

关于保护用电流互感器二次电缆截面的选择问题

河南电力设计院 白志敏

内容提要: 本文通过理论分析, 阐明在选择电流互感器(以下简称C、T)二次电缆截面时, 我国目前应用的10%误差曲线法和国外某些国家应用的伏安曲线法的区别和内在联系, 进而提出对10%误差曲线法的修正。

一、选择方法简介

近几年来, 随着电力系统容量的增大, 变电站规模的扩大, 相应的二次控制电缆很长, 而且C、T二次负载并没有明显降低(晶体管保护除外), 从而使得二次电缆截面相应增大, 甚至大到难以选择的地步。为此, 有些单位进行了大量的工作, 并提出有益的改进措施, 有些单位提出采用伏安曲线法以代替我国惯用的10%误差曲线法来选择电缆截面, 二者有何异同呢? 分析如下:

1、10%误差曲线的作法及其应用

10%误差曲线是制造厂家根据C、T特性参数(铁芯截面、磁路长度、铁芯材料、二次绕组匝数、导线电阻等)按10%的误差要求求得的一次电流倍数和允许负载欧姆数(或伏安数)的关系曲线, 一般按下述步骤作出:

1) 给出某个一次电流倍数(K)。

2) 由一次额定安匝数(AW_{1n}), 并按10%误差求得激磁安匝($AW_0 = \frac{AW_{1n}}{10}$)。

全抵消差动线圈 W_{cd} 的磁势, 是假定 W_{ph1} 、 W_{ph2} 的实际整定匝数完全等于由式(1)、式(2)计算出的匝数而言的。实际上, W_{ph1} 、 W_{ph2} 实际整定的匝数不可能完全等于计算匝数, 二者只能近似, 由此所出现的误差将在差动保护起动电流的整定计算中予以考虑, 这不属于本文论述的内容, 故略去。

4、差动保护范围内部任意短路

见图-7, I_{2d} 由正极性流进 W_{ph1} , I_{3d} 由正极性流进 W_{ph2} , $I_{1d} + I_{2d} + I_{3d}$ 由正极性流进 W_{cd} , 又 W_{ph1} 、 W_{ph2} 、 W_{cd} 三组线圈都在速饱和变流器的中间铁芯柱上, 它们的磁势相加使继电器动作。故保护范围内部短路时, 动作总磁势为:

$$\sum WI = W_{cd}(I_{1d} + I_{2d} + I_{3d}) + W_{ph1}I_{2d} + W_{ph2}I_{3d} \quad (6)$$

保护范围内部短路时, BCH-2差动继电器动作的灵敏度 K_{Lm} 为:

$$K_{Lm} = \frac{\sum WI}{[WI]_{gd}} = \frac{\sum WI}{60 \text{安匝}}$$

- 3) 根据铁芯磁路长度求得单位长度的激磁安匝 (A_0/L)
- 4) 查相应铁芯材料的磁化曲线, 求得磁密 B_{max} 。
- 5) 根据铁芯截面和额定二次安匝, 求得对应于 B_{max} 的二次感应电压 E_2 。
- 6) 由已给定的一次电流倍数和二次电流, 求得允许的二次负担阻抗 ($Z_{2\Sigma}$)。
- 7) 从 $Z_{2\Sigma}$ 中减去CT二次线圈阻抗, 即得到对应于所给一次电流倍数 K , 且满足10%误差要求的允许负载阻抗值。

依次给定一系列 K 值, 即可求得相应的一系列 Z_2 值, 最后在复平面上, 作出曲线 $K = f(Z_2)$, 即为10%误差曲线。

用户部门在确定CT的允许负载阻抗时, 首先由流过CT的最大短路电流, 并乘以可靠系数, 得到一次电流倍数, 根据此倍数, 在10%误差曲线上求得允许的二次负载阻抗, 再减去保护装置的负载, 即得允许的连线阻抗, 由此连线阻抗即可求得连线的截面。上述可靠系数的选取, 由不同的保护类型决定, 通常对于差动、距离工段等瞬动保护, 取1.3~1.5, 对其他类型保护通常取1.1。

2、伏安特性曲线法

这种方法的依据是CT的伏安特性曲线, 其步骤大致如下: 根据已知的二次负载阻抗和电缆长度初选电缆截面, 并由已知的通过CT的短路电流按式 $U_2 = I_2 \Sigma R$ 求得CT的二次电压, 再由伏安特性, 查得对应于短路情况下, CT二次电压 U_2 的激磁电流 I_0 , 若误差 $\varepsilon = \frac{1.5I_0}{I_{d2}} \times 100\% < 1\%$, 则所选之电缆截面满足要求, 否则, 加大截面重复上述计算。

3、两种方法的差异

不难看出, “10%误差曲线”法的误差取10%, 对瞬动保护计及1.5倍左右的非周期分量的影响。“伏安曲线”法的误差取1%, 不计非周期分量的影响, 但激磁电流 I_0 取1.5倍的可靠系数。

显然, 由于CT激磁特性的非线性导致了这两种方法产生不同的计算结果。

在伏安特性的直线段, 计及非周期分量影响的1.5倍可靠系数与激磁电流乘以1.5倍可靠系数是等效的, 至于误差取10%和1%所导致的差别是很微小的。举例如下:

设通过220kVCT的短路电流为10kA (约4000MVA), 负载电阻为 1Ω , 导线长度为 $L = 200m$, CT (LCLWD₃-220型) 变比 $n_L = 1200/5A$, 星形连接, CT二次线圈电阻为 0.5Ω 。(忽略接触电阻 $0.05 \sim 0.1\Omega$)

用10%误差曲线法选二次电缆截面:

$$m = \frac{K_R I_{d1}}{I_c} = \frac{1.5 \times 10}{1.0} = 12.5, \text{查曲线得允许二次电阻 } R = 3.5\Omega, \text{故二次电}$$

缆截面为 $S = \frac{0.0175 \times 200}{3.5 - 1} = 1.4mm^2$, 用“伏安特性曲线”法选二次电缆截面:

$$\text{初选 } 1.4mm^2, \text{则 } R_l = 2.5\Omega, I_{d2} = \frac{10000}{240} = 41.7A$$

$$V_2 = 41.7(2.5 + 1.0 + 0.5) = 167V, \text{查伏安特性得 } I_0 = 0.065A$$

$$\text{误差 } \varepsilon = 1.5 \times \frac{0.065}{41.7} \times 100\% = 0.234\% < 1\%$$

可见，结果相同。

而在伏安特性曲线的非直线段，情况就大不相同了，由曲线可以看出（图1），计及非周期分量影响的1.5倍（ V_2 扩大1.5倍）和激磁电流乘以1.5倍差别很大。设在未计及非周期分量情况下，求得二次电压为 V_{2d} ，

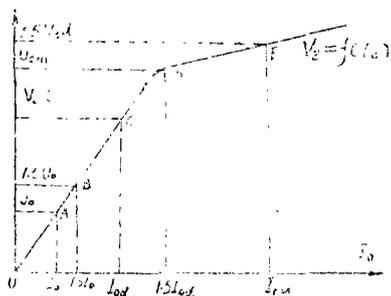


图 1

对应激磁电流为 I_{0d} ，显然由于伏安特性的非线性， $1.5V_{2d}$ 所对应的 I_{0m} 远大于 $1.5I_{0d}$ 。为了保证所要求的误差范围，所允许的CT二次负载必须降低。这就是两种方法所产生结果悬殊的根本原因。举例说明：

设通过CT的短路电流为 20kA，（约8000MVA），其他条件同前例

用“10%误差曲线”法选电缆截面：

$$m = \frac{20 \times 20}{1.2} = 25, \text{ 查曲线得允许的二次负载电阻为 } R = 1.45\Omega, \text{ 故电缆截面}$$

$$S = \frac{0.0175 \times 200}{1.45 - 1.0} = 7.8 \text{ mm}^2,$$

用伏安特性曲线法选电缆截面：

$$\text{初选 } 2.5 \text{ mm}^2, \text{ 则 } R_1 = \frac{0.0175 \times 200}{2.5} = 1.4\Omega, I_{d2} = \frac{20000}{240} = 83.3 \text{ A}$$

$$V_2 = 83.3(1.4 + 1.0 + 0.5) = 241.6 \text{ V}, \text{ 查伏安特性曲线得 } I_0 = 0.15 \text{ A}$$

$$\text{误差 } \varepsilon = 1.5 \times \frac{0.15}{83.3} \times 100\% = 0.27\% < 1\%$$

这就是说，计及非周期分量影响后，将比不计及非周期分量影响的电缆截面增大2倍。事实上，计及非周期分量的影响，采用“伏安特性曲线”法计算，也会得出相近的结果。上例中，计及非周期分量影响后， $V_2 = 1.5 \times 241.6 = 362.4 \text{ V}$ ，查曲线得 $I_0 > 10 \text{ A}$ ，误差 ε 即使不考虑1.5倍的可靠系数，也要大于1%， $\varepsilon = \frac{10}{83.3} \times 100\% = 12\%$ 。

$$\text{选 } 8 \text{ mm}^2, \text{ 得 } R_1 = 0.44\Omega, V_2 = 83.3 \times 1.94 \times 1.5 = 242.4 \text{ V}$$

$$\text{查曲线得 } I_0 = 0.2 \text{ A}, \varepsilon = \frac{0.2}{83.3} \times 100\% = 0.24\% < 1\%, \text{ 满足要求。}$$

同样，不计非周期分量的影响，用“10%误差曲线”法也会得出同“伏安特性曲线”法相近的结果。此时， $m = \frac{20}{1.2} = 16.7$ ，查曲线得允许二次电阻为 $R = 2.35\Omega$ ，故

$$S = \frac{0.0175 \times 200}{2.35 - 1.0} = 2.6 \text{ mm}^2, \text{ (接近 } 2.5 \text{ mm}^2 \text{)}。$$

必须指出,“伏安特性曲线”法,只控制误差数值 $\epsilon < 1\%$,不能反映CT的工作点饱和程度。例如上例中,由 $\epsilon = 1\%$ 得 $I_0 = 0.56\text{A}$,查得 $V_2 = 250\text{V}$,已经相当饱和了。而10%误差曲线一般由最大磁密 B_{max} (约为17000~18000高斯)控制其工作点不致严重和饱。

二、短路电流中的非周期分量

由上述可知,两种方法的根本区别在于是否考虑短路电流中非周期分量的影响。如果不计非周期分量,两种方法是不会有显著差别的。究竟应该怎样考虑非周期分量这一影响因素,下面作一简单的分析。

非周期分量的大小和衰减快慢取决于系统接线、一次设备参数、短路初相角、短路种类、短路地点、CT参数和二次负载等因素。也就是说,非周期分量由系统一次时间常数 T_1 、电流互感器二次时间常数 T_2 和短路初相角 φ 等确定。为简化问题,假定短路初相角 $\varphi = 0$, (即短路瞬间,非周期分量最大),CT二次负载为纯电阻,则一次短路电流和相应的二次短路电流的暂态值分别为:

$$i_1(t) = I'_m (\cos \omega t - e^{-\frac{t}{T_1}}) \dots\dots\dots (1)$$

$$i_2(t) = I'_m \left\{ \cos \omega t + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} \right\} \dots (2)$$

故二次暂态电流非周期分量为:

$$i_{2f}(t) = I'_m \left\{ -\frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

假定CT在暂态过程中不饱和,则 T_2 可取其线性区域内的时间常数,根据河北电力设计院的实测结果,LCLWD₃-220型CT的 T_2 近似为2~4秒。一次系统时间常数 T_1 与系统结构,网络参数,短路情况等因素有关,一般越靠近电源点, T_1 越大。图2表示 $T_2 = 2 \sim 4\text{S}$, $T_1 = 50, 100\text{mS}$ 时,由式(3)求得的 $i_{2f}(t)$ 曲线。

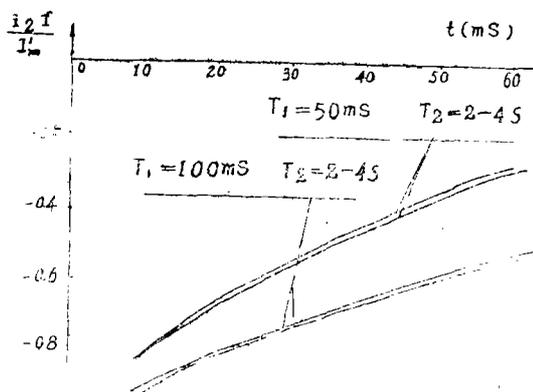


图2

由图可知,在 $t = 40 \sim 60\text{mS}$ 时间内,当 $T_1 = 50\text{mS}$ 时 $i_{2f} \approx (0.3 \sim 0.4) I'_m$,当 $T_1 = 100\text{mS}$ 时, $i_{2f} = (0.5 \sim 0.6) I'_m$ 。但一般情况下,短路不可能发生 $\varphi = 0^\circ$ 时,据国外某些系统的统计资料和论证计算,短路多发生在电压峰值之前 40° 范围内,从而偏移度 $\cos(90^\circ - 40^\circ) = 64\%$,故当 $T_1 = 50\text{mS}$ 时 $i_{2f} = (0.2 \sim 0.3) I'_m$,当 $T_1 = 100\text{mS}$ 时, $i_{2f} = (0.3 \sim 0.4) I'_m$ 。一般,在远离电源点的220kV

变电所内,一次系统时间常数 T_1 不大于50mS,考虑短路弧光电阻等因素,时间常数则更小。在大电源附近,一次系统时间常数可能超过100mS。

显而易见, 往往在远离电源的地方, 短路电流较小, 一次电流倍数较低。即使考虑了一定的非周期分量系数, 也不足以导致过大的二次电缆截面, 而在靠近电源的变电站内, 短路电流的威胁已足够大了, 再考虑较大的非周期分量则更加难以对付。

由此可知, 在按“10%误差曲线”选择CT二次电缆截面时, 考虑1.5倍以上的可靠系数是偏于保守了。而在大电源附近, 即使考虑低于1.5倍的可靠系数可能也无济于事。唯一途径是增大铁芯截面, 提高CT的饱和电压; 或者减小二次电流, 采用1A电流值。

必须指出, 上述分析的前提是在短路过程中CT不饱和, 但在 T_1 、 T_2 较大短路容量较大的地点, CT铁芯饱和的可能性是存在的。此时, 靠增大二次电缆截面的办法已无能为力, 其行之有效的办法仍是增大铁芯截面或减小二次电流值。

通过上述分析可知, 选择CT二次电缆的方法, 不在于是采用“10%误差曲线”, 还是采用“伏安特性曲线”, 而是是否考虑非周期分量的影响, 以前考虑1.5倍的系数偏大, 但完全不考虑显然不妥。建议取1.1~1.3作为计及非周期分量影响的可靠系数。表1中列出了按1.2倍可靠系数算得的220kV整流型线路保护所需的电缆截面(括弧中数据为按1.5倍系数计算的电缆截面)。

表 1

电 缆 长 度 (M)	短路容量 (MVA)			
	4000	6000	8000	10000
100	0.6 (0.7)	0.9 (1.5)	1.8 (2.7)	2.7 (7.5)
200	1.2 (1.4)	1.8 (2.9)	3.6 (5.4)	5.4 (15)
300	1.8 (2.1)	2.8 (4.4)	5.3 (8.1)	8.1 (22)
400	2.3 (2.8)	3.7 (5.7)	7 (11)	11 (30)

注: 计算条件: 1、CT型式: LCLWD₃-220, 变比1200/5A。

2、CT二次负载(包括接触电阻), 20VA。

由上表可知, 当流过C、T的短路电流较小时, 可靠系数的大小对电缆截面的影响不显著, 但当短路容量较大时, 取1.2和1.5倍的可靠系数, 将使电缆截面有明显的差别。

顺便指出, 在包括二次电缆在内的二次负载超过CT的允许负载时, 保护装置也可能正确动作, 因为此时, 可能波形畸变, 误差超过10%, 但其周期分量的比例可能仍然超过保护的整定值。

另外, 在按“伏安特性曲线”选择电缆截面时, 最好校验一下短路情况下的CT二次电压是否超过其饱和电压。

三、增大CT铁芯截面和减小CT二次电流的效益

如上所述, 当一次电流倍数过大或CT负载过大时, 单纯采取增大二次电缆截面的办法并不能达到预期的效果, 而有效的途径是增大铁芯截面或减小二次电流的额定值。

(当然采用增大变比也是可以的)。因为铁芯截面(S)增大,相应地 $u_2 = KB_m \alpha x S$ 升高,也即允许的负载阻抗 $Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$ 增大,相应地允许的二次电缆截面减小了,例如,

铁芯截面增大1倍,则, $\frac{U_2'}{U_2} = 2,$

$$\text{即 } \frac{I_2 Z_2'}{I_2 Z_2} = \frac{Z_f + Z_0 + Z_1'}{Z_f + Z_0 + Z_1} = \frac{Z_f' + Z_1'}{Z_f' + Z_1} = \frac{1 + Z_L'/Z_f'}{1 + Z_L/Z_f} = 2$$

所以: $Z_1' = 2Z_1 + Z_f'$ (式中 Z_f 为负载阻抗, Z_0 为二次线圈阻抗, $Z_f' = Z_f + Z_0$, Z_1 、 Z_1' 分别为铁芯截面增大前后的连线电缆阻抗),也就是说,电缆截面减小到不足原来的几分之一(视负载阻抗而定, $\because Z_1'/Z_1 = 2 + Z_f'/Z_1$)

当二次额定电流减小时,相应地二次电压将升高,二次压降也将成比例减小,故 $\frac{Z_1' + Z_f''}{Z_1 + Z_f'} = \frac{V_2' \cdot I_2}{V_2 \cdot I_2'} = n^2$ (n为二次额定电流的比值),所以, $Z_1' = n^2 Z_1 + n^2 Z_f' - Z_f'' \approx n^2 Z_1$ (Z_f'' 为对应于二次额定电流降低后的负载和CT二次线圈阻抗。另外,电缆连线阻抗并不随二次额定电流的变化而变化,这样,也就增大了CT的负载能力。

顺便指出,满足暂态要求的CT,一般具有较大的铁芯截面和较小的二次额定电流,从而电缆连线的阻抗占负载阻抗的比例极小,所以其截面的选择往往是不成问题的。例如,满足暂态要求的500kVCT,其负载阻抗约为15~20Ω(二次额定电流为1A),二次线圈阻抗约为10~15Ω,而二次电缆连线电阻最大也不超过2~3Ω(2.5mm², 400m长的电缆电阻仅为2.8Ω)。所以,一般对满足暂态要求的CT,其二次电缆截面取2.5~4mm²已是足够的了。

由此可以看出,在大电源附近的变电所内,其电流互感器应取较大的铁芯截面或较小的二次额定电流,不宜盲目采取过分加大二次电缆截面的办法来满足CT的负载要求。当然,减小保护装置的功耗或增加CT的二次线圈数量也可达到同样的效果。

参 考 文 献:

孟庆和 '继电保护用电流互感器的参数测试及其负载的选择计算。 河北电力设计院

我国五十万伏超高压线路成套保护装置通过国家鉴定

“六五”期间国家三十八项重点攻关项目之一、超高压五十万伏线路成套继电保护装置由东北电力设计院、东北电管局、南京自动化研究所、许昌继电器研究所等单位联合研制成功,于十二月三日在南京通过国家级鉴定。

这是大型成套保护装置,其中包括五十万伏线路成套晶体管型保护装置;整流型成套保护装置。从七五年开始调研,制定方案,于一九八二年试制出产品在东北五十万伏超高压电网中投入运行。经过多次人工短路试验,数十次系统操作和多次区内外故障的考验,证明该套装置性能良好,技术指标先进,参加鉴定会的来自全国各地66个单位的专家和工程技术人员一致认为,这套装置的研制成功,为我国超高压输电建设做出了重大贡献,填补了国家空白。鉴定会上向国家建议“七五”期间不再进口国外五十万伏继电保护产品。(谷玉书报导)