

简化的 CVT 暂态模拟

水电部南京自动化研究所 管柏龄

提 要

由于电容式电压互感器(以下简称CVT)的暂态过程,可能导致快速保护超范围动作或者拒动,特别是短线尤为严重。因此,研究在系统故障时,CVT的过渡过程以及这种过渡过程对继电保护的影响显得十分必要。本文阐述了“简化的CVT暂态模拟”的等效电路、参数的选择、暂态波形以及对零序电抗继电器的考核试验等等。经过多年来的反复试验表明,这种模拟方法简单易行,可作为科研及生产上考核CVT暂态特性对继电保护动作行为影响的一种试验手段。

一、概 述

电容式电压互感器在我国已经广泛应用于110kV~500kV高压电力系统中,在国外也普遍采用,其原因是它比电磁式电压互感器(以下简称为P、T)有一定的优越性:主要表现在经济上价格低,而且随电压等级越高这个优点越明显。另外,CVT可兼作通讯和高频保护用的耦合电容。此外,CVT为油密封瓷套式,绝缘可靠性高。但是,CVT的分压电容器的贮能及其释能的时间常数大,使CVT的次级电压不能迅速真实地跟随初级电压的变化,这是它的一个很突出的缺点。过去对于低速保护CVT的暂态特性的有害性不突出,而对于高速保护CVT的暂态过程就可能引起保护超范围动作或者拒动。为了研究CVT的过渡过程以及这种过渡过程对继电保护的影响,首先要进行CVT的模拟。在几年以前我们所已经在这方面做了不少工作,并在静(动)模上建立了CVT模拟来考核继电保护。早在1981年我们在研制集成电路距离保护时,研制工作总是从单元件着手,试验是在单相低电压下进行的。为了考核CVT暂态过程对测量元件

No.4, April 1969, P388-399.

3. L.V.Beley: "Travelling wave on Transmission System." John wiley Press, and edition, 1951.

4. L.M.Wedepohl: "Multiconductor Transmission Lines.Theory of Natural Modes and Fourier Integral Applied to Transient Analysis." Proc.IEE, Vol.116, No.9, Sept.1969, P1553-1563.

的影响,就希望能在普通试验台上模拟CVT过渡过程,并与电磁P.T进行对比试验。为此,我们在这方面作了一些尝试,经过这些年来反复试验表明,这种模拟方法简单易行,可作为科研及生产上考核CVT暂态过程对继保护动作行为影响的一种试验手段。

二、电容式电压互感器的电路及其等效电路

电容式电压互感器的基本电路如图1所示。

CVT的等效电路如图2所示。

C_1 和 C_2 代表电容式分压器。 L 为串联电感。 T 为电磁式电压互感器。 Z_L 为负载阻抗。 u_1 为一次电压。 u_2 为二次电压。

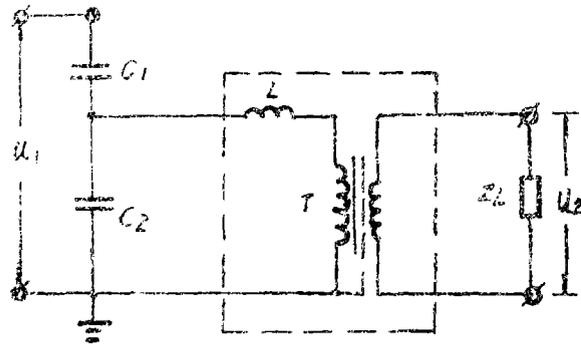


图 1

- C_1, C_2 为电容式分压器。
- R_T 为互感器电阻。
- L_T 为互感器漏感。
- R_M 为互感器铁损电阻。
- L_M 为互感器励磁电感。
- Z_L 为负载阻抗。
- u_1, u_2 为互感器初、次级电压。

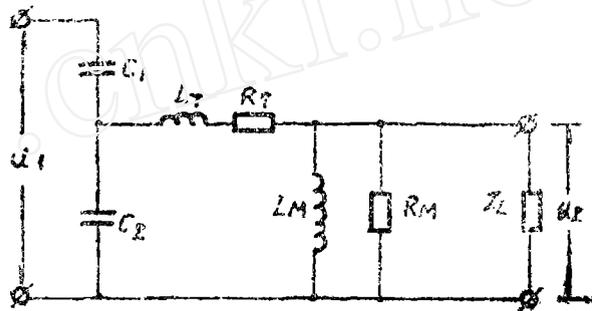


图 2

如果假设一次电压的电源阻抗为零,那么电容式分压器可以用戴维南(Thevenin)等效电路来代替。

根据戴维南定理,图2的等效电路可以进一步简化为图3的等效电路。

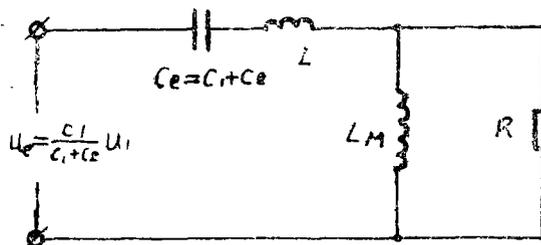


图 3

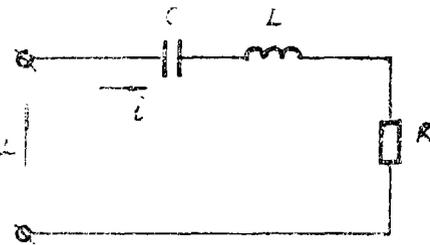


图 4

而CVT短路时的等效电路又可以简化为图4等效电路(忽略励磁支路):这是一个R、L、C串联电路,电路中的电压方程式为:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = u$$

若以 u_c 为因变量, 以 $i = C \frac{du_c}{dt}$ 代入上式

$$\text{则得: } LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u$$

这个微分方程式的特征方程式为:

$$LCP^2 + RCP + 1 = 0$$

$$\text{其根为: } P = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

$$\text{式中: 衰减系数: } \delta = \frac{R}{2L}$$

$$\text{振荡角频率为: } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

当 $R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为临界阻尼振荡。

$R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为过阻尼振荡。

$R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为欠阻尼振荡。

$$\therefore P = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j \omega'$$

\therefore 自由分量的自由振荡角频率:

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

在图 3 的等效电路中, L_M 和 R 在不同角频率 ω' 下的并联阻抗为:

$$\begin{aligned} \frac{R \cdot j \omega' L_M}{R + j \omega' L_M} &= \frac{R \cdot j \omega' L_M (R - j \omega' L_M)}{(R + j \omega' L_M)(R - j \omega' L_M)} \\ &= \frac{R \omega' L_M (\omega' L_M + jR)}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} \\ &= \frac{R \omega'^2 L_M^2}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} + j \frac{R^2 \omega' L_M}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} \\ &= R \omega' L_M \left(\frac{\omega' L_M}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} + j \frac{R}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} \right) \\ &= \frac{R \omega' L_M}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} (\omega' L_M + jR) \end{aligned}$$

因此, 它的等效串联电阻 R_e 、感抗 X_e 和电感 L_e 分别为:

$$R_e = \frac{R \omega' L_M}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} \cdot \omega' L_M = \frac{R}{1 + \frac{R^2}{\omega'^2 L_M^2}}$$

$$X_e = \frac{R \omega' L_M}{R^2 + \omega'^2 L_M^2} \cdot jR = j \frac{\omega' L_M}{1 + \frac{\omega'^2 L_M^2}{R^2}}$$

$$L_e = \frac{L_M}{1 + \frac{\omega'^2 L_M^2}{R^2}}$$

等效串联电路的自由振荡角频率为：

$$\omega'_F = \sqrt{\frac{1}{C \left(L + \frac{L_M}{1 + \frac{\omega'^2 L_M^2}{R^2}} \right) + 4 \left(\frac{L_M}{1 + \frac{\omega'^2 L_M^2}{R^2}} + L \right)^2 \left(\frac{R}{1 + \frac{\omega'^2 L_M^2}{R^2}} \right)^2}}$$

由此可见，取不同的R和L_M可使电路为过阻尼或欠阻尼振荡，从而得到不同的暂态波形。

三、CVT模拟电路的参数选择

由于继电保护装置很复杂，品种繁多，要寻求出保证继电保护在所有情况下都能正确工作的办法是不可能的。我们根据IEC对CVT暂态性的要求：

- 1) 短路1周波(20ms)后，暂态值小于短路前峰值的10%。
- 2) 自由振荡频率 $f' = 15 \sim 20\text{Hz}$ 。
- 3) 暂态第一个波的极值不得大于稳态峰值的20%~25%。

来选择模拟电路的参数。

1、等值电容的选取：

电容直接下式估算：

$$C \leq \frac{I_T}{0.2 u_1 \omega}$$

式中： I_T ——等效电路中额定电流

u_1 ——短路前的电压

ω ——工频下的角频率

$$\because I_T = 55\text{mA}, u_1 = 220\text{V}, \omega = 314$$

$$\therefore C \leq \frac{55 \times 10^{-3}}{0.2 \times 220 \times 314} = 3.98\mu\text{F}$$

故取 $C = 4\mu\text{F}$

2、补偿电抗器的选取：

补偿电抗器L应按L—C串联谐振来选择。

故 $X_L = j800\Omega$

$$L = \frac{800}{314} = 2.548\text{亨}$$

3、等效电阻R和电感 X_M 的选取:

经反复试验推荐的参数为:

$$R = 11k\Omega$$

$$X_M = j10k\Omega \quad (L_M = \frac{10^4}{314} = 31.847 \text{亨})$$

$$\begin{aligned} R//X_M &= \frac{11k \cdot j10k}{11k + j10k} \\ &= 7.397k\Omega / 42.27^\circ \end{aligned}$$

为了便于调节, X_M 采用自耦式。

CVT模拟电路的参数见图5。

计算时先假定几个不同的自由振荡频率 f' 值, 根据 $\omega' = 2\pi f'$ 求得相应的各 ω' 值, 并绘出

$\omega' = F(f')$ 的关系曲线。

再根据 ω_p' 的计算公式, 求得相应的各 ω_p' 值, 并绘出 $\omega_p' = F(f')$ 的关系曲线。

根据上面参数的计算结果见下表1: 绘成的关系曲线见图6所示。

$\omega' = F(f')$ 与 $\omega_p' = F(f')$ 曲线的交点, 即 $\omega' = \omega_p'$ 时对应的 f' 为实际自由振荡频率: $f_p' = 13.75\text{Hz}$

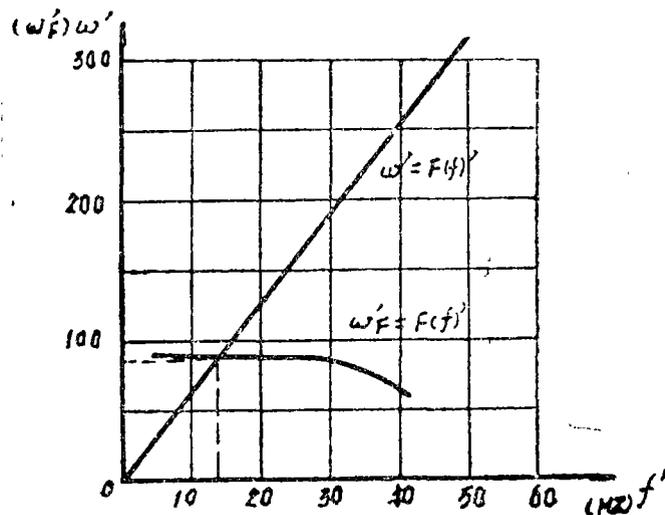


图 6

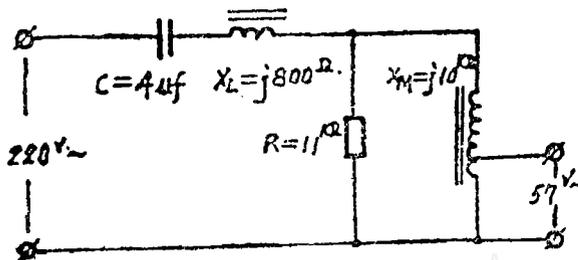


图 5

表 1

f' (Hz)	ω'	ω_p'
40	251.2	63.76
30	188.4	88.48
20	125.6	87.81
13.75	86.35	87.105
10	62.8	86.387
5	31.4	85.57

$$\text{衰减系数: } \delta = \frac{R_e}{2L_e}$$

$$= \frac{1392.4}{2 \times 32.52} = 21.41$$

$$\text{时间常数: } \tau = \frac{1}{\delta}$$

$$= \frac{1}{21.41} = 0.0467\text{s}$$

CVT模拟电路过渡过程的录波图见图7。

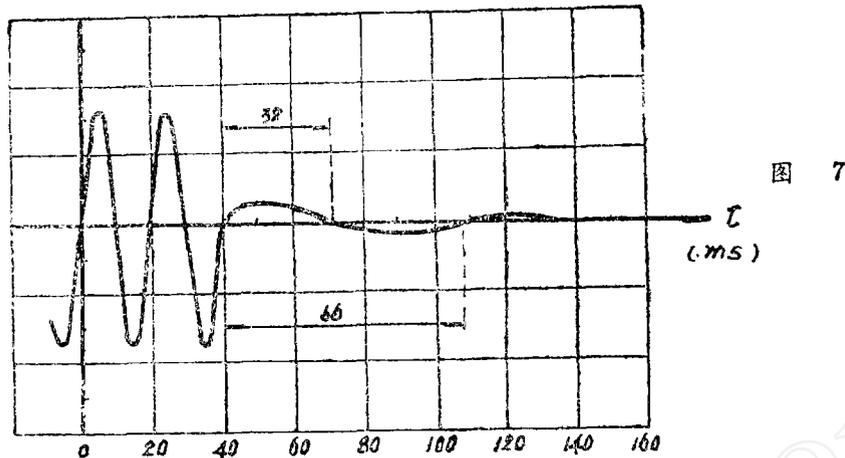
从图7中可以看出:

1) 短路20ms后的暂态值为

短路前峰值的8.9%, 小于10%。

2) 自由振荡频率 $f_p' = \frac{1000}{66} = 15.15\text{Hz}$

- 3) 暂态第一个波的极值为稳态峰值的16.67%，不大于峰值的20%~25%。
 4) CVT过渡过程为欠阻尼低频振荡型。



由此可见,简化的CVT暂态模拟的过渡过程,完全符合IEC标准和我国暂行标准。

四、零序电抗继电器在简化的CVT模拟上的试验

1、CVT与P、T的切换:

为了便于进行CVT与P、T的对比试验,可以利用一只双刀双掷开关,按照图8接线。

图8中与前面所不同的是用双卷中间变压器 T_M 来代替自耦变压器。 T_M 与P、T的变比,根据所需要的二次电压 u_2 与 u_1 来确定。需将CVT和P、T稳态二次电压的大小调成一样。

2、考核继电器的试验:

试验接线图见图9。图中:线路模拟阻抗角 $\varphi = 85^\circ$ 。

暂态直流量分量的时间常数 $T = 100\text{ms}$ 。

零序电抗继电器在CVT和P、T的对比试验结果见下表

2。

(下转66页)

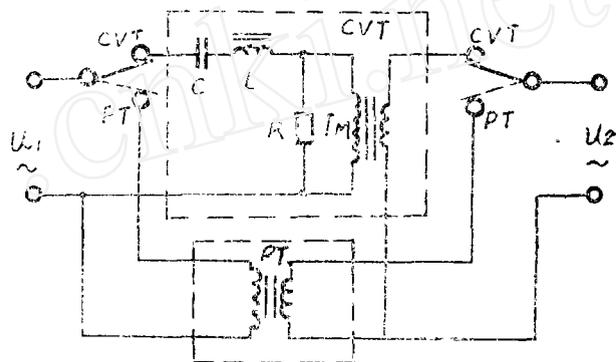


图 8

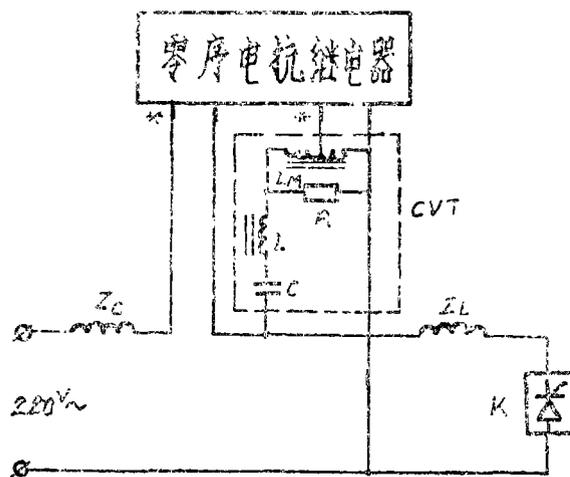


图 9 Z_C —系统阻抗 Z_L —线路正序阻抗
 K—合闸角控制器。*—电流和电压的同极性端

从(5)、(6)式可看出和系统与线路阻抗比有关,系统愈小则要求线路愈长,与系统大、小方式阻抗差别有关,大、小方式阻抗差别大则要求线路愈长。设 $Z_{s1} = Z'_{s1}$,则 $Z_L \geq 0.43Z_{s1}$ ($Z_L \geq 1.43 - \frac{Z_{s2}}{Z'_{s1}}$),而 Z_{s1} 与 Z'_{s1} 总有差别,一般相差不大。根据我们系统情况一般 $Z'_{s1} \approx 1.05 \sim 1.3$,则对单回路 $Z_L \geq 0.86Z_{s1}$,双回路 $Z_L \geq 1.6Z_{s1}$ 加装相电流速断才有意义。

我们按 $Z_L \geq 1.43 - \frac{Z_{s2}}{Z'_{s1}}$ 和 $Z_L \geq 1.43 - \frac{Z_{s2}}{Z'_{s1}} Z'_{s1} = 1.3Z_{s1}$, $Z_{s1} = 0.5$ (基准容量1000MVA)估算单回线要57公里,双回线要105公里长装设相电流速断才有意义。

五、结 束 语

相电流速断简单可靠、维护调试方便,易整定,可快速切除出口三相严重故障,对提高系稳定水平有一定作用。但是它的应用范围有一定限制,对系统大、小方式和线路长度均有一定要求。在大电源出线的中长线路上装设相电流速断很有必要与可能,将它装设在短线上是不合适的,应当采用电流突变量保护。

参 考 文 献

- (1) 高压电网继电保护运行技术。王梅义等著 电力工业出版社 1981年。
- (2) 电力系统继电保护。山东工学院、山东省电力局编。1977年。
- (3) 电力系统继电保护。许敬贤、张道民著 中国工业出版社 1963年。

(上接20页)

表 2

故 障 点		短路合闸角	CVT	PT
正 方 向 区内 $0.8Z_y$		电压 0°	24ms动作	11.5ms动作
正方向	$1.03Z_y$	电压 0°	暂态超越	暂态超越
区 外	$1.25Z_y$	电压 0°	态暂超越	不超越

从表2的结果,我们可以看出:

- 1) 正方向区内故障,CVT会造成继电保护延时动作。
- 2) 正方向区外故障,CVT会造成继电保护暂态超越。

这个试验结果与在静(动)模上CVT模拟的试验结果是一致的。

五、小 结

这种简化的CVT暂态模拟,通过解析和实际使用表明是科研和生产行之有效的试验手段。近年来英国通用电气公司(GEC)以及瑞士、澳大利亚等国家,都对CVT的特性提出了不少改进方案。因此,对CVT过渡过程的研究、模拟和CVT过渡过程对继电保护动态影响的试验方法的研究,今后还有待于我们继电保护和电容式电压互感器制造厂之间紧密合作,共同研究。