

保护用电流互感器铁芯剩磁衰减规律分析

郑 涛¹, 马玉龙¹, 黄 婷¹, 刘连光¹, 白加林², 高昌培²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 电流互感器的铁芯具有磁滞效应, 运行过程中可能会产生剩磁, 进而可能加快电流互感器的饱和, 导致保护继电器的误动作。针对该现象, 分析了电流互感器剩磁产生的机理及其影响因素; 在此基础上, 重点研究了电流互感器的剩磁衰减规律。基于分形理论的理论计算公式, 可计算短路电流开断后系统无残余电流影响的情况下剩磁的大小; 利用 PSCAD 仿真软件进行试验得到故障后电流互感器一次侧有残余电流情况下磁通的衰减规律, 即系统发生短路故障后, 电流互感器铁芯内磁通会发生不同程度的衰减, 并在局部磁滞回线上运行, 既不会在故障切除时刻磁通的基础上运行, 也不会衰减至 0, 为抑制剩磁的产生以及分析电网事故提供了基础理论依据。

关键词: 电流互感器; 电流互感器铁芯; 分形理论; 剩磁; 饱和; 衰减规律; 磁滞效应

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.019

0 引言

电流互感器 CT(Current Transformer)作为一次系统和二次系统的联络元件, 可以将一次系统的真实状态反映给各种保护装置(不管是传统的保护装置还是目前常用的数字型保护装置); 被保护元件中流过的电流大小也是由电流互感器进行测量的。因此, 电流互感器的传变性能对继电保护的性能具有非常重要的影响。但是由于传统电磁式 P 级电流互感器利用电磁感应原理转换电流, 且采用闭合铁芯形成磁路, 当故障短路电流断开时, 便会在铁芯中残留大量的剩磁^[1-2]。剩磁会影响电流互感器励磁曲线的起始工作点, 使得电流互感器更易发生饱和, 并缩短饱和时间。此时电流互感器的二次电流波形就会发生畸变, 从而无法正确地传变系统一次侧电流。尤其在差动保护中, 剩磁也是产生不平衡电流和导致差动保护误动的重要原因, 对系统保护装置动作的可靠性有很大影响。对于测量用电流互感器而言, 剩磁会导致铁芯磁导率降低, 引起角差偏正、比差偏负, 降低准确级^[3]。

目前, 学者对电流互感器的稳态和暂态特性、电流互感器的饱和机理以及饱和的影响因素等方面进行了大量的研究, 提出了许多饱和和检测的算法和抑制饱和的有效措施^[4]。但由于铁芯剩磁无法测量与在线估计, 因此针对剩磁产生后的变化情况的研究较少。文献[5]利用电磁暂态仿真程序获得了剩磁的

发生规律; 文献[6]通过直流法测取了电流互感器剩磁的相关参数; 文献[7]采用新型电流互感器分析仪, 通过现场实测和实验室模拟实验, 分析了饱和铁芯剩磁在额定工况下的实际状态。由上述文献可看出, 目前对于铁芯剩磁的产生及其对电流互感器饱和的影响等已有大量研究, 但剩磁的变化规律尚不清楚, 缺乏对剩磁衰减规律的定量分析。

本文采用理论分析与 PSCAD 仿真相结合的方法, 对电流互感器铁芯剩磁的产生机理和衰减规律进行了深入的研究^[8-12]。利用分形理论所揭示的铁芯主磁滞回环和内部局部磁滞回环之间具有的分形特征^[13], 给出计算剩磁的理论公式, 从本质上揭示了铁磁材料动态磁化过程中所遵循的规律; 通过构造 PSCAD 仿真电路, 得到了剩磁产生后在系统一次侧仍有不同程度残余电流的情况下剩磁的衰减规律, 并验证了理论推导公式的正确性, 揭示了铁芯剩磁的变化规律。

1 剩磁产生的原因及影响因素

电流互感器剩磁产生的根本原因是由于铁磁材料存在特有的磁滞效应, 使磁化轨迹呈现为磁滞回线形状。电流互感器铁芯的磁化曲线如图 1 所示。当励磁电流由 0 增加至 i_{sat} 时, 铁芯内磁通沿着基本磁化曲线增加至 Φ_{sat} ; 当励磁电流反向减小至 0 时, 磁通并不会沿着原基本磁化曲线衰减至 0, 而是沿着极限磁化回线衰减至 Φ_R , 此时 Φ_R 即为剩余磁通; 当励磁电流衰减至 0 后, 若继续施加反向电流, 磁通会反向增大, 而当励磁电流再次正向增大至 0 时, 磁通衰减至反向剩磁值。周而复始, 这样就构成了铁磁材料的磁化曲线^[14-15]。

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-09-01

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016-YFB0900600)

Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900600)

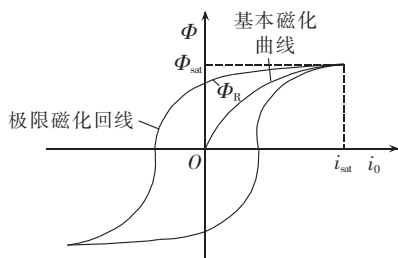


图 1 电流互感器铁芯的磁化曲线

Fig.1 Magnetization curve of CT iron core

电流互感器在不同运行情况下的励磁曲线如图 2 所示。当电流互感器稳态运行时,因为励磁电流为周期性工频电流,且幅值很小,铁芯磁化轨迹为小磁滞回线(图 2 中稳态运行时的磁化曲线),一般在原点附近变化,当励磁电流为 0 时,剩磁很小,此时称为稳态剩磁;而当电流互感器工作在暂态情况下时,由于励磁电流中非周期分量的存在,使铁芯工作在较高的磁滞回环中,当励磁电流为 0 时,剩磁很大,接近饱和磁通值,称为暂态剩磁。P 级电流互感器铁芯的剩磁值可达饱和磁通的 80%。当系统断路器断开一次电流的时刻不同时,磁将通过各自所在的局部磁滞回线达到剩磁点。

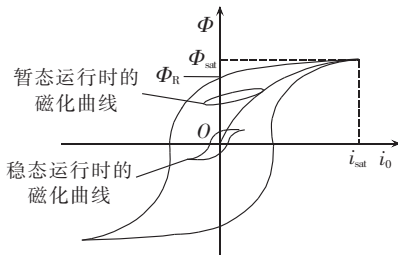


图 2 电流互感器不同运行情况下的励磁曲线

Fig.2 Excitation curves of CT in different operation conditions

因此,剩磁的影响因素有:断路器开断时刻;一次电流及一次回路时间常数;二次回路阻抗。

不同系统的断路器断开一次电流的时刻决定了磁通所处的磁滞回线不同,磁将通过各自所在的局部磁滞回线达到剩磁点,因此剩磁不同。后 2 个因素决定了励磁电流的波形,一次电流中非周期分量越大,一次时间常数越大,铁芯磁通的累积时间就越长,越易达到饱和,使电流互感器铁芯工作的磁滞回线越靠近饱和点,从而剩磁值较大。

当一次电流不含非周期分量时,考虑到断路器一般在短路电流过零点开断,所以跳闸时有 $i_2 \approx i_1' = 0$ 。当电流互感器二次负载为纯电感时,二次电流滞后感应电动势 90° ,所以跳闸时感应电动势 e_2 位于峰值处,而铁芯磁通超前感应电动势 90° ,所以跳闸时的磁通为 0,即剩磁为 0;当电流互感器二次负载为纯电阻时,感应电动势 e_2 与二次电流同相,跳闸时感应电动势 e_2 为 0,铁芯磁通位于最大值处,所以剩磁较

大。因此二次负载功率因数大时的铁芯剩磁远大于二次负载功率因数小时的铁芯剩磁。此结论同样适用于一次电流含有非周期分量的情形。当一次电流含有非周期分量时,励磁电流明显增大,对应的铁芯磁通也会明显增大,剩磁也更大。

2 电流互感器剩磁衰减规律

2.1 故障切除后,电流互感器残余电流为 0 时剩磁的衰减规律

铁磁材料的磁滞回线可分为主磁滞回线(极限磁滞回线)和次磁滞回线(局部磁滞回线),当发生磁化过程时,运行点所处的磁滞回线的形状、大小和位置会影响当前的磁化电流波形和一段时间内的磁化轨迹。经验证分析可知,对于不同的铁磁材料,虽然磁滞回线大小、形状和位置不同,但其局部磁滞回线与极限磁滞回线的形状相似。所以可认为同一种铁磁材料的局部磁滞回线与极限磁滞回线呈现相同的形状特征,轨迹曲线属于同一类别。由此可以判断:由众多的磁滞回线所组成的几何图形是一种分形图形^[16]。下文将基于分形的基本概念,得出故障切除后电流互感器残余电流为 0 时剩磁衰减规律的理论公式。本文残余电流特指故障切除后仍流过电流互感器一次侧的电流。

图 3 为电流互感器的局部磁化曲线。结合分形理论,从图 3 中可以看出,局部磁滞回线与饱和磁滞回线具有图形相似性。设 k 点为短路电流开断瞬间电流互感器的运行点(i_k, Φ_k),饱和点为(i_{sat}, Φ_{sat})。之后励磁电流由 i_k 逐渐衰减至 0 的过程中,磁通量由 Φ_k 沿着局部磁滞回线下降分支到达剩磁 Φ_r 处。因系统无残余电流,励磁电流衰减至 0 后停止。同理,若短路电流开断瞬间电流互感器的运行点在负向,则励磁电流从反方向衰减至 0 后停止。图 3 中局部磁滞回线的实线部分即上述分析的过程,而虚线部分则是当系统有残余电流时,因励磁电流衰减至 0 后不会停止,而是反向继续运行,则磁通量会沿着虚线部分运行。基于分形理论的基本思想,可得到剩磁的计算公式。

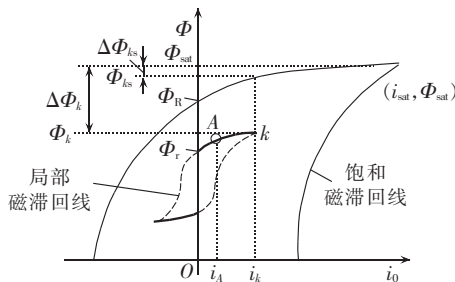


图 3 短路电流开断后电流互感器的局部磁滞回线

Fig.3 Local hysteresis loop of CT after short circuit current breaking

基于分形理论,局部(次)磁滞回线可以通过对极限(主)磁滞回线进行迭代压缩来生成,因此定义比例因子 K_{com} ,其为极限磁滞回线到局部磁滞回线的压缩比。由图 3 可知, i_k 对应于极限磁滞回线上的磁通大小为 Φ_{ks} ,则有:

$$\Delta\Phi_{ks} = \Phi_{ks} - \Phi_{sat} \quad (1)$$

$$\Delta\Phi_k = \Phi_k - \Phi_{sat} \quad (2)$$

因此比例因子 K_{com} 为:

$$K_{com} = \frac{\Delta\Phi_{ks}}{\Delta\Phi_k} \quad (3)$$

此时,在局部磁滞回线上任取一点 A,其对应的励磁电流大小为 i_A ,对应于极限磁滞回线上的点坐标为 (i_A, Φ_{As}) ,在实际测量计算中, Φ_{As} 的值可由极限磁滞回线得到。所以,局部磁滞回线上 A 点的磁通大小 Φ_A 为:

$$\Phi_A = \frac{\Phi_{As} - \Phi_{sat}}{K_{com}} + \Phi_{sat} \quad (4)$$

由于 A 点是任意选取的,所以此时可将 A 点取至 $i_A=0$ 处,则 Φ_{As} 变为 Φ_R , Φ_A 变为 Φ_r ,可得:

$$\Phi_r = \frac{\Phi_R - \Phi_{sat}}{K_{com}} + \Phi_{sat} \quad (5)$$

由式(5)即可计算出电流互感器在短路电流开断后,系统已经没有残余电流情况下,铁芯内剩磁自行衰减的终值。可见,当 $\Phi_k = \Phi_{ks}$ 时, $\Phi_r = \Phi_R$; 当 $\Phi_R = (1 - K_{com})\Phi_{sat}$ 时, $\Phi_r = 0$ 。

同理,当励磁电流从反方向衰减至 0 时,剩磁的分析计算方法与上述一致,在此不再赘述。因此,当已知电流互感器极限磁滞回线以及短路电流开断瞬间的励磁电流、磁通值时,在系统残余电流为 0 的情况下,即可采用上述方法求得该工况下的铁芯剩磁。

2.2 故障切除后,电流互感器残余电流不为 0 时的剩磁衰减规律

由前述分析可知,电力系统短路故障易导致电流互感器产生较大的剩磁,且剩磁的大小由断路器开断瞬间铁芯中的磁通决定。在短路故障发生时,磁通由稳态周期性短路电流、暂态非周期分量及二次回路阻抗决定,当断路器在电流互感器处于饱和时断开,产生的剩磁可能最大。

当故障电流(尤其是非周期分量)流经电流互感器时,断路器动作断开电流,此时会在电流互感器铁芯内产生剩磁,而系统残余电流不为 0 时,残余电流流经电流互感器时铁芯的磁通变化主要有 2 种结论:一种是当电流互感器正常工作时,磁通逐渐衰减至 0;另一种是剩磁不会衰减至 0,而是在断路器断开电流后,在一次侧电流作用下,电流互感器铁芯将在原有的磁通基础上,运行在局部小磁滞回线上,剩磁不会衰减。本文通过仿真验证故障切除后,在电流互感器一次侧电流的影响下,铁芯内磁通既不会在原

有剩磁的基础上继续运行,也不会随着时间衰减至 0,而是发生不同程度的衰减,进而运行在局部磁滞回线上。

为了验证电流互感器铁芯内磁通的衰减情况,利用 PSCAD 仿真软件搭建如图 4 所示的系统模型,仿真分析电流互感器铁芯的磁通在残余电流不为 0 情况下的变化情况。

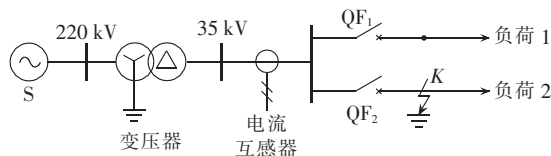


图 4 系统模型

Fig.4 System model

仿真所选用的电流互感器变比为 4000:5,由极限磁滞回线可得出,饱和磁通密度大约为 1.6 T;系统电压等级为 220 kV;变压器容量为 240 MV·A,变比为 220:38.5。在负荷 2 所在支路的 K 点设置三相短路故障,仿真分析当 QF2 切除故障后,电流互感器铁芯的磁通在残余电流不为 0 时的变化情况。其中,负荷 1 所在支路定义为残余负荷,负荷 1+负荷 2 为总负荷。图 5 为电流互感器的极限磁滞回线。

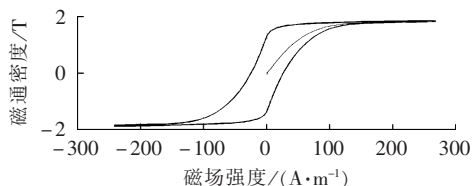


图 5 电流互感器的极限磁滞回线

Fig.5 Limit hysteresis loop of CT

以极限磁滞回线为基准,当故障切除前,短路电流已使得电流互感器达到饱和,然后得出故障切除后残余负荷占总负荷不同比例下的剩磁变化情况。选取发生故障的瞬间为零时刻,0.19 s 时切除故障,得到故障期间(0.01~0.19 s)、故障切除后(0.19~0.37 s)和稳定运行(1~1.18 s)3 个时段内的电流互感器铁芯磁滞回线,分别如图 6—8 所示。为表示方便,以下各磁滞回线相关图均以 3 个时间段起始时刻作为标识。图 9 给出 K 点发生三相短路故障及故障切除后残余负荷占总负荷 15% 情况下的变压器低压侧 A 相电流(标幺值),其中额定电流为 6.23 kA。图 10 为故障前后铁芯内磁通密度的变化情况(残余负荷占总负荷 15%)。选取故障发生瞬间为零时刻,因此图 9 和图 10 中故障前时间为负值。

由图 9 可看出,电流互感器一次侧短路电流高达 15~20 倍的额定电流,故障切除前电流互感器已经达到饱和。由图 6—8 可以看出,残余负荷占总负荷的比例越小,电流互感器稳定运行时段(1~1.18 s)内的磁滞回线相比故障切除后时段(0.19~0.37 s)内的

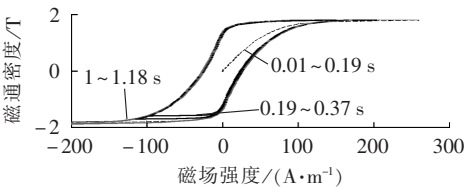


图 6 残余负荷占总负荷 85% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.6 Hysteresis loop of CT when residual load is 85% of total load

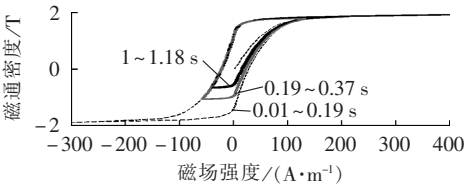


图 7 残余负荷占总负荷 50% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.7 Hysteresis loop of CT when residual load is 50% of total load

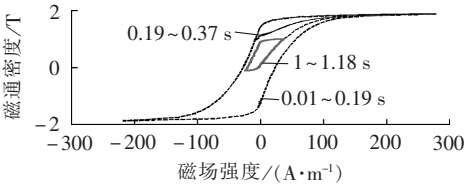


图 8 残余负荷占总负荷 15% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.8 Hysteresis loop of CT when residual load is 15% of total load

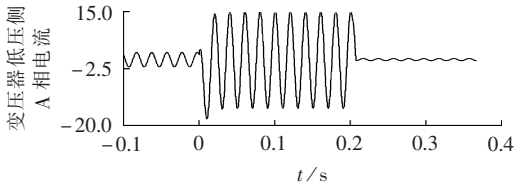


图 9 变压器低压侧 A 相电流(残余负荷占总负荷 15%)
Fig.9 A phase current of transformer low-voltage side (residual load is 15% of total load)

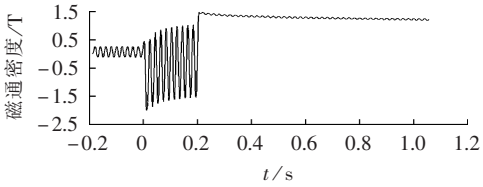


图 10 铁芯内磁通变化情况(残余负荷占总负荷 15%)
Fig.10 Magnetic flux in iron core(residual load is 15% of total load)

磁滞回线下降越多,磁滞回环越小,剩磁也越小。由图 10 可看出,故障切除后,磁通密度随着时间增加而逐渐衰减,但变化率逐渐变小,且渐趋稳定。所以当故障切除后电流互感器仍有残余电流流过时,磁通既不会衰减至 0,也不会在原剩磁基础上继续运行,而是随着残余负荷占总负荷比例的减少,磁通也将衰减至较小的磁滞回线上运行。

同时,仿真还验证了在残余电流一定时,电流互感器二次负载、横截面积以及匝数比不同时的磁

通密度衰减情况。选取发生故障的瞬间为零时刻,0.19 s 时切除故障,得到故障期间(0.01~0.19 s)、故障切除后(0.19~0.37 s)和稳定运行(1~1.18 s)3 个时段内电流互感器的铁芯磁滞回线,分别如图 11—13 所示。

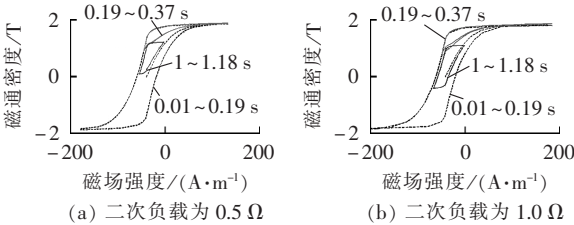


图 11 电流互感器二次负载不同时的磁滞回线
Fig.11 Hysteresis loop of CT with different secondary load

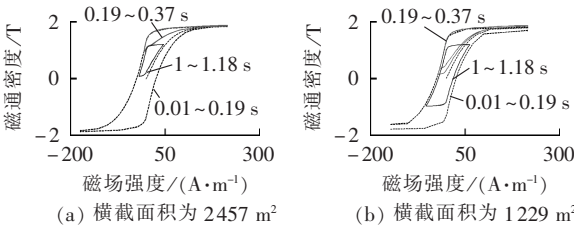


图 12 电流互感器铁芯横截面积不同时的磁滞回线
Fig.12 Hysteresis loop of CT with different core cross-sectional areas

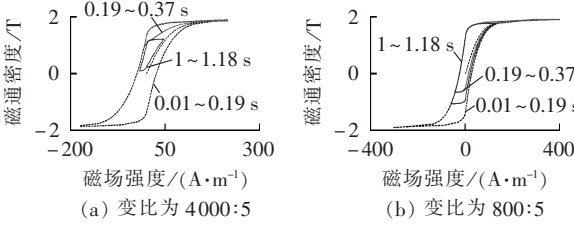


图 13 电流互感器变比不同时的磁滞回线
Fig.13 Hysteresis loop of CT with different turn ratios

图 11(b)中电流互感器二次负载是图 11(a)中电流互感器二次负载的 2 倍,从图 11 中可看出,电流互感器二次负载越大,故障切除后,在残余电流不为 0 时,磁通衰减越快,局部磁滞回线下降越多,剩磁越小。

图 12(b)中电流互感器铁芯横截面积是图 12(a)中铁芯横截面积的一半,从图 12 中可看出,电流互感器铁芯横截面积的不同不会影响磁通的衰减程度,只会影响局部磁滞回线的大小,铁芯横截面积越小,铁芯更容易饱和。

图 13(a)中电流互感器的变比为 4 000:5,图 13(b)中电流互感器的变比为 800:5,从图 13 中可看出,电流互感器变比越大,故障切除后磁通衰减越快,局部磁滞回线下降越多,剩磁越小。同时,铁芯也更不易饱和。

同样,当故障短路电流未使电流互感器达到饱和时,得出切除故障后残余负荷占总负荷不同比例下的剩磁变化情况。选取发生故障的瞬间为零时

刻,0.19 s 时切除故障,得到故障期间(0.01~0.19 s)、故障切除后(0.19~0.37 s)和稳定运行(1~1.18 s)3 个时段内的电流互感器铁芯磁滞回线,分别如图 14—16 所示。图 17 为 K 点发生三相短路故障及故障切除后残余负荷占总负荷 25% 情况下的变压器低压侧 A 相电流(标么值),其中额定电流为 6.23 kA。选取故障发生瞬间为零时刻,因此图 17 中故障前时间为负值。

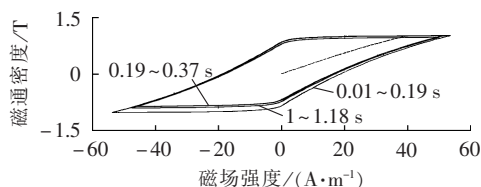


图 14 残余负荷占总负荷 75% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.14 Hysteresis loop of CT when residual load is 75% of total load

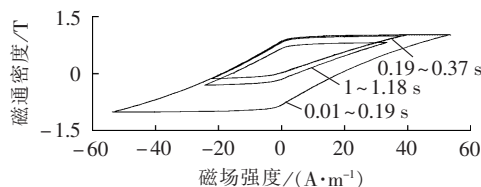


图 15 残余负荷占总负荷 50% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.15 Hysteresis loop of CT when residual load is 50% of total load

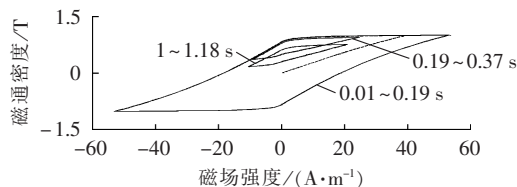


图 16 残余负荷占总负荷 25% 时电流互感器的磁滞回线
Fig.16 Hysteresis loop of CT when residual load is 25% of total load

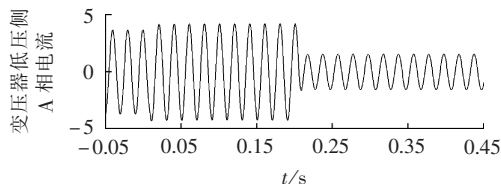


图 17 变压器低压侧 A 相电流(残余负荷占总负荷 25%)
Fig.17 A phase current of transformer low-voltage side (residual load is 25% of total load)

由图 14—17 可看出,电流互感器未达到饱和且电流互感器有残余电流流过时,铁芯磁通也将运行在局部磁滞回线上,其运行规律与电流互感器已经达到饱和情况下的运行规律一致,残余负荷占总负荷比例越少,即残余电流越小,磁滞回环越小,但磁通不会衰减至 0;当残余负荷占总负荷比例为 0 时,电流互感器磁通的衰减规律满足分形理论,磁通沿磁滞回线衰减至励磁电流为 0 处;而当残余电流不

为 0 时,铁芯将在局部磁滞回环上运行。

在切除故障后仍有残余电流流过电流互感器的情况下,铁芯磁通会发生衰减,并运行在局部磁滞回线上;衰减程度与一次电流大小、二次负载、铁芯横截面积、变比等参数有关,虽无法准确地定量计算,但并不影响铁芯剩磁的衰减趋势。

3 结论

系统发生短路故障时,因短路电流较大,且常伴有非周期分量,可能会使得电流互感器发生饱和。此时,断路器动作切除故障后,电流互感器可能产生较大的剩磁。剩磁的存在会对电流互感器的工作性能产生影响,较大的剩磁有可能使得电流互感器较快地进入饱和。当故障切除后,若电流互感器一次侧不再通过电流,电流互感器内磁通的衰减过程满足分形理论,沿着局部磁滞回线衰减,直至励磁电流为 0;而当有残余电流流经电流互感器时,铁芯内磁通会发生不同程度的衰减,不会在故障切除时刻对应的剩磁点运行,衰减规律与诸多因素有关,最终运行在某局部磁滞回线上,但磁通并不会衰减至 0。剩磁对保护用电流互感器传变特性的影响较大,正确认识铁芯内磁通的衰减规律,对于有效抑制剩磁进而采取必要的措施、保证继电保护装置的正确动作具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 袁季修,卓乐友,盛和乐,等. 保护用电流互感器应用的若干问题——《电流互感器和电压互感器选择和计算导则》简介[J]. 电力自动化设备,2003,23(8):69-72.
YUAN Jixiu,ZHUO Leyou,SHENG Hele,et al. Some problems on application of current transformers in protection—introduction of “Guide to the selection and calculation of current transformer and voltage transformer”[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(8):69-72.
- [2] 郭一飞,高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):126-131,144.
GUO Yifei,GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):126-131,144.
- [3] 于泳,汪良坤,连涛,等. 测量用电流互感器铁芯材料对剩磁的影响[J]. 电工电气,2013(6):11-14,61.
YU Yong,WANG Liangkun,LIAN Tao,et al. Impacts of iron core materials of measuring current transformers on residual magnetism[J]. Electrotechnics Electric,2013(6):11-14,61.
- [4] 刘益青,高伟聪,王成友,等. 基于差电流半周积分特征的电流互感器饱和和识别方法[J]. 电网技术,2016,40(9):2889-2896.
LIU Yiqing,GAO Weicong,WANG Chengyou,et al. Detection method for current transformer saturation based on characteristic of differential current by half-cycle integral algorithm[J]. Power System Technology,2016,40(9):2889-2896.
- [5] 陈刚,王忠东,白浩,等. 电流互感器剩磁相关参数测量的直流法

- [J]. 高电压技术,2014,40(8):2416-2421.
- CHEN Gang,WANG Zhongdong,BAI Hao,et al. DC method for measuring parameters of remanence of current transformer [J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2416-2421.
- [6] 闫艳霞,崔建华. 基于双向直流法的电磁式电流互感器剩磁测量仪研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):137-142.
- YAN Yanxia,CUI Jianhua. Residual flux measuring instrument for electromagnetic current transformer based on bidirectional DC method[J]. Power System Protection and Control,2015,43(14):137-142.
- [7] 李长荣,宋喜军,李俊芳,等. 剩磁对保护级电流互感器的影响和PR级的主要参数计算[J]. 变压器,2013,50(5):5-8.
- LI Changrong,SONG Xijun,LI Junfang,et al. Influence of remanence on protective current transformer and calculation of main parameters for PR class[J]. Transformer,2013,50(5):5-8.
- [8] 崔迎宾,谭震宇,李庆民,等. 电流互感器剩磁影响因素和发生规律的仿真分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):87-91,118.
- CUI Yingbin,TAN Zhenyu,LI Qingmin,et al. Simulation study of influences of different factors on residual flux occurrence in current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(23):87-91,118.
- [9] 李军,胥昌龙,曹宣艳,等. 电流互感器饱和铁心的剩磁在额定工况下的状态分析[J]. 电测与仪表,2014,51(2):14-18.
- LI Jun,XU Changlong,CAO Xuanyan,et al. State analysis on remanence of CT saturated core under rated condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2014,51(2):14-18.
- [10] 陈黎来. 电流互感器对电能计量的影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):138-141.
- CHEN Lilai. Effect of CT on electric energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):138-141.
- [11] 毕大强,冯存亮,葛宝明,等. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):184-190.
- BI Daqiang,FENG Cunliang,GE Baoming,et al. Research on identification of partial transient saturation in current transformers[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):184-190.
- [12] 尹项根,张哲,王友怀,等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(23):1-9.
- YIN Xianggen,ZHANG Zhe,WANG Youhuai,et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control,2016,44(23):1-9.
- [13] FRAME J G,MOHAN N,LIU T. Hysteresis modeling in an electro-magnetic transients program[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1982,PAS-101(9):3403-3412.
- [14] 孙向飞,束洪春,周建萍,等. 电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流比较[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):154-159.
- SUN Xiangfei,SHU Hongchun,ZHOU Jianping,et al. Comparison of sympathetic inrush transfer characteristics between electro-magnetic and electronic current transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):154-159.
- [15] 李艳鹏,侯启方,刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备,2006,26(8):15-18.
- LI Yanpeng,HOU Qifang,LIU Chengzhi. Influence of non-periodic components on transient saturation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(8):15-18.
- [16] 郑涛,刘万顺,刘建飞,等. 基于分形理论的变压器磁滞回环拟合新方法[J]. 电网技术,2003,27(3):8-11.
- ZHENG Tao,LIU Wanshun,LIU Jianfei,et al. A new fitting method for hysteresis loop of transformer based on fractal theory[J]. Power System Technology,2003,27(3):8-11.

作者简介:



郑 涛

郑 涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:zhengtao_sf@126.com);

马玉龙(1993—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail:mayulong0107@126.com);

黄 婷(1992—),女,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:hting27@foxmail.com);

刘连光(1954—),男,吉林汪清人,教授,博士研究生导师,研究方向为电网安全运行与突变控制、电力系统规划;

白加林(1984—),男,山东枣庄人,工程师,硕士,从事电力系统继电保护运行工作(E-mail:baibjl@163.com);

高昌培(1960—),男,贵州贵阳人,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。

Attenuation law analysis of core residual magnetism for protective current transformer

ZHENG Tao¹,MA Yulong¹,HUANG Ting¹,LIU Lianguang¹,BAI Jialin²,GAO Changpei²

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Dispatching and Control Center of Guizhou Power Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The hysteresis effect of CT(Current Transformer) iron core may cause residual magnetism in its operation, which may accelerate the saturation of CT and lead to misoperation of protective relay. In view of this phenomenon, the production mechanism and influence factors of CT's residual magnetism are analyzed, based on which the attenuation law of CT's residual magnetism is mainly studied. The value of residual magnetism without residual current after short circuit current breaking can be calculated based on theoretical formula of fractal theory. Experiments are simulated in PSCAD software to obtain the attenuation law of residual magnetism when fault occurs and the primary side of CT has residual current. After the short circuit fault in the system, the magnetic flux attenuation in the CT iron core occurs in different degrees and will run along the local hysteresis loop, which neither will run in the flux basis at the fault clearing time, nor will be reduced to 0. The obtained attenuation law provides the basic theory for inhibition of residual magnetism and grid analysis of accidents.

Key words: current transformers; current transformer iron core; fractal theory; residual magnetism; saturation; attenuation law; hysteresis effect