

10-35kV 压变熔丝熔断的多种原因分析

黄海涛

(泰州姜堰县域检修分公司, 江苏 姜堰 225500)

摘 要: 变电所 10kV 中性点不接地系统电压互感器一次侧高压熔丝熔断有多种原因, 如铁磁谐振过电压可引起电压互感器一次熔丝熔断, 低频饱和电流可引起电压互感器一次熔丝熔断, 电压互感器一、二次绝缘降低或消谐器绝缘下降可引起电压互感器一次熔丝熔断, 电压互感器 X 端绝缘水平与消谐器不匹配易导致熔丝熔断, 要根据不同的情况分析处理, 在三相压变一次绕组的接地端串接性能良好的 LXQ (D) II-10 型消谐器通常能有效防止这一现象的发生。

关键词: 铁磁谐振; 过电压; 互感器; 消谐器; 绝缘; 接地; 熔丝

0 引言

泰州姜堰市供电公司 110kV 淤溪变电所 10kV 系统为中性点不接地系统, 2003 年 7 月 10 日发生 10kV 母线电压互感器一次侧三相熔丝熔断的故障, 事后检查, 压变中性点所接消谐电阻正常, 压变中性点绝缘正常, 三相压变的励磁特性在正常范围, 压变二次回路绝缘正常, 更换高压熔丝后, 压变又恢复正常运行。雷击时多相熔丝熔断的原因何在? 如何解决这类问题? 只有在查清雷击时, 通过高压熔丝的电流, 明白此电流导致高压熔丝熔断的机理, 才会有针对性的办法。

1 铁磁谐振过电压可引起电压互感器一次熔丝熔断

1.1 铁磁谐振产生的原理

在中性点不接地系统中, 正常运行时, 由于三相对称, 电压互感器的励磁阻抗很大, 大于系统对地电容, 即 $X_L > X_C$, 两者并联后为一等值电容, 系统网络的对地阻抗呈现容性, 电网中性点的位移基本接近于零。但当系统产生扰动, 如: ①单相接地, 使健全相的电压突然升高, 电压升至线电压; ②单相弧光接地, 由于雷击或其它原因, 线路瞬时接地, 使健全相电压突然上升, 产生很大的涌流; ③当电压互感器突然合闸, 使其一相或两相绕组内出现巨大的涌流; ④电压互感器的高压熔丝不对称故障等。总之, 系统的某些干扰都可使电压互感器三相铁芯出现不同程度的饱和, 系统中性点就有较大的位移, 位移电压可以是工频, 也可以是谐波频

率(分频、高频), 饱和后的电压互感器励磁电感变小, 系统网络对地阻抗趋于感性, 此时若系统网络的对地电感与对地电容相匹配, 就形成三相或单相共振回路, 可激发各种铁磁谐振过电压。

铁磁谐振过电压分为工频、分频和高频谐振过电压, 常见的为工频和分频谐振。当电压互感器的激磁电感很大时, 回路的自振频率很低, 可能产生分频谐振。当电压互感器的铁芯激磁特性容易饱和时或系统中有多台电压互感器, 并联电感值较小, 回路自振频率较高, 则产生高频谐振。

1.2 铁磁谐振过电压的危害及现象

工频和高频铁磁谐振过电压的幅值一般较高, 可达额定值的 3 倍以上, 起始暂态过程中的电压幅值可能更高, 危及电气设备的绝缘结构。工频谐振过电压可导致三相对地电压同时升高, 或引起“虚幻接地”现象。分频铁磁谐振可导致相电压低频摆动, 励磁感抗成倍下降, 过电压并不高, 一般在 2 位额定值以下, 但感抗下降会使励磁回路严重饱和, 励磁电流急剧加大, 电流大大超过额定值, 导致铁芯剧裂振动, 使电压互感器及一次侧熔丝过热烧毁。

电网发生铁磁谐振过电压较明显的现象为系统有接地信号, 电压表计指针不停地摆动, 电气设备有较强裂的电晕声。

1.3 防止铁磁谐振的措施

在电力系统中, 消除铁磁谐振的措施主要有以下几种方法: ①选用励磁特性较好的电压互感器或使用电容式电压互感器; ②增大对地电容, 破坏谐振条件; ③在零序回路加阻尼电阻, 即在电压互感器一次绕组中性点或开口三角绕组加装消谐器或非

线性电阻。

1.4 淤溪变 10kV 压变一次熔丝熔断并非铁磁谐振引起

根据以上铁磁谐振产生的原理和现象分析,并通过现场检查和试验,我们发现尽管在雷雨天气,淤溪变 10kV 系统有可能受到来自雷击造成的某些干扰的激发条件,但压变一次熔丝熔断并非谐振引起。①变电所(无人值班)遥信库中未发现母线接地信号;②产生谐振过电压的其中一个必要条件是电压互感器一次绕组中性点必须直接接地,而淤溪变 10kV 压变一次绕组中性点装有性能良好的 LXQ(D) II-10 型消谐器,消谐器全部项目试验合格,压变铁磁谐振零序过电压的大部分电压降落在消谐器上,从而避免了铁芯饱和,限制了铁磁谐振过电压的发生;③现场检查电压互感器空载励磁特性良好,满足 $1.9U_m/\sqrt{3}$ 电压下的空载电流不大于额定电压下的空载电流的 10 倍,且相差不大于 50% 的标准;④检查三相电压互感器绝缘良好,未受到严重过电压的冲击。

2 低频饱和电流可引起电压互感器一次熔丝熔断

在中性点不接地电网中,电磁式压变高压熔丝熔断,并不一定都是由于铁磁谐振过电压引起的。当电网对地电容较大,而电网间歇弧光接地或接地消失时,健全相对地电容中贮存的电荷将重新分配,它将通过中性点接地的压变一次绕组形成放电回路,构成低频振荡电压分量,促使压变饱和,形成低频饱和电流。它在单相接地消失后 $1/4 \sim 1/2$ 工频周期内出现,电流幅值可远大于分频谐振电流(分频谐振电流约为额定励磁电流的百倍以上),频率约 $2 \sim 5\text{Hz}$ 。由于具有幅值高、作用时间短的特点,在单相接地消失后的半个周波即可熔断熔丝。

2.1 产生低频饱和电流的原理

当系统发生单相接地时,故障点会流过电容电流,未接地相的电压升高到线电压,其对地电容上充以与线电压相应的电荷。在接地故障期间,此电荷产生的电容电流,以接地点为通路,在电源-导线-大地间流通。由于压变的励磁阻抗很大,其中流过的电流很小。一旦接地故障消失,这时电流通路被切断,而非接地相必须由线电压瞬间恢复到正常相电压水平。但是,由于接地故障已断开,非接地相

在接地期间已经充电至线电压下的电荷,就只有通过压变高压绕组,经其原来接地的中性点进入大地。在这一瞬变过程中,压变高压绕组中将会流过一个幅值很高的低频饱和电流,使压变铁芯严重饱和。实际上,由于接地电弧熄灭的时刻不同,即初始相位角不同,故障的切除不一定都在非接地相电压达最大值这一严重情况下发生。因此,不一定每次单相接地故障消失时,都会在压变高压绕组中产生大的涌流。而且低频饱和电流的大小,还与压变伏安特性有很大关系,压变铁芯越容易饱和,该饱和电流就越大,高压熔丝就越易熔断。

2.2 抑制低频饱和电流的方法

采用压变中性点装设非线性电阻或消谐电阻器(简称消谐器)的方法可抑制低频饱和电流。在上述情况下,若在压变高压绕组中性点接入一个足够大的接地电阻 R ,在单相故障消失时,低频饱和电流经过该电阻后进入大地,由于大部分压降加在电阻上,从而大大抑制了低频饱和电流,使压变高压熔丝不易熔断;同时由于在零序电压回路串联的这个电阻 R ,使压变铁磁谐振过电压的大部分电压降落在电阻 R 上,从而避免了铁芯饱和,限制了铁磁谐振过电压的发生。考虑到在电网正常运行时的中性点零序电流较小和单相接地时满足压变开口三角形电压的灵敏度,中性点电阻 R 因为满足一定特性要求的非线性电阻或消谐器。

安装在压变二次侧的电子消谐器不能限制低频饱和电流,当涌流发生时,它会将二次开口三角短路,这反而会增大涌流幅值。

2.3 淤溪变 10kV 压变一次熔丝熔断非低频饱和电流引起

淤溪变电所 10kV 压变一次中性点安装了 LXQ(D) II-10 型消谐器,其电阻元件是用 SIC 为基料经高温氢气炉焙烧而成的非线性电阻串、并联而成。电网正常运行时此消谐器电阻值大于 $450\text{k}\Omega$ (取 0.3mA 峰值零序电流试验),单相接地时电阻值大于 $180\text{k}\Omega$ (取 3mA 峰值零序电流试验),足以抑制低频饱和电流。

3 电压互感器一、二次绝缘降低或消谐器绝缘下降可引起电压互感器一次熔丝熔断

3.1 P.T 的辅助绕组开口三角两端的线路中存在两点接地的错误接线易引起 PT 一次熔丝熔断

若在变电所安装过程中,发生PT的辅助绕组开口三角两端的线路两点接地的错误接线,即对PT开口三角两端 a_D 点及 x_D 点,在PT柜已将 x_D 端接地,开口两端出线引到其他保护柜后,若重复接地只能将 x_D 引线接地,而不能错误地将 a_D 线接地,否则,就将PT开口三角绕组变成了闭口三角绕组。

据有关资料,装有 LXQ 型消谐器的 10kV 压变正常运行时,辅助绕组短路后的 PT 高压绕组中最大电流一般不超过为 10mA,辅助绕组中最大电流为 1A,PT 仍可以长期运行;若电网单相接地的情况下,辅助绕组开口两端短路,则 PT 三相高压绕组中电流都增大到 170-180 mA (接有消谐电阻)及 400-415 mA (未接消谐电阻),辅助绕组中电流增大到 30A (接有消谐电阻)及 75-80 A (未接消谐电阻),通过消谐电阻的电流也高达 520mA 左右,此时 PT 负载达到每台 1000VA 及 2400VA,而通常 10kV 压变最大热极限负荷仅为 300-400VA。由于 PT 高压绕组的保护熔丝为 0.5A,虽然高压绕组中电流达到 0.2-0.4 A,仍低于高压保护熔丝的熔断电流,而 PT 辅助绕组回路中又没有熔丝保护。因此 PT 高低压绕组只有任其加热,当电网接地持续一段时间后,PT 高、低压绕组的绝缘层逐渐烧损,以至短路,电流更加增大,有的将主绝缘烧穿,变成相间短路,高压熔丝才熔断(南京供电局某变电所 1998 年曾发生此类现象)。

在 PT 安装了消谐电阻器后,电网正常运行时,在开口两端一般都会有数伏电压,如果用万用表测量此两端电压很低(毫伏级),则要考虑辅助绕组的接线是否被短路。利用此特征,可以早期发现 PT 开口三角短路的潜在故障。

现场实测淤溪变 10kVPT 开口三角电压为 5.2V,PT 未发生烧损,因此可判断熔丝熔断非 PT 开口三角两点接地引起(接线正确)。

3.2 PT 的一、二次和消谐器绝缘下降会引起 PT 一次熔丝熔断

不难想象 PT 的一、二次绕组和消谐器绝缘下降会引起一次熔丝熔断,尤其是电网出现位移过电压、单相接地等情况下将可能会加速熔丝熔断。

现场检查 PT 的一、二次绕组及消谐器绝缘均良好,重点对 JDZX11-10C 型电压互感器的弱绝缘一次尾巴端子进行了工频 3kV 耐压试验正常。

4 电压互感器 X 端绝缘水平与消谐器不匹配

易导致熔丝熔断

10kV 电压互感器的 X 端绝缘通常有全绝缘和弱绝缘两种,全绝缘(JDZJ-10)的压变 X 端耐受电压与首端相同(常称为羊角 PT),弱绝缘的压变 X 端工频耐受电压为 3kV。对 X 端为弱绝缘的中性点消谐器的选择,必须能在电网正常运行和受到大的干扰后,均使压变 X 端电压限制在其绝缘允许范围内,否则压变 X 端子就有可能对地放电,造成一次绕组电流增大,熔断熔丝。

淤溪变 10kV 电压互感器为 JDZX11-10C 型 X 端弱绝缘电压互感器,所配的消谐器为 LXQ (D) II-10 型消谐器。此类消谐器在中性点不接地系统电网正常运行时(用 0.3mA 峰值电流模拟通流)和在稳态单相接地(用 3mA 峰值电流模拟通流)时均能使电压限制在工频有效值 500V 以下;当电网出现大的扰动后,流过消谐器的电流很大时,如受雷击,发生断线谐振,消谐器下部电阻旁并联间隙将动作,短路下部电阻,以使消谐器上的电压仍不大于弱绝缘端子的工频耐受电压值,有效地保护互感器弱绝缘一次尾巴端子的安全。

5 压变入口电容的冲击电流,有可能将压变一次熔丝熔断

通过以上分析,淤溪变 10kV 电压互感器一次熔丝熔断并非以上 1-4 种情况所为,原因何在,必须进一步深入探讨。

淤溪变处在空旷的农村,该地区为里下河地区,雷雨较集中,10kV 线路较长(合计 70-80 km)且无架空地线,雷击时,电网并未接地,三相压变熔丝同时熔断,其它设备皆无损伤,我们再从雷电侵入波方面分析。

5.1 电磁式电压互感器一次绕组等值电路

电磁式电压互感器实际上就是一台微型高压电力变压器。变压器在冲击电压下等值电路如图 1 所示。

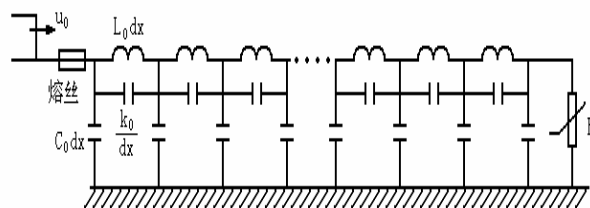


图 1 电磁式压变在冲击电压作用下的等值电路

一次绕组的分布参数含有电感 $L_0 dx$, 纵向电容 K_0/dx , 对地电容 $C_0 dx$, 在冲击电压作用下, 当波头时间较小时 $L_0 dx$ 呈现的电抗值很大, 电流不通过电感, 等值电路中电容可简化为一个入口电容。将图 1 再简化为图 2 的等值简化电路。

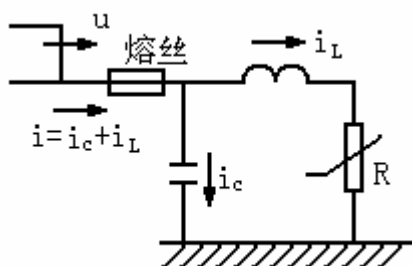


图 2 压变等值简化电路

从图 2 中可以看出, 流过高压熔丝的冲击电流 $i = i_c + i_L$, i_c 直接入地, 不通过 R , 而 R 是串联在压变尾端, 只对 i_L 值起限制作用, 对 i_c 值不起作用。

5.2 雷云闪电时, 压变多相高压熔丝熔断的原因分析

10-35kV 架空线路, 没有架空地线 (农村 35kV 线路进线段的架空地线一般为 1-2 km, 10kV 线路无架空地线), 在空旷的农村, 三相导线暴露在空中, 在雷云电荷的作用下, 三相导线都感应相同数量的束缚电荷。当雷云放电 (其实这种闪电并未击中导线, 而是云间或云对地闪击), 三相导线上的束缚电荷向线路两侧运动, 对变电站形成侵入波。此侵入波的电压并不高, 因为压变高压熔丝熔断时避雷器并未动作, 现简单计算一下 i 中 i_c 的值。

设侵入波的波头时间分别为 $1.0\mu s$ 和 $10\mu s$, 则等值高频电流波长为 $4 \times 1.0\mu s$ 和 $4 \times 10\mu s$ 。等值频率

$$f = (4 \times 10^{-6})^{-1} = 250kHz \quad \text{和}$$

$$f = (4 \times 10^{-5})^{-1} = 25kHz。$$

取侵入波的电压幅值 $u=25kV$ (取 10kV 电网氧化锌避雷器的直流 1mA 电压)。查资料得知压变入口电容 c 在 200-500 pf 之间, 取 $c=350 pf$ 。

则通过入口电容的电流幅值

$$\begin{aligned} i_c &= u / x_c = u \cdot \omega \cdot c \\ &= 25 \times 10^3 \times 2\pi \times (25 \sim 250) \times 10^3 \times 350 \times 10^{-12} \\ &= 1.4 \sim 14A \end{aligned}$$

可以看出, i_c 的幅值与侵入波的陡度有很大关系。熔丝熔断是发热的结果, 电流发热的功为

$p = i^2 \cdot R \cdot t$, 电流的幅值 i 是最为重要的因素, 还与熔丝电阻 R 及电流的持续时间 t 有关。只有 i 的幅值高且持续时间又长的侵入波, 才会使高压熔丝熔断, 而大部分侵入波都不同时具备此两种条件。故在大多数雷暴天气里, 雷击引起压变高压熔丝熔断仍是小概率事件。2003 年 7 月 10 日左右淤溪变所在地区雷雨交加, 空中云雾较多, 使得导线的电感减小, 电容增大, 10kV 线路较长且无架空地线, 雷云放电, 导线感应电荷增加, 侵入波的陡度也增加, 才使得压变三相熔丝同时熔断。

5.3 解决压变入口电容的冲击电流引起多相熔丝熔断的方法

从上述的分析可知, 安装在压变尾端的消谐电阻, 不能限制雷击时通过入口电容的冲击电流, 要解决入口电容的冲击电流引起多相熔丝熔断的方法, 只能依靠熔丝本身的抗冲击电流的通流能力。

6 结论

(1) 雷击时, 变电所 10kV 中性点不接地系统电压互感器一次侧高压熔丝熔断有多种原因, 要根据不同的情况分析处理, 在三相压变一次绕组的接地端串接性能良好的 LXQ (D) II-10 型消谐器通常能有效防止这一现象的发生。

(2) 当发生雷云闪电时, 在空旷的架空线路上, 感应雷形成侵入波, 当侵入波的波头陡时, 通过压变入口电容的冲击电流则幅值高, 有可能将压变高压熔丝熔断。

(3) 安装在压变尾部的消谐电阻不能限制压变入口电容的冲击电流, 只能依靠熔丝本身的抗冲击电流的通流能力。

(4) 以上结论同样实用于 35kV 中性点不接地系统。

参考文献:

- [1] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [2] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 朱良镭, 王萍. 电力工程电气设计手册(第 1 版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [4] 岳健民. 6~35kV 压变中性点用消谐器的性能分析[A]. 全

国过电压学术讨论会论文集[C].1997

[5] 陈珩. 电力系统稳态分析(第二版)[M].北京:中国电力出版社,1995.

[6].输变电设备交接和状态检修试验规程[Z].南京:江苏省电力公司,2010.

作者简介:

黄海涛(1971—),男,泰州姜堰人,工程师,从事变电设备运行、检修工作。