

暂态级电流互感器的测试与评价

随着我国智能电网的快速发展,对电能计量设备的运行质量要求越来越高。因此,如何提升电能计量的准确性、降低测量误差就成为今后电能级联工作的重点。目前,影响电流互感器检测准确度的原因主要是外部磁感应的强度,磁感应强度增加,误差随之增大,严重影响电能计量的结果。鉴于此,主要针对暂态级电流互感器的测试与评价,首先对电磁式电流互感器的工作原理及误差产生的原因进行了简要分析,然后以TPY级电流互感器为例,通过HYVA-405对电流互感器进行了检测与试验,使其在无须任何辅助设备的情况下可以完成互感器的完整励磁特性试验,为电能计量的研究提供了理论依据。

卢欣 陈彬 李常春 杨光/国网天津市电力公司电力科学研究院



卢欣/高级工程师

暂态级电流互感器是保护用电流互感器的一种,主要安装在电压等级极高(如500 kV系统)的线路中,在一次回路发生短路故障时将故障电流传送给继电保护系统的电流变换设备,因为线路在发生短路时,回路中存在直流分量,而相对于5P/10P等级保护用电流互感器,暂态级电流互感器最主要的特性是其能承受一定的直流电流分量而不至于造成磁饱和,并且暂态级电流互感器具有非常低的剩磁系数。

目前我国电力系统对暂态级电流互感器的主要检测方式大多按照5P/10P的试验项目进行监测和评价,具体的试验项目包括励磁特性试验(伏安特性曲线)、校核电压比、极性以及绘制误差曲线,但是对于TPY级的电流互感器这些试验项目并不能实际反应TPY级电流互感器的性能。

本文从暂态级电流互感器的工作原理、国家标准规定、暂态级电流互感器

的失效原因和影响以及检测项目参数意义和评价等方面进行阐述和说明,暂态级电流互感器包括TPX、TPY、TPS和TPZ,其定义和评价项目相近,在我国电力系统中安装的暂态电流互感器基本都是TPY级,因此本文只对TPY级电流互感器进行详细阐述。

暂态级保护用电流互感器工作原理

1. 电磁式电流互感器工作原理

我国标准体系与IEC标准体系基本一致,电力系统中的绝大部分标准和IEC标准中对应的标准号都是等效的,IEC 60044-6是IEC标准中对暂态级电磁式电流互感器的约束与要求,对应国家标准GB 16847,在IEC 60044-6中定义的暂态级保护用电流互感器准确等级有TPX、TPY、TPS和TPZ四种,在我国电力系统500 kV线路中安装的暂态级保护用电流互感器基本都是TPY级。并且在我国500 kV线路中,TPY级电流互感器是强制要求安装的。

所有电磁式电流互感器的原理完全一样,其区别在于保护用电流互感器强调的是承受短路电流的能力,而计量用电流互感器强调的是传递电流的误差大小。电磁式电流互感器的结构如图1所示,二次绕组和一次绕组都绕在同一个闭合的铁心上,一次绕组一般为一匝或数匝,一次绕组的匝数远小于二次绕组的匝数,其匝数比一般情况下等于电流之比。

电流互感器铁心的磁感应强度公式为

$$B = H\mu$$

关键词/Keywords

电流互感器·
暂态特性·
剩磁系数·
励磁特性·

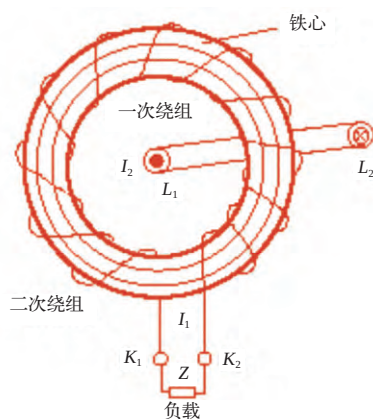
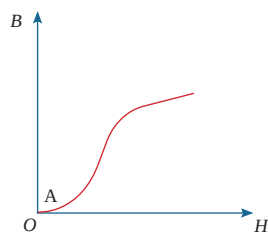


图1 电流互感器的原理

式中， H 为磁场强度，由绕组中的电流 I 和匝数 N 决定； B 为铁心中磁感应强度（不同于磁场强度 H ）； μ 为铁心的磁导率，呈现非线性特性，如图2所示。

图2 $B-H$ 铁心磁化曲线

由于 μ 呈现非线性，因此当铁心中的磁感应强度 B 达到一定的数值时，不再随 H 的增加而增加。

相对于5P/10P以及计量用电流互感器，TPY级电流互感器具有更高的拐点电压（通常都在5 kV以上），并且TPY级电流互感器的铁心一般不是完全封闭式的，有一定的开口间隙，以保证剩磁系数能达到要求。因为TPY级电流互感器的铁心有间隙，所以相对于普通的保护或者计量用电流互感器而言，TPY级电流互感器励磁特性曲线上对应的损耗电流要大得多。

2. 电磁式电流互感器误差产生原因

对于电磁式电流互感器，造成其二次电流 I_2 产生误差的主要原因是铁心励磁损耗电流的存在，铁心励磁损耗主要由铁损和磁滞损耗构成。决定电流互感器损耗的主要因素包括铁心磁感应强度 B 和磁感应强度的频率 f ，而它们所对应的就是电流互感器二次绕组的电动势 E_s 。

当励磁电动势 E_s 的数值和频率确定后，就可以确定互感器的励磁损耗电流 I_f 。因为 B 不可能无限增大，它受制于材料磁导率 μ 的限制， B 达到一定数值后就不再增加，当频率 f 一定时，励磁电动势 E_s 的数值也就存在一个最大值。因此电流互感器二次侧的端电压 V_s 不可能超过最大励磁电动势 E_s 的限制值。

TPY级电流互感器的定义

TPY级电流互感器是500 kV线路中安装使用最广泛的保护用电流互感器，其最重要的参数有对称短路电流系数 K_{ssc} 、暂态面积系数 K_{td} 和剩磁系数 K_r ，这三个参数的详细定义如下。

(1) 对称短路电流系数 K_{ssc}

当线路发生对地短路时，流过电流互感器的对称短路电流有效值除以额定电流有效值所得的倍数即为 K_{ssc} 。对称短路电流是指短路电流中交流电流分量的有效值。

(2) 暂态面积系数 K_{td}

当线路发生对地短路时，流过电流互感器的直流电流分量会在电流互感器铁心中产生磁通量的累积，从而导致互感器达到磁饱和，直流分量的初始值由短路瞬间电流的峰值决定，其衰减时间则由时间常数 T_p 决定，并且对于具有快速重合闸的线路，其断路器工作循环模式（CO或CO-CO）对互感器是否会进入磁饱和也有影响。在线路 K_{ssc} 最大值确定的情况下，通过这些参数计算得到互感器不会进入磁饱和而需要将电流互感器铁心面积增加的倍数即为 K_{td} 。铁心面积增加 K_{td} 倍意味着在匝数不变的情况下，电流互感器的励磁特性曲线拐点会增加 K_{td} 倍。

(3) 剩磁系数 K_r

当电流互感器励磁达到饱和时，励磁电流过零时间点铁心中磁通量占饱和磁通量的比值即为 K_r ，图3为HYVA-405所测量的一个励磁电流周期电流互感器中铁心磁通量随电流变化的曲线，即磁滞回线。在国家标准GB 16847和IEC 60044-6中规定，TPY级保护用电流互感器的剩磁系数不得超过10%，以保证这些互感器有较低的剩余磁

通量。

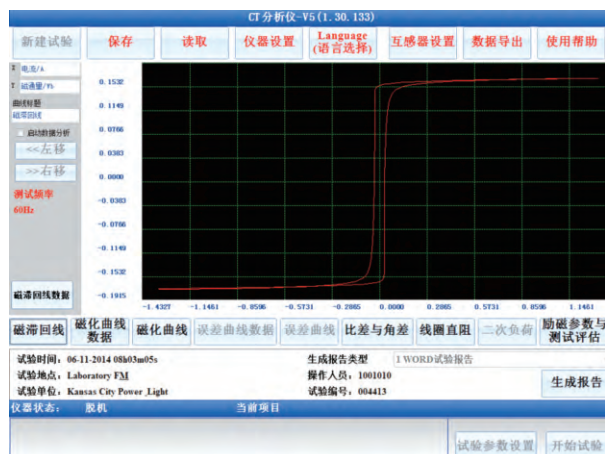


图3 铁心磁滞回线

暂态级电流互感器铭牌标识的 K_{ssc} 和 K_{td} 是一个保证值,其含义是电流互感器可以保证在 $K_{ssc}K_{td}$ 倍的一次短路电流前提下,电流互感器传递的二次电流峰值瞬时误差不超过10%。

TPY级电流互感器失效举例

TPY级保护用电流互感器主要应用于500 kV等超高压线路中,确保在线路发生短路时给继电保护系统传递正确的故障电流,以下以举例形式说明TPY级保护用电流互感器可能发生的失效情况:对于500 kV线路中TPY 30 V·A、 $K_{ssc}=30$ 、 $K_{td}=10$ 以及额定电流4 000/1的电流互感器,二次实际连接的是25 Ω (25 V·A)、功率因数0.8的负载,使用华英电力的HYVA-405 CTPT分析仪实测在 $K_{ssc}=30$ 和额定负载下,电流互感器的暂态面积系数 $K_{td}=7$;在实际工作负载25 V·A和 $K_{ssc}=30$ 时的暂态面积系数 $K_{td}=8.4$ 。

电流互感器铭牌通常标识的是 T_p 、 T_s 、CO循环模式及其时间间隔,通过这些参数可以计算 K_{td} 的数值,在HYVA-405中输入这些铭牌参数可以自动计算获得 K_{td} 的数值。

对于该电流互感器, HYVA-405实测的拐点电压值约为6 300 V,当系统产生30倍的短路电流时,正好在峰值电压处发生短路,则一次电流有效值高达120 000 A,且电流中包含有极高的直流分量,此时在短路电流交流分量和直流分量的

共同作用下,电流互感器铁心的磁通量迅速增加,并越过磁饱和点,电流互感器进入磁饱和而失效。

TPY级电流互感器的测试与评价

1. TPY级电流互感器检测项目要求

按照GB 16847暂态级电流互感器国家标准的要求,对TPY级电流互感器的检测应该保证以下参数和指标达到要求。

1) 在额定负载下铭牌标识 $K_{ssc}K_{td}$ 的数值应该得到保证,即在额定负载和铭牌标识的 K_{ssc} 下,实测的电流互感器 K_{td} 应该大于铭牌标识值。从误差角度来说,要保证在铭牌标识的 $K_{ssc}K_{td}$ 倍一次短路电流情况下,TPY级电流互感器的峰值瞬时误差应小于10%。

2) 实测TPY级电流互感器的剩磁系数 K_r 应小于10%。

3) 额定负载下,额定电流处的比差小于1%,角差小于60'。

4) 实际连接的二次负载必须要小于电流互感器的额定二次负载。

5) 电流互感器的极性标识要正确。

6) 确保实测的75 $^{\circ}\text{C}$ 二次绕组电阻不超过铭牌标识的 R_{dc75} 。

2. TPY级电流互感器测试存在的问题

目前我国电力系统中针对TPY级电流互感器的检测与试验,大多按照普通的5P/10P电流互感器的试验项目进行,包括电流互感器的励磁特性试验(伏安特性试验)、电压比试验、极性试验和误差曲线测量等,其中除了极性和电压比试验有意义之外,其余试验项目的意义不大,对于发现TPY级电流互感器的缺陷并无实际帮助。

在对TPY级电流互感器执行励磁特性试验时,如果使用工频电压来进行试验,则需要非常高的电压和非常大的容量。如对于拐点是15 kV/2 A的TPY级电流互感器,如果在工频下要对其进行励磁特性试验并且做到拐点电压,所需的调压器将会达到现场试验难以接受的体积和重量。通常最高电压只有1 000 V的工频伏安特性测试仪在进行

TPY级电流互感器励磁特性试验时,其最高试验电压可能连拐点电压的10%都达不到。

按照GB 16847或IEC 60044-6标准的要求,针对暂态级的电流互感器,当测量和绘制其励磁特性曲线时,Y轴是励磁电动势有效值,X轴是励磁电流的峰值。通常在实际工作中,很多试验人员直接用二次电压有效值和二次电流有效值的数值来绘制TPY级互感器的励磁特性曲线,这样就可能造成在进行励磁特性曲线对比时产生很大的误差,从而导致错误的结论。

在对一次穿心式的TPY级电流互感器进行电压比试验时,可能还会发生实测TPY级电流互感器的电压比或者比差严重超标的情况,因为TPY级电流互感器的铁心一般不是完全封闭的磁场回路,在开口处有很大的磁通量泄漏,因此如果一次侧的线路未能将这些泄漏的磁通量包含在其闭环回路中,就会导致传递的电压比严重超标。具体试验中表现在如果一次的测试线越靠近开口处,则误差越大,测试线从电流互感器的中心穿过时误差最小,这也是此类互感器安装时必须注意的事项,一次导体必须从互感器的中心穿过,否则互感器的误差就会很大。

3. 使用HYVA-405对TPY级互感器进行测试与评价

在华英电力的HYVA-405 CTPT分析仪中,针对暂态级电流互感器TPX、TPY、TPS和TPZ设定了专门的检测和评价项目,一次试验、一次接线就可以获得暂态级电流互感器额定电流处的比差、角差、励磁曲线、拐点电压、暂态面积系数、75℃电阻和剩磁系数等参数,并且自动将测试结果与标准要求作对比,如果测试所获得的结果超过了标准的要求,则给出互感器检测不合格的结论。

由于电流互感器励磁特性试验的拐点电压数值与电压的频率成正比,所以在进行励磁特性试验时,HYVA-405采用降低试验频率的方式,使被检测电流互感器的拐点电压大大降低,如对于

拐点电压是15 kV/2 A的电流互感器,将试验频率从50 Hz降低到0.5 Hz,则互感器的拐点电压变成150 V,此时仪器所需的容量仅300 V·A,在无须任何辅助设备的情况下,使得HYVA-405可以完成互感器的完整励磁特性试验。

在HYVA-405绘制的励磁特性曲线中,如果选择的标准是暂态级TPY,则仪器绘制的曲线Y轴是励磁电动势,X轴是励磁电流峰值,与标准要求完全一致;如果改变互感器的选择标准,则可以获得互感器的二次电压对二次电流的励磁曲线,并与传统方法所获得励磁特性曲线点作对比。

HYVA-405在记录电流互感器励磁特性曲线时,还会记录每个电流周期中,被检测电流互感器的铁心磁通量随电流的变化关系,即测量电流互感器铁心磁滞回线,并根据磁饱和点的磁滞回线计算被检测电流互感器的剩磁系数 K_r ,如果被检测TPY级互感器的剩磁系数超过10%,仪器会自动给出互感器检测不合格的结论,并以红色文字告示用户被检测互感器不合格的参数项目。

结束语

TPY级电流互感器是目前国内主流的暂态级保护用电流互感器,在所有存在500 kV电压等级的线路中,都有这种等级电流互感器存在,但是针对TPY级的电流互感器检测与测试,很多都是按照普通的5P/10P电流互感器测试项目进行,存在很大安全隐患。由于受制于测试设备的性能,即使对TPY级电流互感器进行测试,其评价方法和评价项目仍存在很多不合理之处。而使用华英电力的HYVA-405 CTPT分析仪可以很好地解决这个问题,仪器完全按照TPY级电流互感器的国家标准要求进行检测,并依据标准要求对被检测TPY级电流互感器进行自动评价。因为测试采用了降低试验频率的方式,使输出电压仅180 V、重量不超过15 kg的HYVA-405可以完成拐点高达45 kV电流互感器的完整励磁特性试验。

(收稿日期:2014-02-12) EA