

超高压电网中的母线保护用电流互感器

河南省电力勘测设计院 白忠敏

提 要

本文从电流互感器饱和的概念出发,论述超高压电网中母线保护用电流互感器铁芯型式对母线保护装置的影响,提出采用性能优良的母线保护装置的必要性。

一 前 言

随着我国电力工业的迅速发展,系统容量的不断扩大,500KV及以上的大容量超高压电网将逐步建成。在超高压电网中,将遇到许多新问题,本文仅对母线保护用电流互感器进行讨论:即用于母线保护的电流互感器铁芯应该采用什么型式;接于同一个母线的电流互感器能否采用不同型式的铁芯;以及不同型式电流互感器对母线保护有什么影响等。由于水平低,错误难免,敬请阅者指正。

为了简化问题,对电流互感器作如下假设:

1. 忽略电流互感器的激磁损耗和二次漏抗。

2. 电流互感器的激磁曲线用理想的折线表示,即在饱和前激磁电感为常数;在饱和后近似为零。

二 超高压电网中电流互感器的饱和与饱和时间的估算

在超高压电网中由于电压高,系统容量大,输电线路的传输容量大,接于系统的发电机、变压器容量大,从而一次系统的时间常数(T_1)大。例如,我国200~300兆瓦机组的 T_1 约为250~300毫秒,240~360兆伏安双卷变压器的 T_1 约为100毫秒,500KV线路的 T_1 随线径的增大约为50~80毫秒。所以,在靠近电源的500KV变电站内,一次系统时间常数约为80毫秒左右,有时甚至高达100毫秒以上。在这样大的一次时间常数的变电站内,如果发生全偏移性短路故障,其缓慢衰减的直流分量将导致普通闭路型电流互感器的迅速饱和,进而可能引起保护装置的误动、拒动或延迟动作。

在全偏移性短路情况下,欲使电流互感器不饱和,其饱和电压 U_s 必须满足下式要求:

$$U_s \geq K_1 K_r n I_{2n} R_x \dots\dots\dots (1)$$

式中: K_1 —短路电流交直流分量引起的电流互感器的暂态磁密系数
 K_r —剩磁系数
 n —短路电流倍数
 I_{2n} —二次额定电流
 R_x —二次总负载电阻(包括互感器二次线圈电阻)

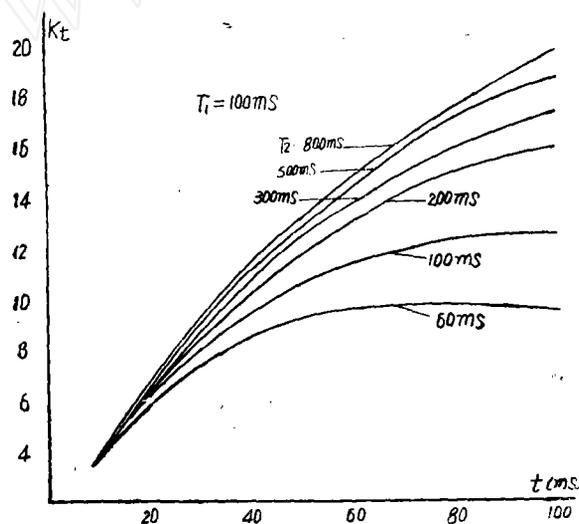
暂态磁密系数可表示为:

$$K_t = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) + 1 \dots\dots\dots (2)$$

式中: T_1 、 T_2 ——分别为一次系统时间常数和电流互感器二次时间常数。
 ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$

对不同的 T_1 、 T_2 和 K_t (由 U_s 、 n 、 I_{2n} 和 R_x 求得)可根据相应的 $K_t = f(t)$ 曲线,查得饱和时间 t_s 。

图一所示为 $T_1 = 100$ 毫秒,不同 T_2 情况下的 $K_t = f(t)$ 曲线。



图一

对闭路铁芯, 由于 $T_2 \gg T_1$, 则:

$$K_t = \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + 1 \dots\dots\dots (3)$$

所以: $\frac{U_s}{n I_{2n} R_x} = \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}} + 1)$

$$t_s = -T_1 \ln \left[1 - \left(\frac{U_s}{n I_{2n} R_x} - 1 \right) \frac{1}{\omega T_1} \right] \dots\dots\dots (4)$$

表一列出了不同类型电流互感器在一次系统时间常数为100毫秒情况下,发生全偏移短路时的饱和时间计算结果。

表 一

铁 芯 型 式	变 比	饱和电压 (伏)	饱和时间 (毫秒)	计 算 条 件
普 通 闭 路	1200/5 ^A	240	30	$n = 5 \quad R_x = 1.5^\circ \quad K_r = 1$
			15	$n = 5 \quad R_x = 1.5^\circ \quad K_r = 2$
			7	$n = 10 \quad R_x = 1.5^\circ \quad K_r = 1$
			2	$n = 20 \quad R_x = 1.5^\circ \quad K_r = 1$
普 通 闭 路	1200/1 ^A	1200	17	$n = 20 \quad R_x = 10^\circ \quad K_r = 1$
暂 态 闭 路 (TPX型)	1000/1 ^A	4000	70	同 上
暂 态 小 气 隙 (TPY型假定 $T_2 = 800^{-s}$)	1000/1 ^A	4000	70	" "
暂 态 大 气 隙 (TPZ型)	1000/1 ^A	4000	∞	" "

比较上表的计算结果可知:在相同短路水平和负载水平情况下,对同类型的铁芯,其饱和时间随饱和电压的升高、二次额定电流的减小和铁芯中相对气隙的增大而增长。但气隙过大,励磁功率越大,误差越大,从而在同样短路电流倍数和输出功率的条件下,铁芯的截面也越大。所以不能片面用加大气隙的办法来降低电流互感器铁芯的磁密系数,而应根据保护的動作速度、误差要求和制造工艺技术全面衡量。

三 对母线保护用电流互感器铁芯的基本要求

我国目前常用的母线保护装置分两类:差电流型和相位比较型,其他新型的母线保护尚在试运或研制阶段,故本文仅以该两类保护作为基础进行讨论。差电流母线保护反应差回路中差电流的绝对值,相比式母线保护反应母线上各元件电流的相位。

一般情况下,在220^{kV}及以下的系统中,母线保护用电流互感器只要满足稳态误差特性一致和额定二次负载的要求,无论是差流型或是相比型均可正确地实现其功能。但在超高压系统中,这个要求就不够了,其原因正如前述,即一次系统时间常数增大、电流互感器铁芯暂态磁密系数升高之故。为了保证在暂态过程中,电流互感器能正确地传变一次故障电流,它必须满足如下要求:

1. 要有足够的短路电流倍数和足够的二次输出容量。

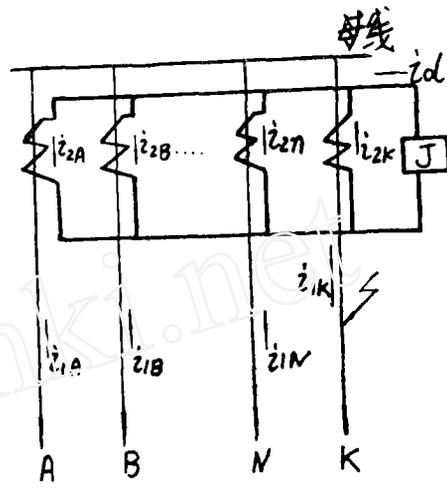
随着系统容量的不断扩大,系统短路容量和变电站的建设规模也相应增大,从而电流互感器的短路电流倍数和二次负载也相应提高,短路电流倍数取决于系统容量、一次结

线方式、短路类型和电流互感器的一次额定电流，而二次负载则取决于短路类型、连接电缆的长短、电缆截面以及负载的大小。应该根据系统的发展远景和变电站的最终规模决定上述参数。

2. 要有良好的暂态特性：

所谓良好的暂态特性，即在暂态过程中能较好地传变一次故障电流。这正是和普通电流互感器的根本区别。下面说明母线保护用电流互感器具有良好暂态特性的必要性。

正如前述，如果电流互感器铁芯不满足暂态特性的要求，即采用仅满足稳态误差要求的普通闭路铁芯，则在直流偏移性短路情况下，就可能饱和，特别在外部短路情况下，故障元件电流互感器可能在几个毫秒内饱和。此时，对差流式母线保护，流经继电器的暂态差电流为（图二）：



图二

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n i_{2i}(t) - i_{2K}(t) \dots\dots (5)$$

式中： $i_{2i}(t)$ —— 第 i 个有源非故障元件的二次暂态电流

n —— 接在同一母线上的有源非故障元件数

$i_{2K}(t)$ —— 故障元件电流互感器的二次暂态电流

根据电流互感器的等值电路和微分方程求得铁芯未饱和情况下，第 i 个元件电流互感器的二次暂态电流为：

$$i_{2i}(t) = I'_{mi} \left\{ -\sin\delta_i \sin(\omega t - \delta_i) + \frac{T_{1i}}{T_{2i} - T_{1i}} e^{-\frac{t}{T_{2i}}} - \frac{T_{2i}}{T_{2i} - T_{1i}} e^{-\frac{t}{T_{1i}}} \right\} \dots\dots (6)$$

式中： I'_{mi} —— 归算至电流互感器二次侧的第 i 个元件短路电流峰值

T_{1i} 、 T_{2i} —— 分别为第 i 个元件的一次系统时间常数和电流互感器的二次时间常数

δ_i —— 第 i 个元件电流互感器的误差角， $\delta_i = tg^{-1} \omega T_{2i}$

对闭路铁芯，由于 $T_2 \gg T_1$ ，则（6）式变为：

$$i_{2i}(t) = I'_{mi} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - e^{-\frac{t}{T_{1i}}} \right] \dots\dots (6)'$$

在铁芯饱和情况下的二次暂态电流为：

$$i_{2i}(t) = I'_{Ki} e^{-\frac{t}{T_{2bi}}} \dots\dots (7)$$

式中： I'_{ki} ——铁芯饱和时的二次电流值
 T_{2i} ——电流互感器铁芯饱和后的二次时间常数
 t ——从铁芯饱和时刻算起的时间

为了简化问题，假定所有元件电流互感器均为闭路铁芯，且所有元件的一次时间常数均取平均值，则暂态差电流可由式(6)'或(7)求得。图三示意图表明：在外部短路，且非故障元件不饱和、故障元件饱和情况下，电流互感器具有不同饱和磁密时， $i_2(t)$ 、 $\phi(t)$ 和 $i_d(t)$ 的变化曲线。

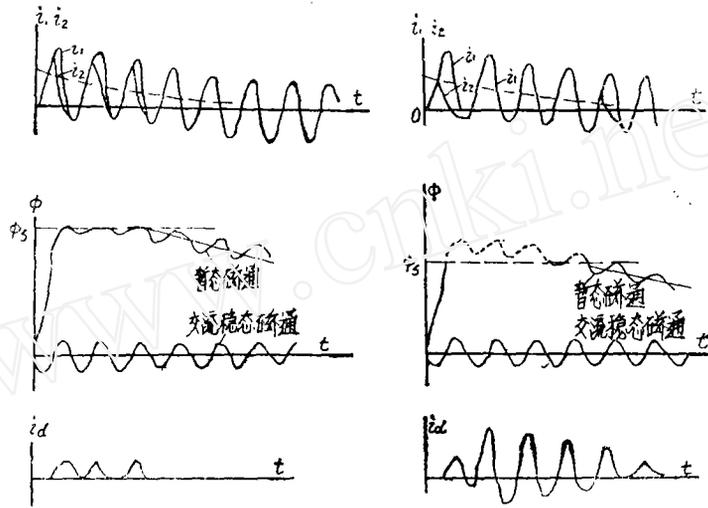


图 三

由示意图可以看出，电流互感器的饱和程度和饱和持续时间随铁芯饱和磁密的降低和一次系统时间常数的增大而增大。

在内部短路情况下，如果某些元件电流互感器铁芯饱和，相应地，其差电流可能很小，甚至可能小到使保护拒动的程度。如表一所示，对于二次电流为 $5A$ 的普通闭路电流互感器铁芯，即使短路倍数小到 5 倍，其饱和时间也不超过 $30ms$ ，考虑了 50% 的剩磁，则不超过 $15ms$ ，从而在保护动作之前 ($30\sim 50ms$) 铁芯已经饱和了。

由此可知，由于铁芯的饱和，内部短路时可能造成保护的拒动（或延迟动作——直流分量衰减之后才动作）；外部短路时，铁芯严重饱和情况下，电流互感器的二次输出接近于零，从而，无论对差流式母线保护或相比式母线保护，都可能导致其误动作。为了满足暂态要求，电流互感器截面就必须足够大，而且随着系统一次时间常数、电流互感器二次时间常数、保护动作时间以及短路电流倍数的增大而增大。如果考虑重合闸后的重复励磁，则截面更大。另外，考虑到一般闭路铁芯的剩磁难以控制，而剩磁往往降低铁芯截面的有效利用，所以宜采用带适当气隙的铁芯。

综上所述，满足短路电流倍数、二次容量和暂态特性要求的电流互感器，就可在严

重的情况下，不失真地传变故障电流，进而保证保护装置的正确动作。

满足暂态要求的电流互感器，按IEC标准，分为三等，即TPX型（闭路铁芯，暂态误差不大于5%，二次时间常数在数秒以上）、TPY型（小气隙铁芯，暂态误差不大于7.5%，二次时间常数约为数百毫秒）和TPZ型（大气隙铁芯，暂态误差不大于10%，二次时间常数接近于60毫秒）。

四 不同暂态铁芯型式对母线保护的影响

上述提到，满足暂态要求的电流互感器其铁芯可以是闭路，也可以是带气隙的，而气隙的大小又可以不同，所以反映在暂态特性上就有差异。下面讨论电流互感器铁芯暂态特性的差异对母线保护的影响。

当电流互感器满足暂态要求时，其铁芯可以认为在短路后、保护动作前是不会饱和的。从而根据式（5）和（6）求得外部短路下的差电流为：

$$i_d(t) = - \left[\sum_{i=1}^n I'_{mi} \sin \delta_i \sin(\omega t - \delta_i) - I'_{mK} \sin \delta_K \sin(\omega t - \delta_K) \right] - \left[\sum_{i=1}^n \frac{I'_{mi} T_{2i}}{T_{2i} - T_{1i}} e^{-\frac{t}{T_{1i}}} - \frac{T_{2K} I'_{mK}}{T_{2K} - T_{1K}} e^{-\frac{t}{T_{1K}}} \right] + \left[\sum_{i=1}^n \frac{T_{1i} I'_{mi}}{T_{2i} - T_{1i}} e^{-\frac{t}{T_{2i}}} - \frac{T_{1K} I'_{mK}}{T_{2K} - T_{1K}} e^{-\frac{t}{T_{2K}}} \right] \dots\dots\dots (8)$$

为了简化问题，假定非故障元件电流互感器为同型铁芯（二次时间常数为 T_{2d} ），所有元件一次时间常数取平均值，则上式变为：

$$i_d(t) = \left(\sum_{i=1}^n I_{mi} \right) \left\{ \left[-\sin \delta_a \sin(\omega t - \delta_a) + \sin \delta_K \sin(\omega t - \delta_K) \right] - \left[\left(\frac{T_{2a}}{T_{2a} - T_1} - \frac{T_{2K}}{T_{2K} - T_1} \right) e^{-\frac{t}{T_1}} \right] + \left[\frac{T_1}{T_{2a} - T_1} e^{-\frac{t}{T_{2a}}} - \frac{T_1}{T_{2K} - T_1} e^{-\frac{t}{T_{2K}}} \right] \right\} \dots\dots\dots (8')$$

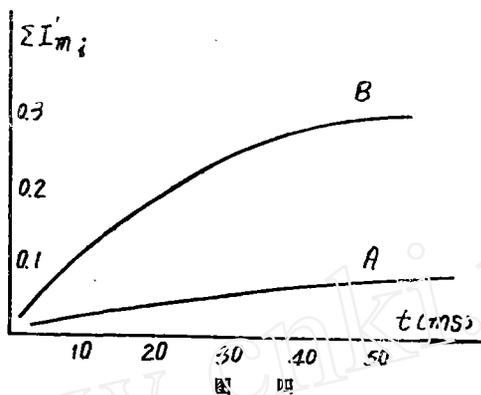
举例说明差电流的大小：

A)故障元件电流互感器为闭路铁芯（TPX型），非故障元件电流互感器为带气隙铁芯（设为TPY型，取 $T_{2a} = 500$ 毫秒），则 $T_{2K} \gg T_1$ ，忽略交流分量，上式变为：

$$i_d(t) \approx - \sum_{i=1}^n I'_{mi} \left[\frac{T_1}{T_{2a} - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_1}{T_{2a} - T_1} e^{-\frac{t}{T_{2a}}} \right] = - \sum_{i=1}^n \frac{T_1}{T_{2a} - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_{2a}}} \right)$$

图四 A即表示 $T_1 = 80$ 毫秒， $T_{2a} = 500$ 毫秒时的 $i_d(t)$ 曲线。

B) 故障元件电流互感器为大气隙铁芯(TPZ型, T_{2k} 取70毫秒), 非故障元件电流互感器为小气隙铁芯(TPY型, T_{2k} 取500毫秒)忽略交流分量, 根据式(8'), 求得 $i_d(t)$ 变化曲线(图四曲线B)。



由上二例曲线可知, 当差流式保护的動作时间在30~50毫秒时, 则在外部短路情况下, 其差电流前者达总短路电流的5~7%, 后者达20%以上。从而, 当短路电流足够大时, 很可能造成差流式保护的误动作。

对相比式母线保护, 只要电流互感器铁芯不飽和, 仅由于其相角误差而不致于导致保护误动作。

此外, 铁芯型式不同, 在短路电流断开后, 残余二次电流的衰减也不同, 閉路铁芯衰减快, 带气隙铁芯衰减慢, 由此引起的二次差电流对差流式母线保护装置也是不利的。

由上述分析可知, 对于一般的差流式或相比式母线保护, 要求其电流互感器必须具有良好的暂态特性, 而且暂态特性要尽量一致。但是, 如果采用性能优良的保护装置, 对电流互感器的要求将大大降低。

保护拒动是由于接在母线上的有源元件电流互感器飽和所致, 而飽和是经过时间 t_s 后才出现的, 如果保护動作时间小于 t_s , 则可避免内部故障时的拒动。从而, 提高保护装置的动作速度是降低对电流互感器要求的有效措施之一。同时, 快速地切除母线故障对系统的动态稳定和设备安全也是极为有利的。此外, 采用良好的制动特性则是防止外部短路误动的有效措施, 也可降低对电流互感器特性要求。

目前, 在超高压变电站中一般采用带气隙的暂态特性铁芯电流互感器, 所以不必担心铁芯的飽和問題, 但由于变电站的分期建设和设备的更換, 暂态特性的不同却是完全可能的。在此情况下, 就要注意母线保护的特性和电流互感器铁芯的暂态特性配合問題, 而如果采用性能良好的母线保护, 则连暂态特性的异同也不必考虑了, 而且进一步提高了保护装置的可靠性。

五、结 论

在超高压电网中，特别是在靠近大电源的枢纽变电站中，由于一次系统时间常数较大，从而在偏移性短路情况下，很容易造成一般的母线保护用电流互感器迅速饱和，进而可能引起普通的动作速度较慢的（为30~50ms）母线保护误动或拒动。为此要求电流互感器铁芯应具有良好的暂态特性，而且暂态特性应尽量一致。如果采用动作迅速、性能良好的母线保护，则可降低对电流互感器暂态特性的要求，而且也可提高系统的稳定性和安全性。

参 考 文 献

1. 天津大学：电力系统继电保护原理。
2. “继电器”1980、2，陈爱钦、李健宗：高压和超高压母线保护的研究。

屏包装试验

为制定包装标准积累了数据 对包装技术的发展作出积极贡献

屏包装试验于一九八二年十一月六日至十一月十五日在许昌继电器厂进行。试验由许昌继电器研究所和一机部标准化所共同主持。对220KV线路保护屏、直流屏、控制屏、继电保护屏五种产品的包装分别作了出口包装、国内包装的六项试验。

在进行起吊、跌落、吊摆冲击、堆垛、公路运输、淋雨六项试验前后，均对五种样品的元件、装置进行了电气性能的测试，并对包装箱的尺寸、外形以及固定方式，缓冲情况作了全面的度量 and 检查，并详细地记录下来，作为对比分析问题的依据。

试验中，每项试验都通过传感器用示波器测绘或显示出来，各种试验的数据通过磁带录放机记录下来后，再经计算机处理，得出一个比较精确的数据，反映包装箱和产品在受到振动力，碰撞力、冲击力等外力影响的各种情况，从而为制定防震包装标准和其他包装标准提出了科学依据。

这次屏包装试验是在我国工业、科学技术蓬勃发展，而产品包装远远落后于这一发展的情况下进行的。国家和各个部门对改进包装设计、选用合适的包装材料、制定接近IEC的包装标准提出了紧迫的要求，包装试验为满足这一要求提供了科学依据，对大型电器产品的包装试验积累了一些经验，为发展包装技术作出了积极的贡献。

（许昌继电器研究所 李瑞贻）