

# 35 kV 电容式电压互感器高压熔断器熔断的原因分析

罗军川

(四川省广元电业局, 四川 广元 628000)

**摘要:** 针对一起 35 kV 电容式电压互感器高压熔断器频繁熔断现象, 笔者详细分析了电容式电压互感器(CVT)的工作原理及等值电路。通过 CVT 中压互感器的伏安特性试验, 得出了在系统发生单相接地故障或故障消除的过渡过程中 CVT 中压互感器铁芯深度饱和激发铁磁谐振, 从而导致高压熔断器熔断的结论。笔者还提出在 CVT 中压互感器二次剩余绕组并联阻尼器是抑制铁磁谐振行之有效的措施。同时, 在产品生产制造时应着力改善中压互感器的空载励磁特性, 选择伏安特性优越的中压互感器。分析结果为改进产品设计、提高制造工艺水平和优化运行维护提供了科学依据。

**关键词:** CVT 高压熔断器; 熔断; 铁磁谐振; 饱和; 分析

中图分类号: TM451.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0124-04

## Analysis of High-voltage Fuse Blow for 35 kV Capacitor Voltage Transformer

LUO Jun-chuan

(Guangyuan Electric Power Bureau of Sichuan Province, Guangyuan 628000, China)

**Abstract:** The operation mechanism and equivalent circuit of a capacitor voltage transformer (CVT) are investigated for analyzing the frequent blow of a 35 kV CVT high-voltage fuse protector. By volt-ampere characteristic test of a medium voltage CVT, it is found that the core of medium voltage CVT is saturated deeply to excite ferromagnetic resonance, which leads to the high-voltage fuse protector blow, during the transition process of single-phase grounding failure or failure elimination. And then, an available method for ferromagnetic resonance inhibition is proposed, in which a damper is paralleled to the secondary residual winding in the medium voltage CVT. Moreover, it is necessary to improve non-load magnetization characteristic of medium voltage transformer and choose the one with superior volt-ampere characteristic in design and manufacture process.

**Key words:** CVT high voltage fuse; blow; ferromagnetic resonance; saturation; analysis

### 0 引言

电容式电压互感器(CVT)是由电容分压器和中压电磁单元组成的一种电压变换装置, 是电力系统计量、保护和载波通讯不可或缺的一种电气设备。它既可以作电能计量测量、供给继电保护的电压信号, 又可兼作载波通讯等, 同时在实际运用中又能可靠阻尼铁磁谐振和具备优良的瞬变响应特性<sup>[1]</sup>, 因此近年来在电力系统中得到广泛应用。由于电容式电压互感器不与系统线路对地电容产生铁磁谐振, 目前在 35 kV 配电系统中也逐渐选用。

受设计水平、制造工艺等多种因素的影响, 现场

的 CVT 在运行过程中也暴露出不少问题, 其故障率远远高于电磁式电压互感器和耦合电容器<sup>[2]</sup>, 而其中压电磁单元是 CVT 最容易出现故障的部件。主要表现为电磁单元绕组、避雷器和电容单元的故障致使二次电压输出异常, 以及因自身的铁磁谐振产生过电压最终导致高压熔断器熔断等。

在实践运行中高压熔断器熔断是一个经常性的问题, 因为性质不是很严重, 始终没有引起足够重视, 更缺乏深入的研究分析, 特别是在不同的运行条件和不同环境状况下, 其故障原因可能完全不同, 只有准确分析判断故障原因, 才有可能采取具有针对性的防范措施。

收稿日期: 2008-11-07; 修回日期: 2009-02-21

作者简介: 罗军川(1966), 男, 高级工程师, 主要致力于电气设备绝缘诊断与分析研究领域。

## 1 故障情况

2007年7月27日4:50,天气状况:雷雨。四川广元电业局35 kV陈家变电站监控机通讯中断,35 kV母线电压A、C相为0,B相为21.87 kV。6:20,值班人员赶赴现场检查设备发现:35 kV线路CVT发出断线信号,测量该CVT二次电压a、c相对地电压均为0,b相为62.2 V,分析判断为该CVT高压熔断器A、C相熔断。于是申请线路停电更换熔丝后系统恢复正常运行。35 kV线路避雷器B相有动作记录。

2007年8月6日13:32,天气状况:雷雨。陈家变电站通讯再次中断,现场检查35 kV PT三相一次电压为0,测量该CVT二次电压a、b、c三相对地电压均为0。线路停电更换该CVT三相高压熔断器熔丝后系统恢复正常运行。35 kV线路避雷器A、B相有动作记录。

2007年9月25日,该熔断器同样在雷雨天气条件下再次熔断,根据CVT厂家意见,将该熔断器撤除,CVT直接与系统硬连接。

该变电站于2007年6月份投入运行,属末端无人值班变电站。35 kV朝木线一回架空进线,长度不足20 km。1.5 km进线段加氧化锌避雷器作为变电站入侵波防雷保护方式,一次主接线示意图见图1。

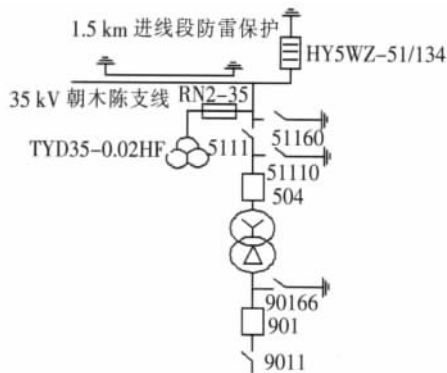


图1 35 kV陈家变电站一次主接线示意图

## 2 CVT高压熔断器熔断的原因分析

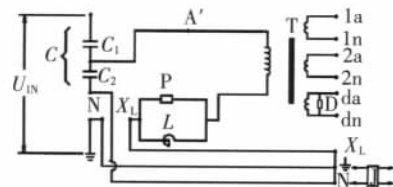
CVT高压熔断器熔断必然缘于CVT一次侧发生了足够长时间的过电流或者出现了较强的瞬间冲击电流<sup>[3]</sup>。从以上连续几次故障情况可以看出, CVT高压熔断器频繁熔断故障是在特定条件下发生的,雷雨天气是导致该次故障发生的外因。从故障现象分析,线路上有雷电波侵入,避雷器动作,其134 kV残压加到CVT上,产生较大的冲击电流,但只有 $\mu\text{s}$ 级的时间,不足以使熔丝熔断;而35 kV一回架空线路长度不足20 km,线路对地电容很小,由系统三相

对地电容在单相接地故障过程中的充放电引起熔断器熔断也不大可能<sup>[4]</sup>。

CVT含有电容元件及多个非线性电感元件,如补偿电抗器和中压互感器,当线路发生单相接地故障时,非故障相对地电压上升为线电压,在系统过渡过程中, CVT中压互感器非线性元件产生磁饱和,激磁电感 $L_0$ 下降,激发持续的分次谐波铁磁谐振<sup>[5]</sup>,使得在补偿电抗及中压互感器上产生过电压,由此导致一次侧熔断器熔断,严重时将使补偿电抗器和中压互感器绕组击穿损坏。因此该案例中因CVT自身的铁磁谐振产生过电流导致高压熔断器熔断的可能性最大。下面予以详细分析。

### 2.1 CVT工作原理及等值电路

CVT是利用电容串联分压的原理来实现电压变换,即将高压施加于几个相串联的电容上,从其中一个电容上抽取较低电压,然后利用中压互感器来实现高压和低压间的电气隔离。补偿电抗器与CVT漏抗之和与等值容抗 $1/[\omega(C_1+C_2)]$ 设计得很接近,以消除容抗压降随二次负荷变化引起的电压波动,可使电压稳定,降低测量误差。该CVT型号为TYD35/ $\sqrt{3}$ -0.02HF,2006年2月产品。其结构原理图见图2。



C——载波耦合电容 1a1n——二次1号绕组接线端子  
 $C_1$ ——高压电容 2a2n——二次2号绕组接线端子  
 $C_2$ ——中压电容 da dn——剩余电压绕组接线端子  
 D——阻尼器  $U_{1N}$ ——额定一次电压  
 P——保护装置 L——补偿电抗器  
 N——载波通讯端子  $X_L$ ——补偿电抗器低压端子  
 A'——中间电压端子 T——中间电压变压器  
 J——带有避雷器的结合滤波器(用户自备)

图2 CVT结构原理图

根据戴维南定理,图3中电路(a)可等效转换为电路(b)。忽略中压互感器激磁电抗时,则图2可等效转换为如图4所示的电路。图3、4中: $C_1$ 、 $C_2$ 分别为高压电容和分压电容, $R_1$ 为一次回路总电阻, $X_p$ 为补偿电抗器电抗, $X_{12}$ 为中压互感器的漏电抗, $Z$ 为二次负荷的阻抗, $U_1'$ 为分压电容上的电压。 $U_1'$ 与施加在一次侧高压端的电压 $U_1$ 有如下关系

$$U_1' = U_1 \times C_1 / (C_1 + C_2) \quad (1)$$

### 2.2 原因分析

为了弄清楚CVT在单相接地故障发生时,系

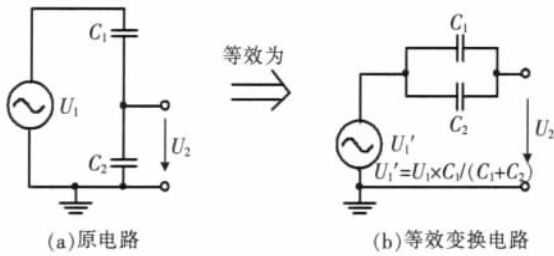


图3 戴维南等效电路变换

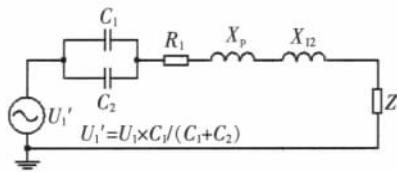


图4 CVT的等效电路

统过渡过程中是否可能激发铁磁谐振,对该 CVT 中压互感器进行伏安特性试验。中压互感器主要参数见表 1。

试验中将一次绕组低压端接地,高压端 A' 悬空;在二次绕组 1a1n 施加工频电压,用电压表和电流表分别测量二次绕组 1a1n 两端的电压和流入该绕组的电流。试验电压从 0.1 倍额定电压(5.77 V)开始,每次递增 5.77 V,直到 1.9 倍额定电压(109.7 V)为止。试验数据见表 2。伏安特性曲线见图 5。

由图 5 可知,伏安特性曲线拐点出现在 80 V 左右,当系统发生单相接地,非故障相上升至线电压,此时 A' 点电压为

$$U_{A'} = U_N(1 + C_2/C_1) = 35\ 000 / (1 + 0.040\ 85 / 0.039\ 65) \approx 17\ 239\ V$$

表 1 中压互感器主要参数

型号	编号	额定频率/Hz	空载电流/mA	空载损耗/W	额定电压			
					一次绕组 A'X <sub>T</sub>	二次绕组 1a1n	二次绕组 2a2n	二次绕组 dadn
DZ-10	07-2821	50	≤350	≤20	10 000	100/√3	100/√3	100/3

表 2 伏安特性试验数据

电压/V	电流/mA	电压/V	电流/mA
5.8	22.5	63.5	187.0
11.5	38.0	69.3	200.0
17.3	55.5	75.1	215.0
23.1	74.0	80.8	255.0
28.9	93.5	86.6	346.0
34.6	112.0	92.4	501.0
40.4	129.0	98.1	732.0
46.2	146.0	103.9	1 040.0
52.0	162.0	109.7	1 420.0
57.7	176.0		

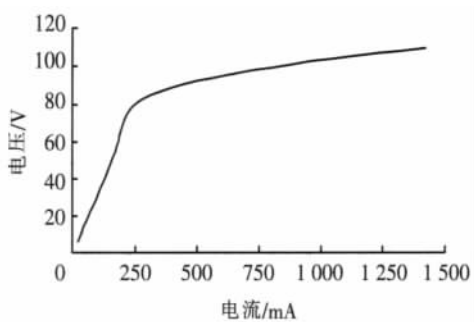


图5 伏安特性曲线

则,二次绕组 1a1n 两端的电压为

$$100/\sqrt{3} / 10\ 000 \times U_{A'} = 100/\sqrt{3} / 10\ 000 \times 17\ 239 \approx 100\ V$$

从伏安特性曲线可以看出,此时 CVT 中压互感器铁心将严重饱和,励磁电抗将显著下降,CVT 等效电路图 4 中就不能忽略励磁支路,此时的等值电

路对应为图 6。图 6 中忽略了电感元件的有效电阻,因其值很小,与铁磁谐振的产生无关;增加了中压互感器的励磁分支, X<sub>m</sub> 为励磁电抗。

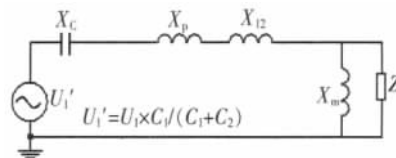


图6 电容式电压互感器谐振等值电路

正常运行时,由于 (X<sub>p</sub>+X<sub>12</sub>) 与 X<sub>c</sub> 很接近,此时 CVT 中压互感器的铁心也处于线性工作区,励磁阻抗很大,负荷阻抗也很大,故回路中电流很小。但当系统发生单相接地故障时,系统中产生震荡过电压,使进入 CVT 的一次电压突然升高,这种过电压使中压互感器的铁心迅速饱和,激磁电感显著下降,有可能出现 (X<sub>p</sub>+X<sub>12</sub>+X<sub>m</sub>) 接近 X<sub>c</sub> 的情况,此时负载阻抗远大于 X<sub>m</sub>,所以不起作用。于是等值容抗 X<sub>c</sub> 和电抗 (X<sub>p</sub>+X<sub>12</sub>+X<sub>m</sub>) 满足了串联谐振条件。在 CVT 内部产生铁磁谐振的频带较宽,可能是高频谐振,也可能是分频谐振<sup>[5]</sup>。在谐振状态下,回路中电流和在电容、中压互感器上的电压都将异常增大。为进一步说明熔断器产生过电流,将图 2 中与分压电容 C<sub>2</sub> 并联的部分等效成一电感 L',电阻通常很小可以忽略。电路见图 7。

图 7 中回路等值电抗为

$$X = (-\frac{1}{\omega C_1} + \frac{\omega L'}{1 - \omega^2 L' C_2})j$$

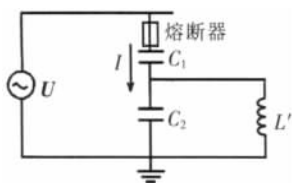


图7 熔断器产生过流电路

正常运行状态下励磁电抗和负载都很大,即  $X_L'$  很大,回路总电抗近似为  $(X_{C_1} + X_{C_2})$ ,当中压互感器铁心饱和时,励磁电抗  $X_m$  显著下降,相应的等值电感  $L'$  也要减小,当  $L' = 1/[\omega^2(C_1 + C_2)]$  时将产生谐振,有可能出现某一分次谐波的振荡,常见的是  $1/3$  次谐波振荡,此时电抗为零,回路电流最大。由于电网不断供给能量,回路中若没有适当阻尼,将会产生持续的分次谐波铁磁谐振,其过电压幅值可达额定电压的  $2 \sim 3$  倍<sup>[5]</sup>。 $L'$  离该值越近,等效阻抗越小,流过滤断器的电流  $I$  值越大,当熔断器电流长时间高于其额定电流时,熔断器就会熔断。

因此,在 CVT 产品设计制造时应改善 CVT 中压互感器的励磁特性,尽可能降低中压互感器铁芯的磁通密度,提高中压互感器的磁饱和点,选择伏安特性优越的中压互感器。为避免设备事故发生,仍需采取消除谐振的措施。从等值电路图 6 来看,最容易实现的方法是在 CVT 中压互感器的二次侧剩余绕组并联低值阻尼电阻。由于阻尼电阻与励磁电抗并联,且相对于励磁电抗很小,并联回路中阻尼电阻起主要作用,从而改变了电路结构,破坏了谐振条件,能有效阻尼、抑制或消除铁磁谐振的发生<sup>[6]</sup>。且中压互感器伏安特性曲线拐点应高于 CVT 二次侧阻尼器伏安特性曲线的拐点,避免在过电压下,中压互感器先于阻尼器饱和形成谐振条件,失去了阻尼器的阻尼作用<sup>[6]</sup>。

对于 35 kV 电容式电压互感器,由于电容分压器的高压电容  $C_1$  很小,相应的容抗很大,从而限制了短路电流的增加,避免了 35 kV 输电系统发生相对地短路事故。因此在 35 kV CVT 现行的电气设计安装中有逐步取消在一次侧串接高压熔断器的趋势。然而,为了避免由于 CVT 自身激发铁磁谐振而导致设备损坏事故的发生,从保护 CVT 设备本身的角度出发,仍应在一次侧加装高压熔断器。

### 3 结语

(1) 由于 CVT 中压互感器在系统过渡过程中铁心深度饱和,励磁电感显著下降并激发铁磁谐振产生过电流导致高压熔断器熔断。

(2) 在 CVT 中压互感器二次剩余绕组并联阻尼器是抑制铁磁谐振的有效措施。在产品制造时,应着力改善 CVT 中压互感器的空载励磁特性,选择伏安特性优越的中压互感器。

(3) 为了避免由于 CVT 铁磁谐振而导致设备损坏事故的发生,从保护 CVT 设备本身的角度出发,应当在一次侧加装高压熔断器。

### 参考文献:

- [1] GB/T 4703-1984. 电容式电压互感器[S].
- [2] 刘晓辉, 应肖磊. 电容式电压互感器二次电压异常的分析及改进建议[J]. 浙江电力, 2004(4): 74-76.
- [3] 穆淑云. 电容式电压互感器暂态性能的仿真计算[J]. 电力电容器, 2001(1): 8-13.
- [4] 周小梅, 杨以涵. 配电网 PT 高压熔断器熔断的原因分析[J]. 现代电力, 2007(4): 34-37.
- [5] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 夏长根. 一起 35 电容式电压互感器爆保险分析[J]. 电力电容器, 2006(3): 32-35.

(上接第 108 页)

2006, 26(19): 151-155.

- [30] 王可健, 王其平. 分断电弧对触头材料侵蚀的研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 22(3): 99-106.
- [31] 吴细秀, 李震彪. 电极材料喷溅侵蚀模型评述[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 38-41.
- [32] 吴细秀, 狄美华, 李震彪, 等. 电触头侵蚀研究概述[J]. 低压电器, 2003(5): 6-10.
- [33] SAWA K. Recent Research and New Trends of Electrical Contacts[J]. IEICE Trans. Electrode, 2000, 10(9): 1 363-1 376.
- [34] Mc BRIDE J W. The Volumetric Erosion of Electrical Contacts[J]. IEEE Trans. on Packaging Technology, 2000, 23(2): 211-221.
- [35] 李占军, 孙乐民, 张永振. 载流摩擦磨损研究现状及前景[J]. 铁道运输与经济, 2005, 27(1): 82-84.
- [36] 李 鹏, 张永振, 孙乐民. 受电摩擦磨损的研究现状[J]. 河

南科技大学学报, 2002, 23(4): 34-37.

- [37] 马行驰, 何国求, 陈成澍, 等. 现代轨道交通摩擦集电材料及相关载流摩擦磨损研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 63-65.
- [38] 郜建新, 宋克兴, 田保红, 等. 载流条件下  $Al_2O_3/Cu$  复合材料的摩擦磨损特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(1): 14-15.
- [39] KUBO S, KATO K. Effect of Arc Discharge on Wear Rate of Cu-impregnated Carbon Strip in Unlubricated Sliding Against Cu Trolley under Electric Current[J]. Wear, 1998(216): 172.
- [40] 贾淑果, 郑茂盛, 刘 平, 等. 在加载电流作用下 Cr 对 Cu-Ag 合金磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(5): 484.