

保护用电流互感器 10%误差曲线现场测试及其二次负载校核

郭耀珠¹, 石光¹, 刘华², 刘巍¹

(1. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052; 2. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052)

摘要: 电流互感器饱和是微机保护装置不正确动作的主要原因之一。对电流互感器饱和进行了概述, 分析了剩磁引起饱和对微机保护的影响, 并着重介绍了保护用电流互感器 10%误差曲线现场测试及其二次负载校核方法。

关键词: 电流互感器; 饱和; 剩磁; 10%误差; 伏安特性曲线; 二次负载

The field test on secondary load of current transformer and the calculation of its 10% error

GUO Yao-zhu¹, SHI Guang¹, LIU Hua², LIU Wei¹

(1. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Henan Electric Power Dispatching Center, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The saturation of CT (Current Transformer) causes big error in current measurement, and it is one of the important reason for maloperation of protection system. This paper describes the saturation of CT caused by residual magnetism, analyzes the effects on microcomputer protection. The field test on secondary load of CT and the calculation of its 10% error curve are proposed.

Key words: current transformer; saturation; residual magnetism; 10% error curve; V-A character curve; secondary load of CT

中图分类号: TM733 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)23-0101-04

0 引言

继电保护是保证电力系统安全稳定运行的重要手段。随着电力系统的不断发展和电力市场机制的引入, 对继电保护正确动作率的要求也越来越高。通常情况下, 对保护装置的可靠性、保护定值的正确性及二次回路的完好与接线正确性非常重视, 而对于继电保护用电流互感器的现场校核不够重视,

《DL/T 995—2006 继电保护和电网安全自动装置检验规程》明确要求: 应由有关制造厂或基建、生产单位的试验部门提供电流互感器各绕组的伏安特性; 现场应测量电流互感器二次回路负载, 将所测得的阻抗值按保护的具体工作条件和制造厂家提供的出厂资料来验算是否符合互感 10%误差的要求。

《〈国家电网公司十八项电网重大反事故措施〉(试行) 继电保护专业重点实施要求》也明确规定, 基建投产前, 负责安装和调试的相关部门应向运行主管部门提供电流互感器伏安特性实测数据、保护装置及相关二次回路的直流电阻、交流阻抗和电流互感器 10%误差计算分析等数据。目前基建和技改工程的现状是, 制造厂家不提供电流互感器 10%误差

出厂试验报告, 调试单位不进行电流互感器 10%误差现场测试, 也不通过现场测量计算电流互感器二次负载; 调试单位虽然开展了电流互感器伏安特性测试工作, 但也仅仅是几组简单的数据, 远远没有做到饱和点, 这些有限的的数据对判断电流互感器工作特性是否满足继电保护运行要求没有多少参考价值。近两年, 由于电流互感器饱和导致的微机继电保护装置不正确动作事故时有发生且呈上升趋势, 因此电流互感器现场测试工作应引起基建调试、运行检验及其管理、监督等部门的高度重视。

1 电流互感器饱和对微机保护的影响

1.1 电流互感器的饱和问题

电流互感器饱和是目前导致微机继电保护装置不正确动作的主要原因。保护要求在一定的短路电流下, 电流互感器误差不超过规定值, 误差包括比差、相位差和复合误差。对于有铁芯的电流互感器, 形成误差的主要因素是铁芯的非线性励磁特性及饱和程度。电流互感器的饱和可分为稳态饱和和暂态饱和。稳态饱和由大容量短路稳态对称电流引起, 主要是因为一次电流值太大, 进入了电流互感器饱

和区域，导致二次电流不能正确地传变一次电流。暂态饱和是由故障开始时短路电流中包含的非周期分量和电流互感器铁芯中残存的剩磁引起的。一次故障电流中的非周期分量不产生变化磁通，其作为励磁电流改变铁芯工况，影响互感器正确传变，可能使互感器出现暂态饱和。该暂态饱和在故障一定延时后出现，延时与一次系统和互感器二次回路的时间常数有关，然后随着一次电流非周期分量的衰减，电流互感器渐渐退出饱和区。剩磁是由电流互感器采用的铁磁材料所固有的磁滞现象造成的。剩磁可能会导致电流互感器在故障后数毫秒内迅速饱和。在一次系统发生故障后，闭合铁芯的电流互感器可能会残留有剩磁，剩磁大小取决于一次电流开断瞬间铁芯中的磁通，而磁通的数值由对称一次电流值、一次电流非周期分量和二次绕组的负载阻抗确定。断路器一般在电流过零时开断，残留在互感器铁芯中的磁通与其二次绕组的负载阻抗的相位角有关。对于纯电感负载，电流为零瞬间电压最大，而磁通为零，故无剩磁；对于纯电阻负载，电流为零瞬间电压为零，而磁通最大，故剩磁最大。关于剩磁，IEEE Std C37.110 列举了 230 kV 系统 141 组电流互感器的调查结果，如表 1 所示。

表 1 剩磁系数

Tab.1 Residual magnetism coefficient

剩磁系数 / (%)	互感器 百分数 / (%)	剩磁系数 / (%)	互感器 百分数 / (%)
0-20	39	41-60	16
21-40	18	61-80	27

剩磁对电流互感器传变性能的影响见图 1，图中饱和时间分别为 30 ms、10 ms、6 ms。

电流互感器二次绕组的负载阻抗过大会引起互感器饱和。负载阻抗增加，相应地，电流互感器感应电动势要升高，这意味着励磁电流要增大。如果负载阻抗增加得很多，超过了电流互感器所允许的二次负载阻抗，励磁电流的数值就会大大增加，从而使铁芯进入饱和状态。因此，电流互感器二次负载阻抗的现场校核是十分必要的。

1.2 电流互感器饱和对微机保护的影响

微机继电保护装置在电网中占有主导地位，我省电网 220 kV 系统继电保护微机化率已达到 99% 以上。近几年来，由于电流互感器饱和造成微机保护不正确动作的事例时有发生。例如某 220 kV 线路故障，由于 CT 饱和，造成该线路距离保护 I 段经较长延时动作 (88 ms)；某线路区外故障，由于该线路保护所接电流互感器暂态特性不同，其中一个 CT 饱和，造成该线路光纤电流差动保护误动作；

大容量电动机启动时其差动保护误动作事故也时有发生；近两年，我省电网又频繁出现线路故障跳闸后重合于故障时主变差流速断保护误动以及未采取抗饱和措施的母线差动保护误动事故。这类微机保护不正确动作事故并非个案，类似的报道很多。众所周知，设计规程中对电流互感器的选型有严格规定，要求保护用的电流互感器在通过一定倍数额定电流的情况下，其误差不超过 5%，设计时也无一例外地都选用了保护级的电流互感器，系统故障时，故障电流远未达到电流互感器的额定准确限值一次电流，为什么保护还会因为电流互感器饱和而误动呢？

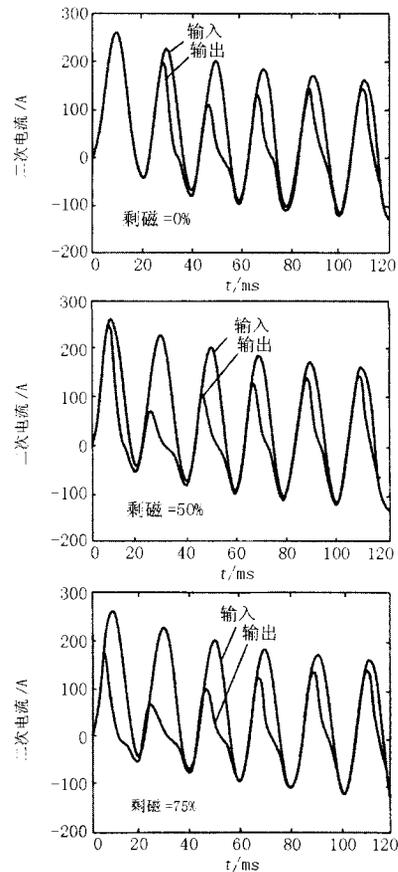


图 1 剩磁对电流互感器饱和影响示意图

Fig.1 CT saturation caused by residual magnetism

目前，我国 220 kV 及以下电压等级的保护多使用 GB 1208-1997 生产的 P 类电流互感器。《电流互感器和电压互感器选择与计算导则》对 P 级电流互感器没有剩磁的要求，即 P 级互感器不具有控制剩磁的能力。一次系统发生故障后，断路器一般在电流过零时断开故障电流。微机继电保护装置及二次电缆为电阻性负载，电流过零时，电压为零，磁

通最大, 剩磁为最大值, 且微机保护装置动作时间很快, 故障切除时间很短, 这使得 P 类电流互感器在故障电流切除后铁芯中的剩磁可能接近峰值。剩磁一旦产生, 因正常运行电流的小磁滞回线使得剩磁不易消除, 剩磁在铁芯中一直要保留到有机会去磁时才能消除。要消除剩磁对电流互感器性能的影响, 需要在每次大扰动后用外部去磁法将互感器去磁, 但对运行中的电流互感器, 这实际上是不可能的, 因而当系统再次发生短路故障时, 如果电流互感器中剩磁恰好与故障时短路电流暂态分量引起的磁通同极性, 则很有可能使该电流互感器在一次电流远远低于正常饱和值(稳态饱和值)时就过早饱和, 从而造成微机保护不正确动作。线路故障跳闸后重合于故障时主变差流速度断保护误动就是明显的例证。随着电网的不断扩大, 系统短路容量越来越大, 微机继电保护装置面临的电流互感器饱和问题更为严峻, 所以必须在设计、基建调试、运行检验等环节采取措施, 控制互感器饱和和对保护的影响。

2 电流互感器10%误差曲线现场测试及二次负载校核

2.1 电流互感器10%误差曲线现场测试

10%误差曲线是保护用电流互感器的一个重要的基本特性。继电保护装置反应的是一次系统的故障状况, 当一次系统故障, 保护装置动作时, 电流互感器一次电流通常比正常运行时的电流大得多, 因此, 电流互感器的误差也会扩大。为了使电保护装置能够正确反应一次系统状况而正确动作, 要求电流互感器的变比误差小于或等于10%。不论是一次电流加大, 还是二次负载阻抗增加, 其结果都会引起电流互感器感应电动势的升高, 从而扩大误差。所谓10%误差曲线是变比误差为10%时, 一次电流(I_1)与其额定电流(I_{1N})的比值($m_{10} = I_1 / I_{1N}$)和二次负载阻抗(Z_{en})的关系特性曲线, 如图2所示。也可以理解为, 在不同的一次电流倍数下, 为使电流互感器的变比误差小于或等于10%而允许的最大二次负载阻抗。

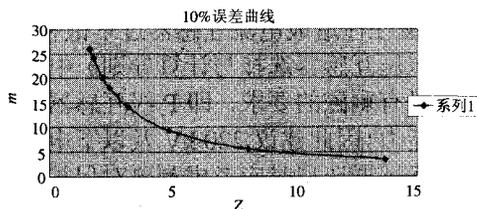


图2 某 CT 10%误差曲线

Fig.2 10% error curve of CT

由图2可知, 在电流互感器的10%误差允许范围内, 一次电流和二次负载阻抗是相互制约的, 一次电流越大, 允许的二次负载阻抗就越小。作为电流互感器的一个重要特性参数, 10%误差曲线本应由制造厂家提供, 但往往厂家不提供该特性曲线, 所以必须通过现场测试互感器的伏安特性曲线, 由伏安特性曲线经计算求得10%误差曲线。具体方法介绍如下。

1) 测试互感器的伏安特性曲线

以 I_1 、 I_{1N} 、 I_2 、 I_e 、 E 、 U_2 、 Z_2 、 Z_{en} 、 m_{10} 、 k 分别表示电流互感器一次电流、一次电流额定值、二次电流、励磁电流、感应电动势、二次电压、二次阻抗、二次负载阻抗、一次电流与其额定电流的比值及变比。

电流互感器伏安特性曲线是指 U_2 与 I_2 的关系曲线。现场测试时, 将互感器一次绕组开路, 将二次绕组与二次负载断开, 在二次绕组侧通入 I_2 , 测试 U_2 , 形成一组 U_2 - I_2 对应数据, 由此组数据得到伏安特性曲线。测试示意图如图3所示。

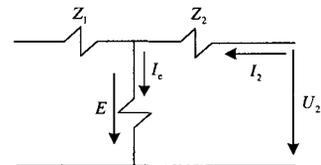


图3 伏安特性曲线测试等值电路

Fig.3 Equivalent circuit for V-A character curve testing

2) 由伏安特性曲线计算求得励磁特性数据

测试伏安特性曲线时, 因一次绕组开路, 故此 I_2 即为 I_e , 且有关系式

$$E = U_2 - I_e \times Z_2 \quad (1)$$

将1)中测得的伏安特性数据代入式(1), 计算得到一组互感器励磁特性 E - I_e 数据。现场测试时需要注意的是, 一定要做到拐点, 其判断标准是: 施加于电流互感器二次接线端子上的额定频率的电压, 若其均方根值增加10%, 励磁电流便增加50%, 则此电压方均根值称为拐点电压。

3) 由励磁特性数据计算得出10%误差曲线

电流互感器接入二次负载后, 其等值电路如图4所示。

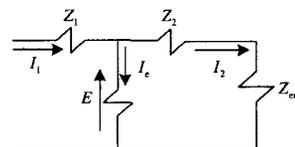


图4 电流互感器接入二次负载后等值电路图

Fig.4 Equivalent circuit for CT Accessing secondary load

由图4得出以下关系式:

$$E = I_2 \times (Z_2 + Z_{en}) \quad (2)$$

$$m_{10} = I_1 / I_N \quad (3)$$

当互感器误差为10%时, 有以下关系:

$$I_2 = 9I_e \quad (4)$$

$$I_1 / k = 10I_e \quad (5)$$

将式(4)代入式(2)得出:

$$Z_{en} = E / 9I_e - Z_2 \quad (6)$$

将式(5)代入式(4)得出:

$$m_{10} = I_1 / I_N = 10I_e / I_N \quad (7)$$

根据2)中计算得到的励磁特性 $E - I_e$ 数据和式(6)、式(7), 即可求得电流互感器的10%误差曲线。

图2、图5、表2分别给出了我们现场测得的某LCWB6-110w2电流互感器伏安特性与10%误差数据与曲线。电流互感器变比为1200/5。

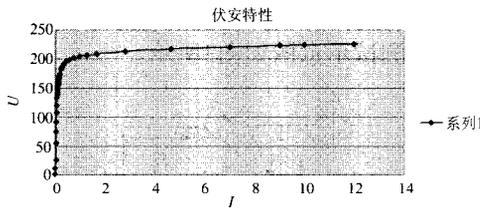


图5 某CT伏安特性曲线
Fig.5 V-A character curve of CT

表2 某LCWB6-110w2CT伏安特性、10%误差数据

Tab.2 V-A character and 10% error Date of CT

$I_2(I_e)/A$	U_2/V	E/V	m_{10}	Z_{en}/Ω
0.17	170.9	170.8	0.34	112.7
0.23	181.5	181.5	0.46	87.7
0.29	187.6	187.5	0.58	72.1
0.36	192.1	192.0	0.72	59.0
0.45	195.7	195.6	0.9	47.7
0.58	198.7	198.5	1.2	38.0
0.97	204.1	203.8	1.9	23.1
1.66	209.2	208.7	3.3	13.7
2.83	213.7	212.9	5.7	8.1
4.70	217.2	215.9	9.3	4.9
7.01	220.9	219.0	14.0	3.2
9.02	223.0	220.5	18.1	2.4
10.02	223.9	221.1	20.0	2.2
12.01	225.4	222.1	24.0	1.8
13.03	226.1	222.5	26.0	1.6

2.2 电流互感器二次负载现场校核

1) 二次负载阻抗计算

保护用电流互感器的二次负载通常由两部分组成, 即所连接保护装置及连接导线, 对于微机保护, 设计时二次负载计算公式为:

$$Z_{en} = \sum K_{rc} R_r + K_{lc} R_l + R_c \quad (8)$$

式中: R_r 为继电器电流线圈电阻, Ω ; R_l 为连接导线电阻, Ω ; R_c 为接触电阻, Ω , 一般为0.05~0.1 Ω ; K_{rc} 为继电器阻抗换算系数; K_{lc} 为连接导线阻抗换算系数。

2) 二次负载现场校核

如前所述, 在电流互感器的10%误差允许范围内, 一次电流和二次负载阻抗是相互制约的。设计所选择二次负载阻抗是否合适, 必须通过现场校核确定。校核步骤如下:

(1) 在电流互感器根部将二次绕组与二次负载断开, 并分别在负载端各相与中性点之间通入交流电流 I , 测定回路的压降 U , 计算出电流回路每相阻抗 Z 。

(2) 根据保护所接入电压等级的综合阻抗, 计算该电压等级母线三相短路及单相接地短路时的最大短路电流倍数。需要说明的是, 不能根据保护装置的整定值计算电流倍数, 因为故障时电流值大于, 甚至远远大于保护装置整定值下的电流值。电流互感器有可能在保护装置整定值下满足误差要求, 而在最大短路电流下误差超标。

(3) 根据计算得到的短路电流倍数, 由10%误差曲线查出允许的最大二次负载阻抗 Z_{en} , 将其与测得的二次负载 Z_2 比较。当 $Z_2 < Z_{en}$ 时, 认为电流互感器及二次电缆选择合适。

3 结束语

电流互感器饱和是引发微机保护装置不正确动作的主要原因之一, 为了最大程度地减小其影响, 应在互感器选型、互感器参数选择、二次负载阻抗计算与现场校核、保护装置采取抗饱和措施等多方面采取合理且有效的措施。

1) 220 kV 及以下电网广泛使用了 P 级电流互感器。因 P 级电流互感器不能充分满足微机差动保护对暂态电流传变特性的要求, 所以应根据计算结果适当提高额定准确限值系数, 选择变比较高或二次额定电流较小的互感器, 并尽可能增大电流回路二次电缆截面积以减小二次负载阻抗。

2) 剩磁往往造成电流互感器过早饱和。《电流互感器和电压互感器选择与计算导则》中对 P 级电流互感器没有剩磁的要求, 即 P 级互感器不具有控制剩磁的能力。因此建议 220 kV 及以下电网微机保护用电流互感器选型时应考虑剩磁对保护的影响, 选择对电流互感器剩磁有限制的 PR 级类电流互感器。目前已经有成熟的 PR 电流互感器问世, 同等

(下转第 108 页 continued on page 108)

等发送至 CPU3, 由 MONI 以自己的起动时刻为基准, 整理 CPU1、CPU2 的信息并形成跳闸报告。由于 CPU1、CPU2 无实时时钟, 所以只能传送相对时间。当系统在故障前有轻微扰动时, 因三个 CPU 灵敏度不同可能会出现起动时刻不一致的现象, 导致 MONI 收集到的 CPU 动作信息在时间上出现了偏差。当 MONI 将各 CPU 以不同起动时刻的动作元件及相对时间整理时, 若 CPU1 启动较 MONI 和 CPU2 早, 则 CPU 的波形会被后移, 表现在录波图上则是保护发了两次跳闸信号, 第一次是 CPU1 传给 CPU2, 并由 CPU2 按照自己的起动时刻整理后发给 MONI, 第二次是直接由 CPU1 按照自己的起动时刻整理后发给 MONI, 所以出现了两次 C 相合闸脉冲。

3 结语

至此, 整个跳闸结果变得清晰, 跳闸报告中一系列问题也得以解释。早期的 LFP 系列的保护装置在处理过渡性电阻接地短路时灵敏度不高, 在其它一些文献中也提到过类似的现象, 即当线路单相接地时, 由于起初故障电流较小, 不足以起动主保护, 故障继续发展或突变时, 由后备保护来切除。后期的 RCS 在原理上加以改进, 目前未见有类似情况出现。文中提到的发两次跳闸脉冲、保护未有报文即出口等现象比较少见, 在此提出供同行借鉴。

(上接第 104 页 continued from page 104)

级的 PR 类电流互感器较 P 类互感器略贵, 从提高继电保护正确动作率及经济两方面考虑, 应在电网中积极推广使用 PR 类电流互感器。

3) 建议微机保护生产厂家借鉴微机母线保护的做法, 在线路保护、变压器保护中也采取抗电流互感器饱和措施, 确保继电保护装置正确动作。

4) 电流互感器 10% 误差曲线现场测试及二次负载阻抗校核与设计时正确选择电流互感器参数同样重要。近几年继电保护技术监督检查及新建变电站、机组投运前验收检查发现, 不论是供电公司还是电厂, 都没有开展电流互感器 10% 误差曲线现场测试与二次负载阻抗校核工作。此项工作技术难度并不大, 没有开展此工作, 专业技术管理不到位是根本原因, 因此应该引起我们的充分重视。

参考文献

[1] 林榕, 曹树江. CSL1 01 与 LFP-901 线路保护重合闸应用问题的分析[J]. 电网技术, 2003, 27(10):78-81.
LIN Rong, CAO Shu-jiang. Analysis of Application of Auto-Reclosures Provided By Line Protections CSL-101 And LFP-901[J]. Power System Technology, 2003, 27(10):78-81.

[2] 李字芹, 刘洪义, 刘洪涛, 等. LFP-901 型微机保护在哈尔滨电业局所辖变电所中的应用[J]. 黑龙江电力, 2003, 25(5):401-402.
LI Zi-qin, LIU Hong-yi. Application of LFP-901 Microprocessor Protectors at Substations Under Harbin Electric Power Bureau[J]. Heilongjiang Electric Power, 2003, 25(5):401-402.

[3] 曹树江, 朱辉. LFP-901 和 LFP-921 保护在河北南网的运行分析[J]. 电网技术, 2000, 25(5).
CAO Shu-jiang, ZHU Hui. Analysis of Operation of Protective Devices LFP-901 And LFP-921 IN South Hebei. Power System[J]. Power System Technology, 2003, 25(5).

[4] LFP-901A (B、D) 型超高压线路成套快速保护装置技术说明书[Z]. 国家电力公司电力自动化研究院继电保护研究所, 1998.

收稿日期: 2008-02-21

作者简介:

潘 茗 (1980-), 女, 助理工程师, 从事变电站运行工作,

E-mail: gxysmd@163.com

张静伟 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护工作。

参考文献

[1] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[2] 景敏慧, 孔霄迪, 覃松涛, 等. P 类电流互感器饱和原因分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 94-97.

收稿日期: 2008-09-16;

修回日期: 2008-10-15

作者简介:

郭耀珠 (1964-), 女, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作; E-mail: gyaozhu@hncpri.com

石 光 (1971-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护管理工作;

刘 华 (1955-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护管理工作。