

保护用电流互感器测试与评价

王兰芳

武汉市华英电力科技有限公司

1 概述

保护用电流互感器是安装在电力系统中用于在一次回路发生短路故障时将故障电流传递给继电保护系统的电流变换设备,因此保护用电流互感器最重要的工作或者说其意义在于电力系统发生短路故障时能正常运行,以保证继电保护系统能检测到故障信息并及时切断故障电流,保护电力系统主设备的安全。同时保护用电流互感器还应该保证在非故障状态下,电流互感器应可靠运行,不能输出错误的故障电流信号而导致继电保护系统误动作。

目前我国电力系统对保护用电流互感器的主要检测项目包括励磁特性试验(伏安特性曲线),校核变比,极性以及绘制误差曲线,但是并没有对这些数据进行更深入的分析,没有考虑互感器二次回路负荷对互感器参数的影响,很多现场试验人员和负责设备检修的专工也不明白对于保护用电流互感器进行这些试验的意义所在。

本文从保护用电流互感器的工作原理,国家标准规定,保护用电流互感器的失效原因及影响,检测项目参数意义及评价等方面进行阐述和说明

2 保护用电流互感器工作原理

2.1 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,IEC60044-1 是 IEC 标准中对电磁式电流互感器的约束与要求,对应我们国家的标准 GB1208,在 IEC60044-1 中定义的保护用电流互感器准确等级有 5P,10P,5PR,10PR 和 PX 五种,在我们国家电力系统中安装的保护用电流互感器中,最常见的准确等级是 5P, 10P 和 PX。

保护用电流互感器和计量用电流互感器的原理是完全一样的,其区别在于保护用电流互感器强调的性能是其承受短路电流的能力,而计量用电流互感器强调的性能是其电流传递的误差大小。所有电磁式电流互感器的结构都如图 1 所示,二次线圈和一次线圈都绕在同一个闭合的铁芯上,一次一般为 1 匝或数匝,一次的匝数远小于二次的匝数,其匝数比一般情况下都等于其电流之比。

电流互感器铁芯的磁感应强度公式是

$$B = H \times u$$

其中 H 是磁场强度,由线圈中的电流 I 和匝数 N 决定

B 是铁芯中磁感应场强度(不同于磁场强度 H),

u 是铁芯的导磁率,呈现非线性特性如图 2 所示

由于 u 呈现非线性因此当铁芯中的磁感应强度 B 达到一定的数值时,不再随 H 的增加而增

加（达到饱和以后磁导率近似于真空磁导率，磁化效应几乎可以忽略），此时互感器的铁芯进入饱和状态。

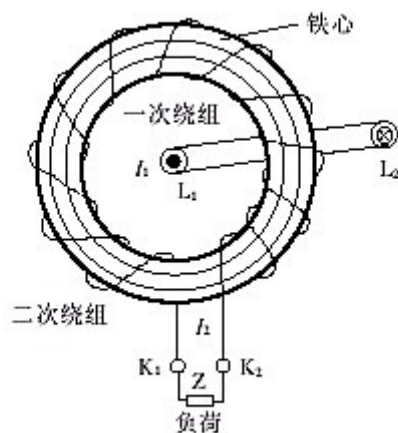


图1 电流互感器的原理图

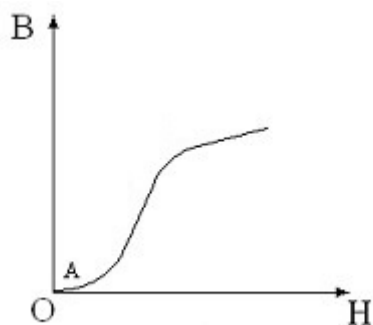


图2 B-H 铁芯磁化曲线

2.2 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_s 产生误差的主要原因是铁芯励磁损耗电流的存在，铁芯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芯磁感应强度 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线圈的电动势 E_s 。

当励磁电动势 E_s 的数值和频率确定以后就可以确定互感器的励磁损耗电流 I_f 。因为 B 不可能无限制增大，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，因此当频率 f 一定时，励磁电动势 E_s 的数值也就存在一个最大值，不可能无限制增加。电流互感器二次侧的端电压 V_s 不可能超过这个最大的励磁电动势 E_s 限制值。

3 5P 与 10P 保护用电流互感器

3.1 5P/10P 电流互感器的定义

5P/10P 电流互感器是电力系统中使用最广泛的保护用电流互感器，其最重要的参数是

准确限制系数 ALF，所有的 5P/10P 电流互感器铭牌精度等级后面都会跟随标注在额定负荷下其准确限制系数 ALF 保证值，并且会标注互感器的额定负荷，例如 5P10 20VA，10P20 30VA 等。这其中 10 就是 5P 这个互感器在 20VA 下的准确限制系数 ALF，20 是 10P 这个互感器在 30VA 下的准确限制系数

铭牌准确限制系数 ALF 的定义是：在额定负荷下，当一次电流不断增大至 I_p ，使二次电流 I_s 的复合误差达到 5%（5P 是 5%，10P 是 10%），此时的一次电流 I_p 比上一次额定电流的 I_{pr} 的倍数即为 ALF。

$$ALF = I_p / I_{pr}$$

其中 I_{pr} 是额定一次电流

I_p 是使二次电流复合误差达到 5%（5P 是 5%，10P 是 10%）时注入的一次电流值

也就是说如果一次流过的电流在额定电流 I_{pr} 的 ALF 倍数以内，电流互感器的传递误差小于 5%（5P 是 5%，10P 是 10%）

3.2 ALF 数值测量方法与评估

在实际的检测过程中，ALF 数值的粗略算法可按照下式进行：

$$ALF = V_{sk} / (|Z_b + R_s| * I_{sr})$$

其中 Z_b 是互感器所连接二次负荷

R_s 是互感器二次线圈内阻

$|Z_b + R_s|$ 是二次负荷和互感器内阻的向量和的模值

I_{sr} 是互感器额定二次电流

V_{sk} 是互感器励磁特性的拐点电动势

注意：拐点电动势不等同于伏安曲线的拐点电压，在伏安特性试验中，拐点电动势等于伏安特性曲线的拐点电压与互感器线圈内阻分压的矢量差

也就是说电流互感器二次电流 I_s 的数值不可能远能大于 $ALF \times I_{sr}$ ，例如假设二次电流达到 1.5 倍 $ALF \times I_{sr}$ ，此时的二次电动势会达到 $1.5 \times ALF \times I_{sr} \times |Z_b + R_s| = 1.5V_{sk}$ ，而这是不可能发生的，因为 V_{sk} 是励磁曲线的拐点，基本接近了互感器的最大励磁饱和电压。因此当一次电流超过 $ALF \times I_{pr}$ 后，二次电流将不会再随一次电流 I_p 的增大而增大，此时电流互感器的铁芯中磁通量已经达到严重饱和，由于磁滞效应的存在，二次电流的输出可能接近于 0。

注意：电流互感器达到饱和以后，铁芯磁通量不再随一次电流 I 的增加而增加，因此此时铁芯中磁通没有变化，根据法拉第电磁感应定律，如果铁芯中没有磁通变化，二次感应电动势就等于 0，因此此时也就没有二次电流输出。而铁芯磁场都存在磁滞效应即磁感应强度 B 变化滞后于一次电流 I 所产生的磁场 H 的变化，因此当一次电流的瞬时值低于导致磁饱和的电流后，铁芯中的磁感应强度仍处于饱和状态，二次依然没有电流输出

3.3 5P/10P 电流互感器失效举例

5P/10P 保护用电流互感器主要用于在系统发生短路时传递正确的故障电流给继电保护系统，以下我们以举例形式说明保护用电流互感器可能发生的失效情况：

1) 例 1 对于 5P20 20VA 额定电流是 2000/1 的电流互感器，二次实际连接的负载是 18

欧（18VA）功率因素 0.8 的负荷，使用华英电力的 HYVA-405 CTPT 分析仪实测的 ALF 值是额定负荷 20VA 下只有 12，实际工作负荷 18VA 下 ALF 是 13.3。

当系统产生 20 倍的短路电流时，一次电流高达 40000A，此时的一次电流已经远远超过了准确限制倍数 13.3，因此当一次电流达到 40000A 时，二次电流的数值不会超过 $13.3 \times I_{sr}$ ，并且因为电流互感器处于严重磁饱和状态，此时会导致电流互感器二次侧根本就没有输出，因而继电保护系统也不会动作

2) 例 2 对于 10P20 30VA 额定电流是 4000/5 的电流互感器，二次实际连接的负载是 1 欧（25VA）功率因素 0.8 的负荷，使用华英电力的 HYVA-405 CTPT 分析仪实测的 ALF 值是额定负荷 30VA 下为 21，实际工作负荷 25VA 下 ALF 是 25。

但是系统设计的短路最大短路电流倍数是 30 倍，也就是说系统可能产生 120000A 的短路电流，因此这种情况属于实际安装的互感器参数并不能达到系统要求，属于系统性缺陷，当系统产生 30 倍的短路电流时互感器将进入饱和而失效

3) 例 3 对于 10P20 30VA 额定电流是 1000/5 的电流互感器安装在 A 相和 C 相，10P15 20VA 额定电流是 1000/5 的电流互感器安装在 B 相，A 相实际连接负荷是 25VA 功率因素 0.8，C 相实际连接负荷是 23VA 功率因素 0.85，B 相实际连接负荷是 26VA 功率因素 0.8，三个保护互感器的输出之和作为零序电流，用来检测系统的零序电流故障，供给继电保护系统。

使用 HYVA-405 实测的 A 相工作负荷下 ALF 是 26，B 相工作负荷下 ALF 是 10.5，C 相工作负荷下 ALF 是 28，当系统并网给配电系统供电时，连接主变和供电线路的断路器合闸，此时回路中产生了很大的合闸涌流，最大瞬时合闸涌流达到 12000A，此时的一次电流已经超过了 B 相的允许值，但是却并未达到继电保护系统的过流保护动作值，因此继电保护系统不应该动作，但是因为 B 相进入磁饱和而没有电流输出，导致继电保护系统检测到的零序电流超过限值，继电保护系统动作切断了母线供电，使非检修线路也事故停电，这种情况就是属于三相系统中其中一相参数达不到要求而造成的系统运行故障

3.4 5P/10P 电流互感器的测试

对 5P/10P 保护用电流互感器的检测应该确保以下参数符合要求：

1) 互感器的铭牌参数标识正确，即实测的额定负荷下 ALF 值要大于等于电流互感器铭牌标识的数值

2) 互感器的铭牌极性标识正确

3) 互感器的额定电流处比差角差符合国家标准要求

4) 互感器二次回路的阻抗必须要小于互感器的铭牌标识值

现阶段我们国家很多负责电力设备检修的单位在执行保护用电流互感器试验时，仅执行励磁特性试验（伏安特性试验），极性试验和电流比试验，完成这些试验的主要意义和存在的问题如下：

1> 励磁特性试验仅仅是获得电流互感器励磁曲线二次端电压对于二次端电流的数值，

然后将其与出厂数据对比，此试验项目仅对发现电流互感器内部匝间短路，互感器的铁芯发生断裂，位移缺陷时有效。

2> 电流比试验

在一次注入大电流然后检测互感器二次电流大小，此时电流互感器所连接的二次负荷仅仅是仪器的输入阻抗，注入的一次电流一般情况下也达不到互感器的额定电流，此时仅能发现互感器变比标识错误，或者电流互感器内部发生了多匝短路，并不能发现电流互感器在额定电流额定负荷处，比差与角差是否超标

3> 通过励磁特性曲线计算拐点电压，但是往往并没有详细解释和理解拐点电压的含义以及如何使用拐点电压判断互感器的性能，因此如果互感器的 ALF 值不达标也无法被发现

4> 没有校核电流互感器所连接的二次负荷值，因此如果互感器二次负荷超标则无法被发现

对于这些问题，在武汉市华英电力科技有限公司的 HYVA-405 型 CTPT 分析仪上有了完美的解决方法，HYVA-405 能够针对 5P/10P 型保护用电流互感器完成以下试验项目并对互感器做出全面的评价：

1> 完成电流互感器的励磁特性试验，除了与出厂数据对比发现互感器内部变化之外，仪器会根据励磁特性试验结果自动计算电流互感器在额定负荷下和工作负荷下的 ALF 值，如果 HYVA-405 获得的 ALF 值小于电流互感器铭牌标识值，仪器会自动给出互感器检测不合格结论

2> HYVA-405 自动测量获取电流互感器的线圈直流电阻值，并结合线圈直流电阻和励磁特性曲线，获得电流互感器的拐点电动势，从而计算出电流互感器的准确限制系数 ALF

3> 测量并获取电流互感器在 1%，5%，20%，100%，120% 额定电流下，额定负荷处和工作负荷处的比差与角差，当仪器发现电流互感器在有效负荷下，额定电流处的比差与角差超过国标限制时，自动给出互感器检测不合格结论

4> 自动测量互感器的极性标识和铭牌是否一致

5> 校核电流互感器二次回路的负荷，以保证电流互感器所连接的二次负荷并未超过电流互感器铭牌标识的限制

HYVA-405 通过对这些参数项目的检测与评价可以非常直观的掌握被检测电流互感器的性能和缺陷，从而使对 5P/10P 型保护用电流互感器的检测与试验变得更有意义

4 5PR 与 10PR 保护用电流互感器

4.1 定义

5PR/10PR 保护用电流互感器的定义与 5P/10P 电流互感器的定义相同，但是相对于 5P/10P 的电流互感器多了一个约束条件即剩磁系数 K_r 的要求，GB1208 和 IEC60044-1 中规定 5PR 和 10PR 电流互感器的剩磁系数 K_r 必须小于 10%

4.2 参数评估

针对于 5PR/10PR 的参数评价最主要的两项参数是 ALF 和剩磁系数 K_r ，其中 ALF 的定义和评价方式与 5P/10P 完成相同。5PR/10PR 的剩磁系数 K_r 是指在电流互感器励磁达到饱

和时，励磁电流过零时铁芯中磁通量占饱和磁通的比值，图 3 是 HYVA-405 所测量的是一个励磁电流周期电流互感器中铁芯磁通量随电流的变化曲线即磁滞回线。在国标 GB1208 和 IEC60044-1 中规定 5PR/10PR 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。

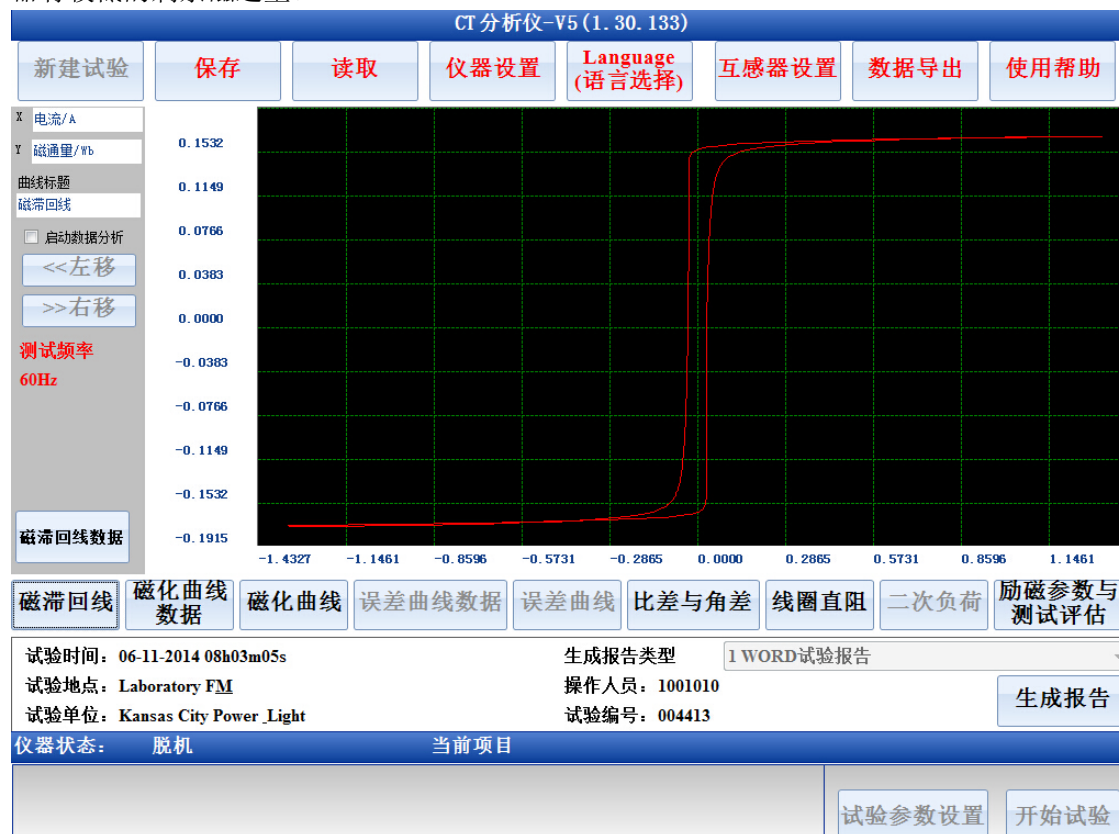


图 3 铁芯磁滞回线

4.3 5PR/10PR 电流互感器失效分析

当电流互感器安装所在的一次回路发生短路时，往往是在峰值电压或接近于峰值电压处，因此此时的电流的衰减过程中存在一个直流分量，这个直流分量很容易导致电流互感器存在较高的剩余磁通量，这个磁通量在电流互感器中持续一段时间（不超过 180s），系统再次合闸时，较低的短路电流就可能会使电流互感器进入磁饱和，电流互感器的剩磁系数越高则互感器铁芯中的剩余磁通量越高且持续时间会越久。

某些电力线路中安装了 C-0.3-CO 循环的快速重合断路器（对于 C-180s-CO 循环的断路器不存在这个问题），当断路器合闸时检测到短路故障，继电保护系统立即跳开断路器，此时短路过程中产生的直流分量导致回路中的保护用电流互感器中存在较高的剩余磁通量，当断路器快速重合闸时互感器很快进入磁饱和状态而失效，因此继电保护系统在第二次合闸中无法检测到故障电流，从而导致系统性事故，在这些线路中需要安装 5PR/10PR 的电流互感器，并且需要确认这些互感器的剩磁系数低于 10%

4.4 5PR/10PR 电流互感器测试

对于 5PR/10PR 电流互感器包含 5P/10P 电流互感器的所有检测项目，除此之外还需要确认电流互感器的剩磁系数 K_r 低于 10%，目前负责电力设备检修的单位很多并没有配备能

够测量电流互感器剩磁系数 K_r 的仪器，而只是将其作为普通的保护用互感器对待，忽略了其 K_r 参数的校核。选用华英电力的 HYVA-405 则可以在完成 ALF 测量，励磁特性，比差角差测量的同时获得互感器的 K_r 值，并且 HYVA-405 会绘制电流互感器的饱和磁滞回线，让试验人员对测试所获得的 K_r 值进行进一步的确认。

5 PX 级保护用电流互感器

5.1 PX 级别电流互感器定义

PX 级别电流互感器是在铭牌上对互感器励磁特性曲线的拐点电压保证值，参考电压处励磁电流保证值和二次线圈电阻保证值做出了约定的一种保护用电流互感器，在印度的 IS 标准中 PX 级对应的是 PS 级电流互感器

5.2 PX 级互感器的评价

PX 级互感器的评价方式与 5P/10P/5PR/10PR 的原理基本一致，但是评价参数的着手点不同，PX 级互感器没有 ALF 的定义，在 PX 互感器铭牌上标注了 V_{knee} ， I_{knee} 和 R_{dc75} ，这里的 V_{knee} 是指互感器保证真实的励磁特性曲线拐点电压大于铭牌标注值，互感器真实励磁特性曲线上的铭牌标注电压 V_{knee} 处电流小于铭牌标识值 I_{knee} ，并且互感器的匝数比误差要小于 0.25%，二次线圈内阻在 75 摄氏度时小于铭牌标识值 R_{dc75} ，PX 级互感器并没有对电流互感器的复合误差做出要求。

因为 PX 级互感器只对拐点电压做出了要求，并没有直接约束最高一次电流的数值，所以在评价 PX 级电流互感器时必须核对其线圈电阻在 75 摄氏度的数值（IEC 标准规定对于保护用电流互感器线圈电阻值标识都必须在 75 摄氏度工况下），以保证该数值不超过铭牌标识值，因为设计人员在考虑 PX 互感器的选型时根据其拐点电压和额定负荷来选择参数，但是互感器的内阻是负荷的重要组成部分，因此必须对线圈内阻也做出标识，并将其作为参数计算的一部分

5.3 PX 级别互感器失效分析

PX 级别互感器的失效分析与 5P/10P 互感器的失效分析完全相同，当一次通过的短路电流过大时，互感器的铁芯进入磁饱和，导致互感器失效。但是 PX 级互感器运行通过的最大短路电流需要结合负荷来进行计算，例如铭牌标识为 PX 2000/1 $V_{knee} = 600V$ 的电流互感器，当二次所连接的负荷值为额定值 20 欧，功率因素 1.0，互感器内阻是 10 欧，则允许通过的最大一次电流为 40000A，超过这个电流则电流互感器会进入磁饱和而失效

5.4 PX 级电流互感器的测试

因为 PX 级电流互感器的参数定义和 5P/10P 完全不同，因此对于 PX 级互感器的测试方法也不同，在做 PX 级电流互感器测试时需要校核的参数主要包括以下几个方面：

- 1> 实际拐点电压以及参考电压处的拐点电流
- 2> 电流互感器的匝数比
- 3> 极性标识
- 4> 75 摄氏度线圈电阻值

在目前国内普遍使用的电流互感器试验方法中，一般都没有包括电流互感器匝数比和75摄氏度电阻校核这2个项目。对于匝数比测量，很多仪器都不具备此项功能，更难以达到0.25%误差限值的校准要求。而线圈电阻测量一般也都没有考虑温度的影响，需要测试人员自己动手换算，很不方便。使用华英电力的HYVA-405 CTPT分析仪则可以很方便的解决这些问题，测试仪高达0.05%的匝数比测量精度，使之完全可以用来校准PX级互感器的匝数比误差，并且测试自带温度传感器，可以直接将测试结果换算到75摄氏度。在试验完成后HYVA-405还会将测试结果与PX级互感器的国标要求作对比，自动给出互感器是否合格的结论

6 总结

保护用电流互感器测试的主要目的是确认电流互感器的参数符合保护系统的要求，在系统发生短路故障时电流互感器不能失效，在系统正常运行时不会导致继电保护系统误动作，并且互感器的误差传递要达到标准要求。在互感器的各种参数检测中，二次负荷是影响保护用电流互感器性能至关重要的参数，因此必须考虑二次回路负荷对电流互感器参数和继电保护系统的影响，必须确认二次回路实际连接的负荷要小于铭牌标识的额定值。

作者简介：

王兰芳 男 1983年10月出生，华中科技大学硕士研究生，武汉市华英电力科技有限公司技术总监，从事互感器，变压器，断路器，发电机试验方法研究和相关智能化试验仪器仪表设计开发多年