

关于变电所压变若干异常问题的分析及处理对策

吴绍武

(江苏省电力公司淮安供电公司, 淮安市解放西路 101 号 223002)

摘 要: 论文对变电所发生的几起压变损坏事故、几起 10kV 母线单相接地时保护测控装置相电压变化异常, 以及部分变电所长期存在、不明原因的 10kV、20kV 母线二次三个相电压不平衡的异常进行了分析, 由此找到了真正原因, 并提出了有效的解决、预防措施, 使得问题得到了彻底的解决。

关键词: 压变; 二次电压; 异常; 分析

针对近两年处理、分析的几起典型压变和二次电压异常问题从表面现象着手, 剥茧抽丝, 进行了详细地剖析。

1 几起 10kV 压变损坏的分析及处理对策

近两年, 在部分变电所 10kV 压变爆炸事故中, 暴露出了在新设备启动时, 验收人员、施工调试人员在验收、测试细节上考虑不够全面的一些问题。

一组 PT 爆炸, 常见的原因无外乎 PT 质量不合格、系统谐振过电压击穿、消谐器故障、二次回路短路等。如果一组 PT 在一两年内故障两次及以上, 就可以初步排除前两个因素, 如果消谐器也更换过, 那首先就要考虑二次回路是否有问题。一般情况下, 会查看以前的电压曲线, 如果正常就会认为二次回路没有问题。而忽略了开口三角回路, 因为 OPEN3000 画面不反映开口电压, 且开口回路电压正常情况下本来就很低, 在一次系统有较大的不平衡时才会有较高的电压。而事实上, 在一次系统有单相接地故障时, 开口侧短路比 PT 星形接线的二次侧短路后果严重得多, 因为开口侧电压回路无作为过流保护的熔丝或空气开关, 一旦短路, 直接对一次三相绕组造成破坏性冲击。据此, 也可以得出一个很适用的判据: 如果系统运行时, 某段母线二次相电压、线电压突然同时全部消失, 并伴随压变故障, 排除极其偶然的三相同时铁磁谐振过电压造成三相压变同时损坏, 那么基本上就可以判定是开口侧短路造成 (如图 1 所示)。

原因是只有开口三角回路短路, 才会造成三相压变同时二次回路短路, 只要有一相非接地相的压变高压熔丝未熔断, 这种短路就一直存在, 直至非

接地相的两相压变高压熔丝都熔断或压变损坏。接地相压变高压熔丝这时一般不会熔断, 但其开口侧二次绕组很可能会因过流而损坏, 即便不损坏, 如果在压变未退出运行之前系统接地消失, 由于之前已有两相压变故障退出, 这时原接地相的压变将会因开口侧再次短路而损坏或高压熔丝熔断。

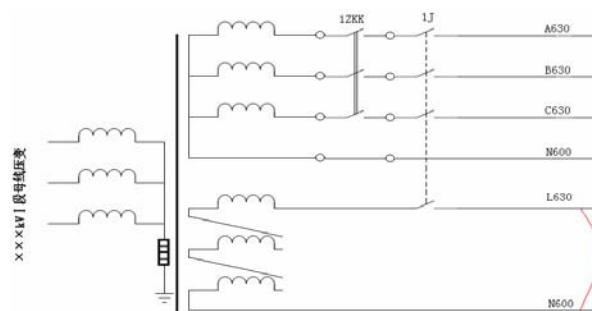


图1 压变开口三角回路短路示意图

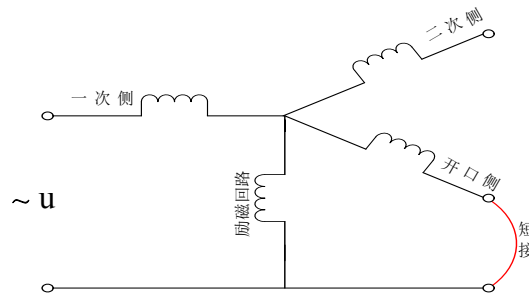


图2 压变开口侧短路等值回路图

为了确定故障压变哪个绕组烧坏, 常常会通过对一只压变的各个绕组分别加交流电压的方法来判断, 而最后的结论往往是几个绕组都有问题。事实上并非如此, 因为压变各个绕组之间是电磁耦合的关系, 如同变压器各侧线圈之间的关系, 只要有一个绕组短路, 从任一侧绕组看进去的等效阻抗必然都是短路阻抗 (见图 2), 故在其他绕组上无法再施

加电压。如果需要知道判断到底是压变哪个绕组的问题，可通过测量每个绕组直阻的方法来判断。

一直以来对于新投运压变的检查都是测量保护、计量用二次回路的三相电压，并对两段压变之间进行核相，而对开口侧电压的测量却未给予足够的重视，这样很可能发生某段压变开口侧因各种原因的错误被短接或两段压变开口侧接线反相却未被发现而长期投入运行，一旦一次系统发生单相或两相接地，PT 就会因为开口侧被短路而爆炸。其实避免这方面事故的方法很简单，对于 10kV、35kV 压变在投运时一并测量开口侧电压（因一次系统总会有不平衡，所以开口侧一般都会有 1~2V 的电压），如果低于 0.5V 就要检查是否有短路。同时为避免两段压变开口侧接线反相，两段压变开口侧二次核相也是很有必要的（如果两段压变一次、二次都并列运行，而开口侧接线反相，当一次系统发生单相或两相接地时，由于开口侧电压反相并联，两段压变都会爆炸或损坏），方法是让两段压变一次并列、二次解列，测量此时两个开口电压之间的差值，如果接近于两个开口电压有效值的和，就要考虑是否存在某段压变开口侧接线接反。由于三相压变间的不完全平衡也会在开口侧产生不平衡电压，所以即使接线都正确，两个开口之间压差一般不会为 0，会有一定的数值。对于 110kV 压变，一次系统的平衡度远较 10kV 系统高，开口电压一般都很小（0.4V 左右，甚至小于 0.1V），可在施工结束、投运前通过模拟带上所有二次负荷，在一相 PT 二次端子处解开开口三角回路一根线、测量断开处的串联总电阻来判断是否存在短路。

2 几起关于压变二次三个相电压长期不平衡的分析、处理

有些问题看似二次问题，实际上不一定，甚至可能不是问题。新投运变电所开关柜对压变进行二次核相时，经常会发一次系统母线绝缘告警，三个相电压不对称，而这时是母线空载运行，所有出线开关都在分位，一次人员认为母线做过试验，不应该有问题，应该是二次回路哪里有问题，但二次人员一般是查不出问题的。35kV 及以下等级的小电流接地系统对地并不是绝缘系统，各相对地电压与各相对地的等效电容负相关，空载母线对地电容极小，且因空间布置很不对称导致对地电容不对称，所以

三相对地电压很不对称，不过这不影响线电压的对称性。而带上线路后，一般情况下线路对地电容三相基本平衡，且远大于母线对地电容，所以这时三个相电压会基本平衡。

在部分变电所存在的 10kV 压变开口电压长期较高，在 10V 左右（个别甚至达到 14V），相电压不平衡较明显，往往相差 4V 左右，拉路查找没有任何效果，对压变做常规试验、更换一次消谐器都未发现问题。通过计算可知，如果相电压一相降低，两相升高（或反之），则降低相要比其他两相需低（或高）5.77V，开口才能产生 10V 的电压，而实际相电压的不平衡度并没有这么大。所以可初步排除一次系统不平衡的问题。联想到同一个变电所，有时会两段压变运行于并列的两段母线上，一段压变相电压基本对称，另一段压变三相电压不平衡，且开口电压较大。这时应该考虑到压变自身的问题，压变在正常运行中，其铁芯一般运行于饱和段，磁场中含有较高的三次谐波，如果饱和程度不一样，或者厂家为减少成本而压缩铁芯体积，那么会导致铁芯饱和得更厉害，三次谐波分量会更大，从而在中性点一次消谐器上产生稳定的、较高分量的三次谐波电压，一次、二次消谐器对此是无能为力的，这种问题通过常规的试验项目很难发现。联系一次消谐器厂家，购买了专门用于消除三次谐波分量的二次简易消谐器，装于压变的开口回路，电压恢复正常。将此方法推广于多个存在同样问题的变电所都得到了满意的效果。原理分析如下：

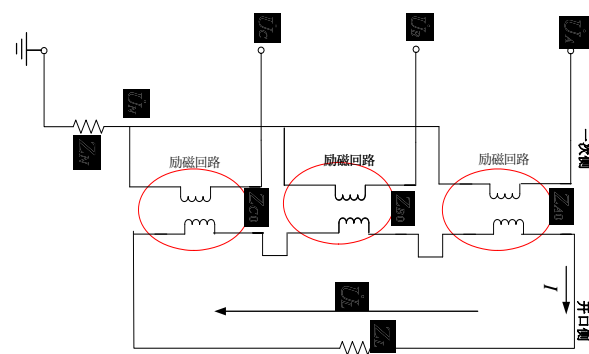


图3 安装一次中性点消谐器和二次回路辅助附件的压变等值回路图

图3为同时安装一次消谐器（对应等值阻抗 Z_N ）和二次开口回路消谐器简易附件（对应等值阻抗 Z_L ）的压变等值回路， Z_{A0} 、 Z_{B0} 、 Z_{C0} 分别对应压变三相励磁等值回路，忽略压变一次、二次回路的

漏抗,并忽略压变星形和开口二次回路的正常负载。

由图 3 得:

$$\begin{aligned}\dot{U}_N &= \frac{\dot{U}_E}{Z_L} = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N}{Z_L}; \\ Z'_{AII} &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{\dot{I}_E} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N} Z_L \\ Z'_{BII} &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{\dot{I}_E} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N} Z_L; \\ Z'_{CII} &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{\dot{I}_E} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N} Z_L\end{aligned}$$

由此得出如图 4 所示的将开口回路的阻抗等效分到每相的等值回路图,并进一步简化为图 5。

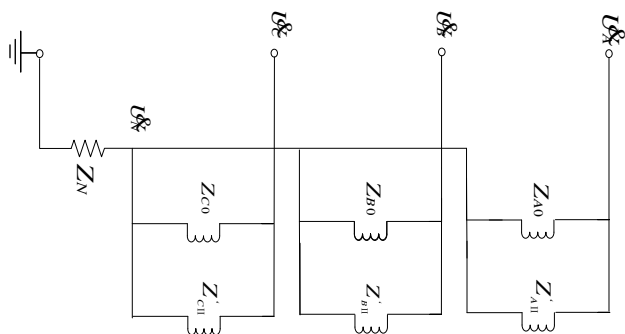


图 4 压变等值回路图

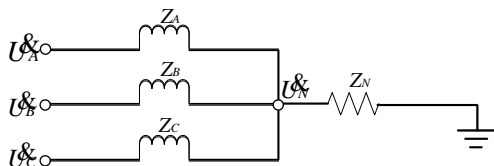


图 5 压变简易等值回路图

图 5 中,

$$Z_A = Z_{A0} // Z'_{AII}; Z_B = Z_{B0} // Z'_{BII}; Z_C = Z_{C0} // Z'_{CII}$$

由图 3~图 5, 推导如下(所有阻抗均折算到同一侧):

$$\begin{aligned}\frac{1}{Z_A} &= \frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_L} \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N}{\dot{U}_A - \dot{U}_N} \\ \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} &= \left(\frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_{C0}} \right) \\ &+ \frac{1}{Z_L} \left(\frac{1}{\dot{U}_A - \dot{U}_N} + \frac{1}{\dot{U}_B - \dot{U}_N} + \frac{1}{\dot{U}_C - \dot{U}_N} \right) \\ &\times (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N) \\ \frac{\dot{U}_A}{Z_A} &= \frac{\dot{U}_A}{Z_{A0}} + \frac{\dot{U}_A}{Z_L} \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N}{\dot{U}_A - \dot{U}_N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} &= \left(\frac{\dot{U}_A}{Z_{A0}} + \frac{\dot{U}_B}{Z_{B0}} + \frac{\dot{U}_C}{Z_{C0}} \right) \\ &+ \frac{1}{Z_L} \left(\frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_A - \dot{U}_N} + \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_B - \dot{U}_N} + \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_C - \dot{U}_N} \right) \\ &\times (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_N &= \frac{\dot{U}_A / Z_A + \dot{U}_B / Z_B + \dot{U}_C / Z_C}{1 / Z_A + 1 / Z_B + 1 / Z_C + 1 / Z_N} \\ \therefore \dot{U}_N &= \frac{\frac{3(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{Z_L} + \left(\frac{\dot{U}_A}{Z_{A0}} + \frac{\dot{U}_B}{Z_{B0}} + \frac{\dot{U}_C}{Z_{C0}} \right)}{\frac{9}{Z_L} + \frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_{C0}} + \frac{1}{Z_N}} \\ &= \frac{\dot{U}_A \left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{A0}} \right) + \dot{U}_B \left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{B0}} \right) + \dot{U}_C \left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{C0}} \right)}{\left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{A0}} \right) + \left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{B0}} \right) + \left(\frac{3}{Z_L} + \frac{1}{Z_{C0}} \right) + \frac{1}{Z_N}}\end{aligned}$$

$$\dot{U}_N = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - 3\dot{U}_N$$

可见, 压变开口二次回路并联一个等值阻抗为 Z_L 的简易附件, 对压变中性点电压的影响相当于在每相压变的励磁回路并联一个 $Z_L/3$ 的负载。在正常运行时如果一次系统三相对地基本平衡, 则

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C \approx 0, \text{ 有}$$

$$\dot{U}_N \approx \frac{\frac{\dot{U}_A}{Z_{A0}} + \frac{\dot{U}_B}{Z_{B0}} + \frac{\dot{U}_C}{Z_{C0}}}{\frac{9}{Z_L} + \frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_{C0}} + \frac{1}{Z_N}}, \quad \dot{U}_N \approx -3\dot{U}_N$$

可见正常运行时未并联简易消谐器时 ($Z_L = \infty$) 的开口电压主要取决于压变三相励磁阻抗 (Z_{A0} 、 Z_{B0} 、 Z_{C0}) 的对称性和压变一次中性点消谐器对应的阻抗 Z_N , 如果三相励磁阻抗偏差较大, 则压变中性点将产生较高的电压, 压变一次三相绕组上的实际电压就会有较大的不对称, 从而压变二次星形接线回路的三个相电压也会不平衡, 并且在开口电压回路出现较大的不平衡电压。对于 10kV 系统, 一般一次侧与开口侧的电压变比为 $\frac{10.5/\sqrt{3}}{0.1/3}$, 如果压变一

次中性点的电压达到正常相电压的十分之一, 即 $1000/\sqrt{3} \text{ V}$, 开口侧便会产生 10V 左右的较高电压。如果降低消谐器对应的阻抗 Z_N , 能起到降低中性点电压的作用, 但过分降低消谐器阻抗, 又会严重影响一次消谐器抑制铁磁谐振的能力, 显然是不现实的。

开口侧并联消谐器附件后, 如果

$$\left| \frac{9}{Z_L} \right| \geq 6 \left| \frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_{C0}} + \frac{1}{Z_N} \right|, \quad \text{即}$$

$|Z_L| \leq 1.5|Z_{A0} // Z_{B0} // Z_{C0} // Z_N|$ ，即可将一次中性点和二次开口侧的电压降至原来的 1/6，大大改善相电压的平衡性。

3 三个变电所 10kV 系统单相接地时二次相电压变化异常的分析、处理

有三个使用爱德斯保护的变电所，监控人员反映 10kV 系统发生单相接地时电压会发生很奇怪的变化：一相升高、另两相电压基本不变。询问厂家得知，其保护显示的相电压不是直接取自单元箱所接入的实际值，而是通过线电压与开口电压的逻辑运算得来。由此可以推导出相电压的相量表达式（式中电压均为相量），由 $U_{AB}=U_A-U_B$ ， $U_{BC}=U_B-U_C$ ， $U_{CA}=U_C-U_A$ ， $U_A+U_B+U_C=3U_0$ ， $3U_0=\sqrt{3}U_L$ 可以推导得：

$$U_A = 1/3(U_{AB} - U_{CA} + \sqrt{3}U_L), U_B = 1/3(U_{BC} - U_{AB} + \sqrt{3}U_L), U_C = 1/3(U_{CA} - U_{BC} + \sqrt{3}U_L)$$

当 A、B、C、L、N 都接线正确，即： U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 、 U_L 都正确时，不管正常运行还是单相接地时，计算出的三个相电压都和实际相电压一致。当开口电压回路首尾接线对调导致 U_L 反相时，对正常运行时的相电压影响很小。而如果 A 相单相接地时，可以画相量图（如图 6，在开口电压反相接入，A 相单相接地时装置所反映的三相相电压）或由上式直接推导出，装置反映 A 相电压与正常运行时同相位，但大小是正常相电压的 2 倍，B、C 相电压大小等于正常相电压，但 B、C 相电压分别超前、滞后 A 相电压 $\pi/3$ 弧度角度。这与实际情况吻合，故对调了开口电压 U_L 回路的首尾端后，变电所单相接地时电压变化正常。

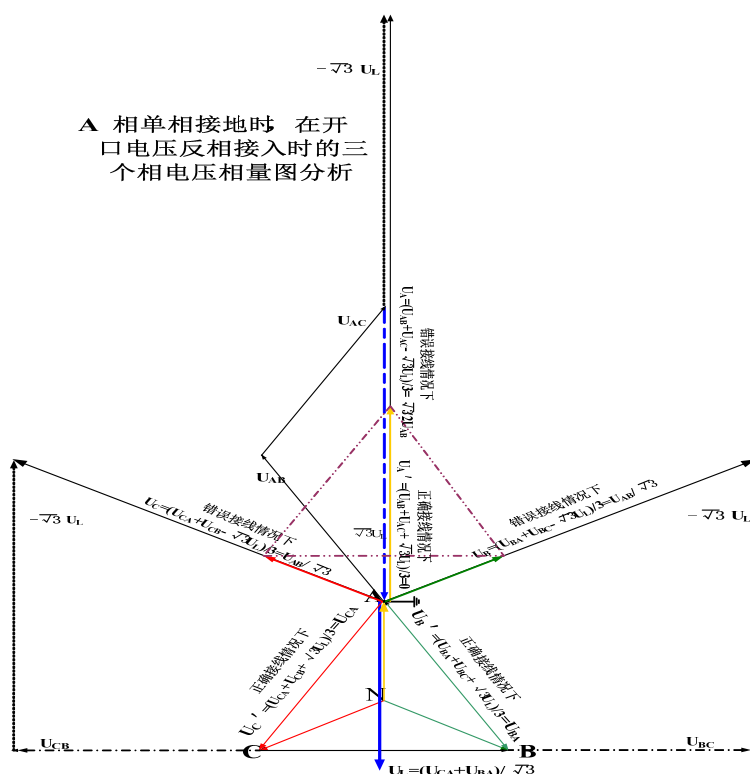


图 6 在开口电压正、反接线下的相电压分析

4 结论

工作人员在处理疑难问题时，不能满足于对某个问题的一知半解和表面上的解决，应该有穷根究底的精神，把处理的问题分析透，这样能不断拓宽自己的思路，提高处理问题的能力，并在深入的分析中对一些问题能有全新的认识。并把自己掌握的

知识、工作中处理的问题心得、积累的经验以及存在的疑惑主动和其他人交流，带动大家一起进步。

作者简介：

吴绍武（1974-），男，江苏淮安人，工程师，从事变电检修主管工作。