-E_C + U_{CO} - U_{NO} = 0 \quad \text{因} \quad U_{CO} = U_{DO} = 0 \quad \text{由此得} \quad U_{NO} = -E_C \quad (1)$$

在 BDONB 及 ADONA 回路里：

$$U_{BO} - U_{NO} - E_B = 0, \quad U_{AO} - U_{NO} - E_A = 0 \quad \text{由此得} \quad U_{BO} = U_{NO} + E_B, \quad U_{AO} = U_{NO} + E_A \quad (2)$$

对于电压互感器侧，在 N-A-A' -N' -O-N 的回路里有：

$$U_{N'O} - U_{NO} - E_A + U_{A'N'} = 0 \quad \text{因} \quad E_C = U_{A'N'}$$

$$\text{所以} \quad U_{N'O} = U_{NO} = -E_C \quad (3)$$

在 N' -O-C' - N' 回路有：

$$U_{N'O} - U_{C'O} + U_{C'N'} = 0 \quad \text{因} \quad U_{C'O} = U_{DO} = 0$$

$$U_{C'O} = -U_{N'O} = (-E_C) = E_C \quad (4)$$

在 A' N' O A' 及 B' N' O B' 回路里有：

$$U_{A'O} - U_{N'O} - U_{A'N'} = 0$$

$$U_{B'O} - U_{N'O} + U_{B'N'} = 0$$

由此得 $U_{A'O} = U_{A'N'} + U_{N'O}$; $U_{B'O} = U_{B'N'} + U_{N'O}$

由式(1)、式(2)、式(3)可知：在电网出现单相接地时，零序电压互感器一次绕组上承受有电源的相电压，而三相组互感器的一次绕组仍然承受网络的对称电压，亦即与单相短路前并无变化。零序电压互感器在相电压下，其二次绕组则输出电压，启动继电器 YJ 而报警。其短接的开口三绕组 N3 无电流，而二次绕 N2 照常输出电压，但电压表（相电压）却在原相电压叠加了零序电压 $U_{N'O}$ ，短路相电压表为 0，其余两相为二次线电压（见图 2），

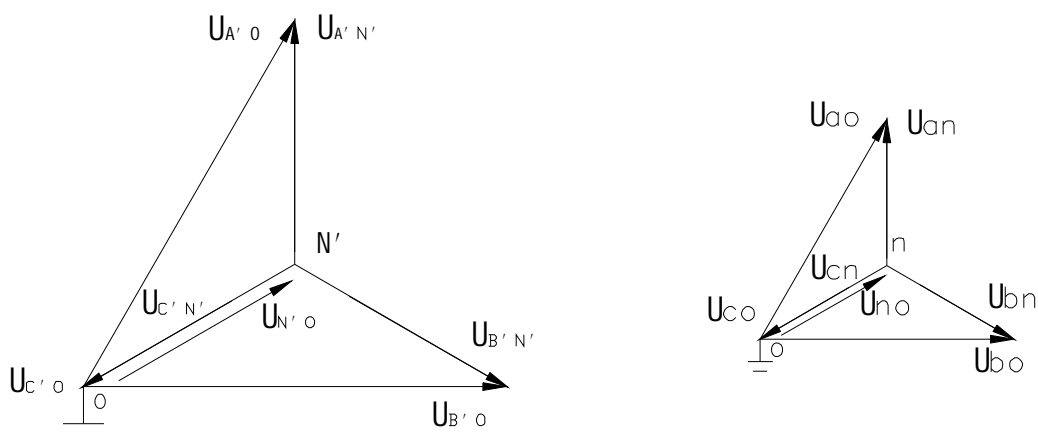


图2 单相短路三相组互感器一、二次电压相量图

这也正确反映了绝缘接地情况。由于单相接地后，三相电压所承受电压与短路前不变，当短路消失后，各绕组仍然是承受对称电压，因此，三相组电压互感器的电感不变化，不存在饱和现象，也就不会发生谐振。另外，即使存在其他激发条件，但由于中性点不发生位移，也不会发生谐振。

3、对于产生分频谐振的情况

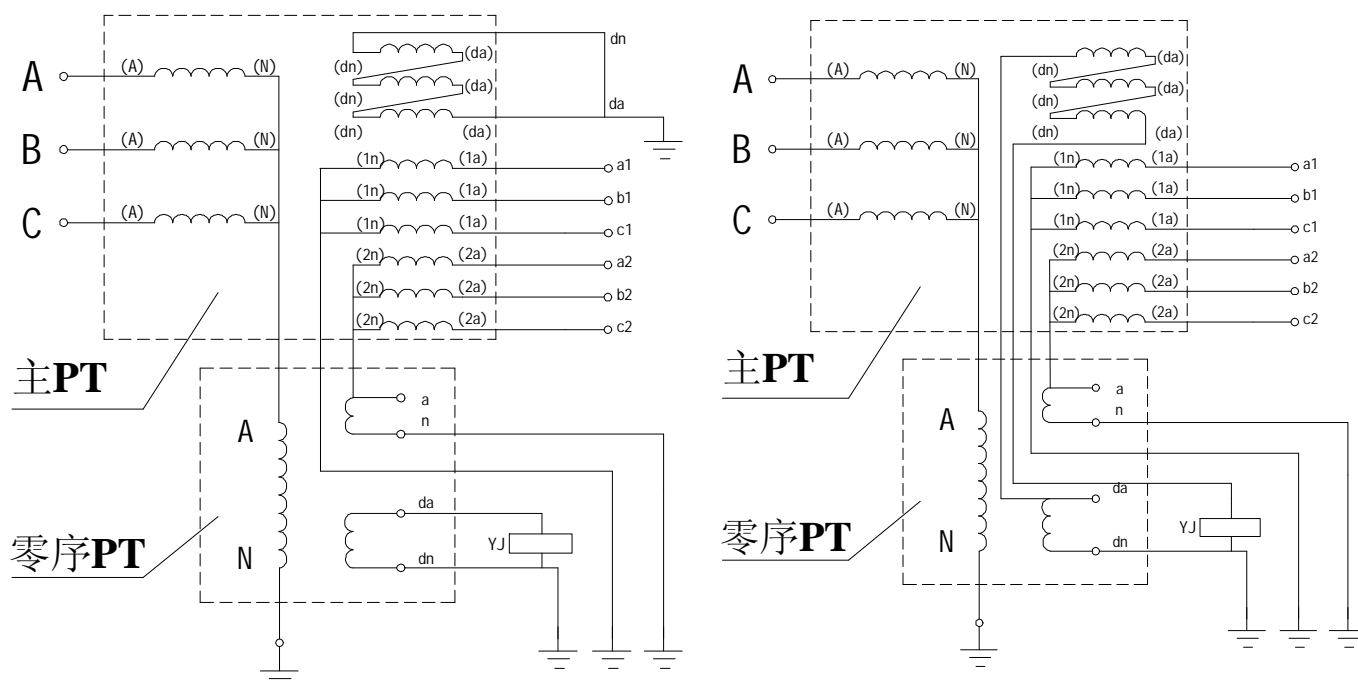
根据铁心磁密公式：
$$B = \frac{U_2}{4.44 f A_c N_2} \times 10^4, T$$

B— 磁场密度；U₂—实际二次电压； f—频率；A_c—铁心截面积；N₂—二次匝数
当发生 1/2 次分频谐振时，磁场密度 B 增大 1 倍，此时在额定电压下，互感器铁心也容易饱和，导致励磁电流大幅度增加，从而铁心发热导致互感器烧毁。

所以 4PT 方式当发生谐波谐振时并不能保证互感器不被烧毁。

4、4PT 不同接线方案的分析

4PT 接线方式有以下两种，如下图接线方式 1 与图接线方式 2



接线方式 1

接线方式 2

根据 4PT 消谐原理分析此两种接线方式作用都是一样的，差异部分如下面分析。

接线方式 1 由于三相电压互感器的开口角回路是短接的，因此三相电压互感器和零序电压互感器分别担负着正序电压和零序电压的测量功能。同时，这种接线方式也使零序回路中仅有单相电压互感器一种磁化电感，从根本上破坏了产生铁磁谐振的条件，也达到消谐效果。但是由于三相电压互感器零序阻抗被短路，削弱了对超低频振荡的抑制作用，若回路内电流过大而超出绕组热容量也可能导致产品烧坏。所以方式 1 这种 4PT 接线消谐措施还有必要进行优化。

针对 4PT 接线的上述优缺点，大一互有限公司提出了 4PT 接线消谐措施的优化方案并申请了专利权（专利号 2004200704.1）。优化方案包含两方面，一是开放三相电压互感器的零序回路并对零序电压的测量回路进行补偿；二是大幅度提高零序阻抗。优化方案的原理电路图如接线方式 2。

接线方式 2 可见，由于零序测量回路是三相电压互感器的开口角与零序电压互感器的一

个测量线圈按正极性串联，它包含了三相电压互感器的少部分零序电压，显然比方式 1 测量零序电压要精确，同时由于零序回路不是短接的，其零序电流不会过大而避免了零序回路绕组烧坏。为增强抑制超低频振荡，优化方案采取了增大零序电压互感器的阻抗和直流电阻分量的措施，也就是优化 4PT 方案中的零序电压互感器是特殊设计的互感器。

技术部
质量部
2008.06.18