

电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流比较

孙向飞, 束洪春, 周建萍, 夏聆峰

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 电子式电流互感器在数字化与智能变电站中大规模应用, 其特性与传统的电磁型电流互感器差异较大, 需研究电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流的特性。通过理论计算电磁型电流互感器暂态饱和后传变各次谐波的增益, 证明和应涌流导致电磁型电流互感器饱和后, 传变 2 次谐波的能力比传变基波的能力强, 故 2 次谐波比反而升高; 但分析表明经暂态饱和的电磁型电流互感器传变后和应涌流的间断角将减小。通过理论推导基于空心线圈的电子式电流互感器的传递函数, 揭示了电子式电流互感器能否正确传变和应涌流主要取决于积分时间常数和衰减时间常数, 和应涌流经电子式电流互感器传变后可能导致波形发生偏移, 但其间断角特征和 2 次谐波含量不变, 间断角和 2 次谐波制动判据不受影响。

关键词: 电流互感器; 电磁型电流互感器; 电子式电流互感器; 和应涌流; 传变特性; 差动保护; 谐波分析
中图分类号: TM 452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.025

0 引言

当变压器空载合闸或故障切除后电压恢复时, 会在相邻变压器中产生和应涌流。据文献报道, 和应涌流是导致变压器差动保护误动的原因之一^[1-5]。

目前对于和应涌流的产生机理及其特点已有较为清楚的认识, 虽然导致变压器饱和的原因不同, 但是产生励磁涌流与和应涌流的根本原因均是变压器铁芯饱和。就波形特征而言, 在一个周期内和应涌流波形与普通励磁涌流波形特征无明显区别^[6-7], 不同的是, 和应涌流中非周期分量衰减非常缓慢。非周期分量的长时间作用可能导致电磁型电流互感器暂态饱和^[8-10], 从而引起变压器差动保护误动。但是, 这些文献均未对电磁型电流互感器传变和应涌流的特性进行具体理论推导、计算和分析, 而是仅限于仿真和定性分析。

基于空心线圈的电子式电流互感器(ECT)无铁芯饱和问题, 其暂态传变特性与传统电磁型电流互感器有较大的不同^[11-12]。国内外学者针对其传变特性进行了深入的研究。文献[13]对正常状态和线路三相短路情况下 ECT 的传变特性进行了仿真分析。文献[14]通过理论分析和仿真指出积分时间常数是影响互感器对故障暂态电流直流分量响应的主要因素。文献[15]通过仿真和比较实际电路中非理想积分器在不同参数配合下的暂态特性, 确定了一套能获

得良好暂态特性的积分器参数。文献[16]通过理论推导进一步说明故障电流的测量误差关键取决于 ECT 对衰减非周期分量的刻画能力。文献[17]结合动模试验研究了采用空心线圈 ECT 的变压器差动保护性能, 指出可正确反映故障情况下各次谐波, 从而大幅度提高差动保护正确动作率。然而, 以上文献均为针对空心线圈电流互感器传变故障电流开展相关研究工作, 未研究传变励磁涌流与和应涌流特性以及对变压器差动保护的影响。

目前变压器差动保护中广泛应用的涌流识别判据仍是基于 2 次谐波制动和基于间断角闭锁原理的传统方法。本文首先理论计算经饱和和电磁型电流互感器传变后和应涌流的 2 次谐波含量的变化, 并分析电磁型电流互感器暂态饱和和对和应涌流间断角的影响; 然后通过推导空心线圈 ECT 的传递函数, 研究 ECT 传变和应涌流的特性, 说明经 ECT 传变后和应涌流波形特征的变化; 最后对比采用电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流时对变压器差动保护的影响。

1 和应涌流测量示意图

图 1 为 2 台降压变压器并联系统, 设 T_1 利用 K_1 空载合闸时产生励磁涌流, 并导致 T_2 中产生和应涌流。

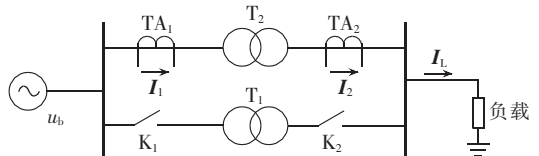


图 1 并联和应涌流的电气连接示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrical connection of parallel sympathetic inrush

由和应涌流产生机理及其衰减特点可知^[18], 励磁涌流与和应涌流方向相反, 在时间上交替出现。励磁涌流在产生的第 1 个周期即达最大值随后开始衰

收稿日期: 2014-05-06; 修回日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007035, U1202233); 云南省自然科学基金资助项目(2009ZC016M); 昆明理工大学人才培养基金资助项目(KKZ3201004003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51007035, U1202233), the Natural Science Foundation of Yunnan Province(2009ZC016M) and the Kunming University of Science and Technology Funds for Fostering Talents(KKZ3201004003)

减,而和应涌流增大到最大值后开始衰减,待和应涌流中的非周期分量衰减到与励磁涌流中的非周期分量相等时,由于二者大小相近、极性相反,即和应涌流的直流分量平衡了励磁涌流的直流分量,使得 T_1 、 T_2 公共点母线电压 u_b 趋于对称,系统侧电阻所起的衰减作用几乎消失,因而只能靠 2 台变压器各自的等效电阻来衰减,导致励磁涌流与和应涌流衰减十分缓慢。

为了对比研究,考虑 T_2 高压侧、低压侧同时使用电磁型电流互感器和同时使用 ECT 2 种情况。显然,和应涌流主要流过高压侧互感器而不是低压侧互感器。下面分析在和应涌流情况下, T_2 高压侧互感器的传变特性。

2 电磁型电流互感器暂态饱和和对和应涌流 2 次谐波含量的影响

图 2 为电磁型电流互感器的等效图,其中, L_1 、 R_1 和 L_2 、 R_2 分别为电磁型电流互感器一次侧和二次侧等效电感与电阻, L_L 、 R_L 分别为二次侧负载的等效电感与电阻, L_m 为励磁等效电感, i_1 、 i_2 、 i_m 分别为一次侧电流、二次侧电流和励磁电流。 L_2 、 R_2 、 L_L 、 R_L 为串联关系,可用 $L'_L(=L_2+L_L)$ 和 $R'_L(=R_2+R_L)$ 代替。这样图 2(a)的等效电路可转化为图 2(b)所示的电路。

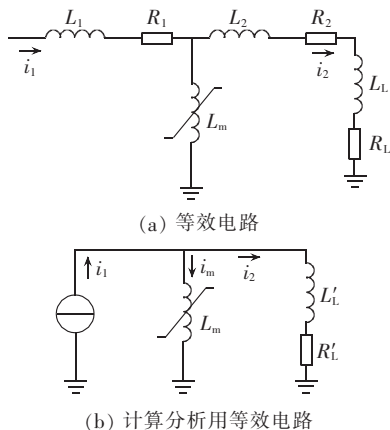


图 2 电磁型电流互感器等效电路

Fig.2 Equivalent circuits of electromagnetic CT

由图 2(b)可知,当电磁型电流互感器一次侧电流中含有长时间不衰减或衰减很慢的直流分量时,由于 R'_L 的存在,在经过一定时间后,直流分量将主要流过电磁型电流互感器的励磁支路,并在其铁芯中产生很大的直流偏磁,导致电流互感器暂态饱和。

假设电磁型电流互感器一次侧电流 i_1 中的工频分量为 $I_{1,1}$, 2 次谐波分量为 $I_{1,2}$,在和应涌流作用下,电磁型电流互感器发生暂态饱和,则其励磁电感由未饱和时的 L_m 减小为 L_{ms} 。那么,电磁型电流互感器饱和后,其一次侧电流中各个谐波分量 $I_{1,n}$ 传变到二次侧的值 $I_{2,n}$ 以及励磁电流 $I_{m,n}$ 分别为:

$$I_{2,n} = \frac{j n \omega_0 L_{ms}}{j n \omega_0 (L_{ms} + L'_L) + R'_L} I_{1,n} \quad (1)$$

$$I_{m,n} = \frac{j n \omega_0 L'_L + R'_L}{j n \omega_0 (L_{ms} + L'_L) + R'_L} I_{1,n} \quad (2)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$, 表示各次谐波; ω_0 为基波角频率。那么,各次谐波由电磁型电流互感器一次侧传变到二次侧的增益 $K_{CT}(n)$ 为:

$$K_{CT}(n) = |I_{2,n}/I_{1,n}| = \left| \frac{j n \omega_0 L_{ms}}{j n \omega_0 (L_{ms} + L'_L) + R'_L} \right| = \frac{n \omega_0 L_{ms}}{\sqrt{[n \omega_0 (L_{ms} + L'_L)]^2 + R'^2_L}} \quad (3)$$

将 $K_{CT}(n)$ 对 n 求导数得:

$$\frac{dK_{CT}(n)}{dn} = \frac{\omega_0 L_{ms} R'^2_L}{\{[n \omega_0 (L_{ms} + L'_L)]^2 + R'^2_L\}^{3/2}} \quad (4)$$

由式(4)可知 $\frac{dK_{CT}(n)}{dn} > 0$ 。因此,当电磁型电流

互感器饱和时,其传变高次谐波的能力比传变低次谐波的能力更强,二次侧电流中的 2 次谐波含量比一次侧电流中的 2 次谐波含量高,即电磁型电流互感器饱和会放大电流中的 2 次谐波含量。

对图 1 所示系统中 T_2 出现和应涌流后的情况进行仿真,电磁型电流互感器二次侧电流的基波分量与 2 次谐波分量的变化情况如图 3 所示,电磁型电流互感器一、二次侧电流的 2 次谐波含量(2 次谐波与基波的比值)如图 4 所示。由图 3 可见,在 1.26 s 和

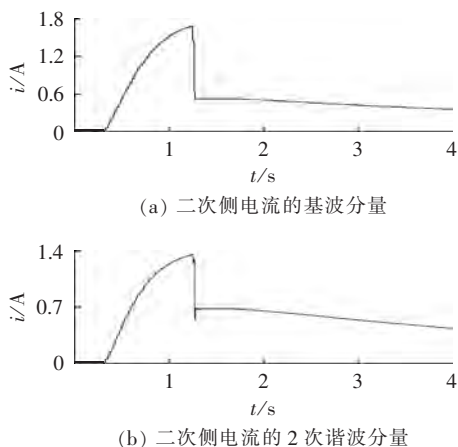


图 3 电磁型电流互感器二次侧电流的基波分量与 2 次谐波分量

Fig.3 Fundamental and second-order harmonic of electromagnetic CT secondary current

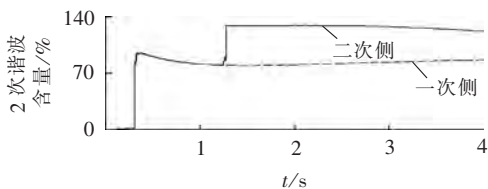


图 4 电磁型电流互感器一次侧电流与二次侧电流的 2 次谐波含量

Fig.4 Second-order harmonic of electromagnetic CT primary and secondary currents

应涌流导致电磁型电流互感器出现饱和时,基波与 2 次谐波的绝对值都出现了不同程度的下降,但基波下降得更多。因此,在电磁型电流互感器饱和之后,其二次侧电流的 2 次谐波含量将高于其一次侧电流的 2 次谐波含量,这一点可以从图 4 中证实。

3 电磁型电流互感器暂态饱和对和应涌流间断角的影响

假设在和应涌流作用下电磁型电流互感器出现暂态饱和,由式(2)可以看出, i_m 将滞后于 i_1 。通过图 5 进行分析,假定当 i_1 达到 A 点时电磁型电流互感器铁芯进入饱和,这时将出现较大的 i_m ;由于 i_m 滞后于 i_1 ,当 $i_1=0$ 时, i_m 仍可能有较大的值,电磁型电流互感器仍处于饱和段;由图 2(b)可看出,当 $i_1=0$ 时, L_m 上的电流 i_m 将在 $L_m、R_L、L'_L$ 构成的回路中以指数规律衰减,在 B 点电磁型电流互感器退出饱和; $i_2=i_1-i_m$, $i_m、i_2$ 波形将如图 5 所示。由此可见,电磁型电流互感器饱和将会使 i_2 的间断角减小,当饱和加深时,其退出饱和点 B 将向后移,若 B 点延伸到了下一个涌流出现的时刻以后, i_2 将不会出现间断,间断角将消失。

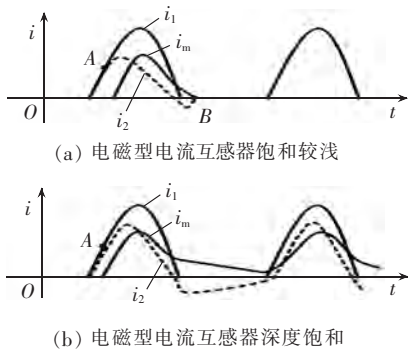


图 5 电磁型电流互感器饱和对和应涌流间断角影响的示意图

Fig.5 Schematic diagram of electromagnetic CT saturation impacting on dead-angle of sympathetic inrush

对图 1 所示系统中 T_2 出现和应涌流后造成电磁型电流互感器暂态饱和时的情况进行仿真,和应涌流间断角的变化如图 6 所示。可以看出,电磁型电流互感器在 1.26 s 饱和后出现励磁涌流,导致和应涌流的间断角变小。

4 空心线圈 ECT 传变和应涌流的特性

实际中基于空心线圈的 ECT,整个空心线圈均匀地绕在非磁性骨架上,测量电流时空心线圈环绕被测的载流导体,见图 7(a)。ECT 的传感头部分等值电路如图 7(b)中虚线框外部分所示, i_1 为被测一次侧电流, R_0 为线圈绕组和引线的电阻之和, L_0 为线圈的电感, C_0 为线圈的等效杂散电容, R_a 为取样电阻。

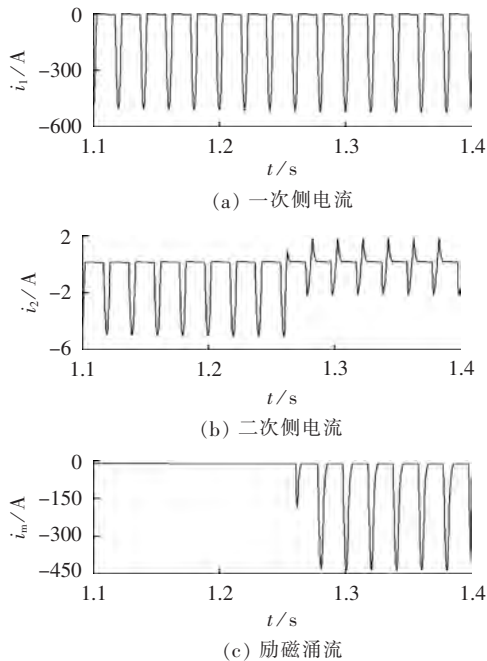


图 6 电磁型电流互感器饱和对和应涌流间断角影响的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of electromagnetic CT saturation impacting on dead-angle of sympathetic inrush

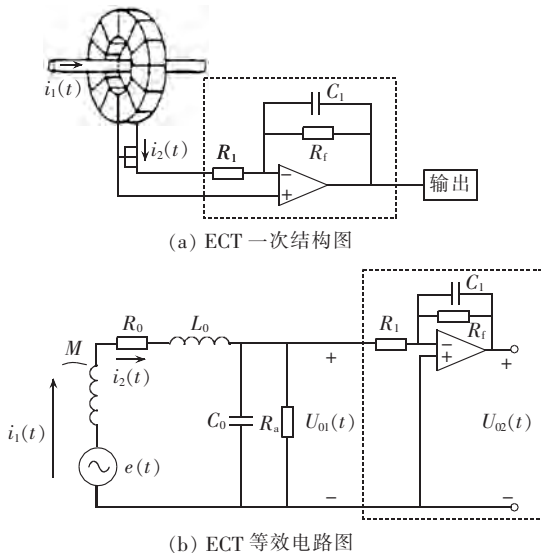


图 7 ECT 电路图

Fig.7 Equivalent circuit of ECT

由全电流定律和电磁感应定律可得线圈输出电压 $e(t)$ 和被测电流 i_1 的基本关系式:

$$e(t)=-M\frac{di_1}{dt} \tag{5}$$

其中, M 为线圈与被测线路之间的互感系数。可见,空心线圈的输出电压与被测电流满足微分关系,因此,要得到被测电流必须采用积分器还原被测电流信号。积分器性能的优化是 ECT 的关键技术之一,为使积分器长期稳定工作,实际应用中一般采用带负反馈电阻 R_f 的运放积分电路,见图 7 中虚线框内部分。

由于 C_0 非常小,故可省略。由图 7 所示等效电

路,可列出电压方程:

$$-e(t)=L_0\frac{di_2}{dt}+(R_0+R_a)i_2=M\frac{di_1}{dt}\tag{6}$$

式(6)进行拉氏变换得:

$$L_0I_2s+(R_0+R_a)I_2=MI_1s\tag{7}$$

由式(7)可得:

$$I_2=\frac{Ms}{L_0s+(R_0+R_a)}I_1\tag{8}$$

则可得取样电阻 R_a 上的电压为:

$$U_{01}=I_2R_a=\frac{MR_as}{L_0s+(R_0+R_a)}I_1\tag{9}$$

因 $R_0+R_a=L_0$,故传感头部分传递函数可近似为:

$$H_1(s)=\frac{U_{01}(s)}{I_1(s)}=\frac{MR_as}{R_0+R_a}\tag{10}$$

积分器的传递函数可表达为:

$$H_2(s)=\frac{U_{02}(s)}{U_{01}(s)}=\frac{K}{1+\tau_1s}\tag{11}$$

其中, K 为放大系数; $\tau_1=R_1C_1$ 为积分时间常数。故可得 ECT 的整体传递函数为:

$$H(s)=H_1(s)H_2(s)=\frac{MR_as}{R_0+R_a}\frac{K}{1+\tau_1s}=\frac{KMR_a}{(R_0+R_a)\tau_1}\frac{\tau_1s}{1+\tau_1s}\tag{12}$$

令 $A=\frac{KMR_a}{(R_0+R_a)\tau_1}$,那么 A 为常系数;令 $H_3(s)=$

$\frac{\tau_1s}{1+\tau_1s}$,由此表达式可知该电路不能传变纯直流分

量($s=0$),即 $H_3(s)$ 相当于一个隔直环节。一阶惯性环节与理想积分环节的波特图如图 8 所示,可见一阶惯性环节与理想积分环节在高频段的传变一致性很好,而在低频段有较大出入,并且积分时间常数 τ_1 越大则可传变的频率越低。因此,用一阶惯性环节代替理想积分环节后 ECT 的低频传变特性变差。

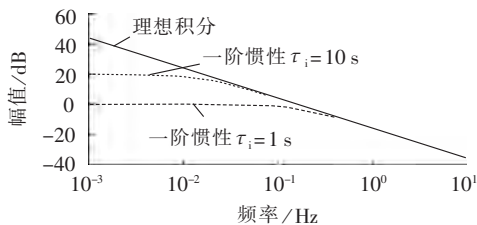


图 8 理想积分与一阶惯性环节的波特图
Fig.8 Bode plots of ideal integrator and first-order inertial element

由于 ECT 不含铁芯,不存在电磁型电流互感器的饱和问题,因此研究一次电流为和应涌流时 ECT 的传变跟随特性,可用叠加原理进行分析,即分别研究互感器对和应涌流各分量的响应。由以上分析可知,空心线圈电流互感器传变和应涌流的能力关键取决于 ECT 对衰减十分缓慢的非周期分量的响应。

和应涌流的衰减时间常数 τ 越大则非周期分量

衰减越缓慢,即非周期分量的频率越低。由上述分析可知,ECT 对频率很低的非周期分量的刻画能力与积分时间常数 τ_i 密切相关。因此简言之,非周期分量的传变误差主要取决于衰减时间常数和积分时间常数。对于大型变压器,和应涌流的衰减时间常数很大,长达数十秒。积分时间常数 τ_i 取不同值时 ECT 对和应涌流中非周期分量的响应见图 9。可见,积分时间常数 τ_i 越大则对和应涌流的衰减非周期分量的跟随特性越好,与前述理论推导一致。

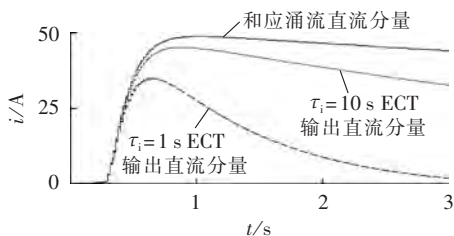
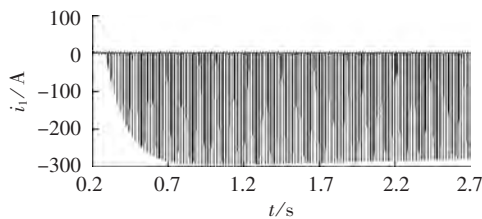


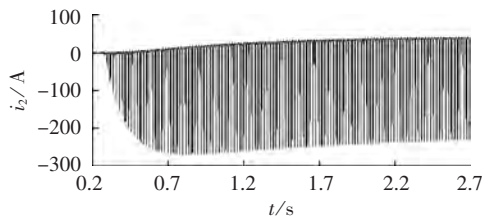
图 9 不同积分时间常数时 ECT 对和应涌流中直流分量的响应波形

Fig.9 DC component of sympathetic inrush and ECT output for different integral time constants

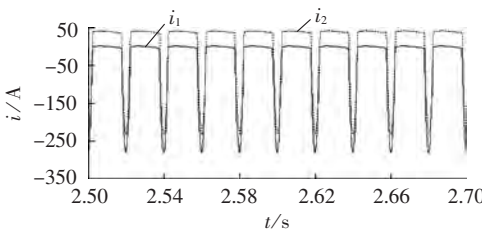
$\tau_i=1\text{ s}$ 时经 ECT 传变前后的和应涌流及其局部放大波形如图 10 所示。由图 10 可见,由于和应涌流的衰减时间常数很大,ECT 不能完全传变其非周期分量,经 ECT 传变的和应涌流就“丢失”了一部分衰减直流分量,使得本应完全偏向时间轴一侧的和



(a) ECT 一次侧电流



(b) ECT 二次侧电流



(c) 局部放大波形

图 10 经 ECT 传变的和应涌流

Fig.10 Waveforms of sympathetic inrush transferred by ECT

应涌流波形发生偏移。

5 电磁型与电子式电流互感器传变特性对差动保护的影响

由于产生励磁涌流与和应涌流的根本原因均是变压器铁芯饱和,故和应涌流与励磁涌流在“微观”上(一个周期内)特性相同,均含很大比例的衰减非周期分量和大量的 2 次谐波,波形出现间断;不同的是,和应涌流中非周期分量衰减十分缓慢。因此,实际运行中现有变压器差动保护的励磁涌流识别判据对和应涌流是否有效,关键取决于电流互感器的传变特性。

从前面的分析可见,在和应涌流中衰减非常缓慢的直流分量长时间作用下,将导致电磁型电流互感器的铁芯暂态饱和,出现励磁涌流。一方面,使得电磁型电流互感器传变基波与 2 次谐波的能力均下降,但是理论推导表明其饱和后传变高次谐波的能力更强,故经饱和电磁型电流互感器传变的和应涌流,2 次谐波与基波的比值反而提高,因而对于采用 2 次谐波制动原理的差动保护无影响。另一方面,经饱和电磁型电流互感器传变后将使得和应涌流的间断角减小,并且饱和越严重则间断角减小得越多,因而当和应涌流中的非周期分量造成电磁型电流互感器深度饱和时,将可能导致采用间断角制动原理的差动保护不能可靠闭锁而误动作。

基于空心线圈的 ECT 虽然不存在饱和问题,但由于输出必须采用积分器还原被测电流信号,因而能否正确传变和应涌流关键在于 ECT 是否能够传变衰减十分缓慢的非周期分量。换言之,非周期分量的传变误差主要取决于后续的积分电路能否准确地将微分信号还原为衰减直流。通过前述分析和仿真可知,由于实际工程中利用一阶惯性环节代替理想积分环节,使得其不能传变纯直流分量,并且积分器的时间常数 τ_i 越大,其可传变的频率越低,而积分器的时间常数有限,因而造成经 ECT 传变的和应涌流波形发生偏移(见图 10(c)),但偏移后的波形间断角特征并未消失,故不会对间断角的判别产生影响,即间断角制动判据有效。ECT 作为新型的无饱和互感器,可传变各次谐波,因此经 ECT 传变的和应涌流,2 次谐波含量不变,故不会影响 2 次谐波制动判据的有效性。

6 结论

a. 通过理论推导各次谐波由电磁型电流互感器一次侧传变到二次侧的增益,结果表明当电磁型电流互感器暂态饱和时,其传变高次谐波的能力比传变低次谐波的能力强,即经饱和和电磁型电流互感器传变的和应涌流,2 次谐波含量将升高。

b. 经暂态饱和和电磁型电流互感器传变的和应涌

流间断角将减小,并且饱和越严重则和应涌流幅值越大、间断角减小得越多。

c. ECT 传变和应涌流的能力关键取决于 ECT 对衰减十分缓慢的非周期分量的响应,积分时间常数越大则对衰减非周期分量的跟随特性越好,同时传变误差随和应涌流的衰减时间常数的增大而增大。经 ECT 传变的和应涌流波形将发生偏移,但其间断角特征不会消失,2 次谐波含量不变,因此间断角和 2 次谐波制动判据不受影响。

参考文献:

- [1] 李鹏,李莉,李玉海. 电力主设备继电保护存在的问题及对策[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):141-145.
LI Peng,LI Li,LI Yuhai. Problems of protections for main equipment and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):141-145.
- [2] 余高旺,毕大强,王志广,等. 变压器和应涌流现象及实例分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):20-23.
YU Gaowang,BI Daqiang,WANG Zhiguang,et al. Phenomenon of sympathetic inrush and analysis of an example[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):20-23.
- [3] 谷君,郑涛,刘万顺,等. 基于平方根滤波法参数辨识的变压器保护新方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):27-30.
GU Jun,ZHENG Tao,LIU Wanshun,et al. Parameter identification based on square-root algorithm for transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):27-30.
- [4] 李德佳,王维俭,毕大强. 变压器暂态饱和与和应涌流实例分析[J]. 高压电器,2005,41(1):12-15.
LI Dejia,WANG Weijian,BI Daqiang. Analysis of transient saturation and sympathetic inrush of transformers[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(1):12-15.
- [5] 李立新,束洪春. 变压器电压恢复涌流分析[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):59-63.
LI Lixin,SHU Hongchun. Research on recovery inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):59-63.
- [6] 武万才,边疆,吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):112-115.
WU Wancai,BIAN Jiang,WU Zhiyong. Principle and characteristics of transformer sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):112-115.
- [7] 束洪春,贺勋,李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备,2006,26(10):7-12.
SHU Hongchun,HE Xun,LI Lixin. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(10):7-12.
- [8] 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.
- [9] 张雪松,何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(14):12-17.
ZHANG Xuesong,HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(14):12-17.

- [10] 毕大强,孙叶,李德佳,等. 和应涌流导致差动保护误动原因分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(22):36-40.
BI Daqiang,SUN Ye,LI Dejia,et al. Analysis on mal-operation of differential protection caused by sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(22):36-40.
- [11] 余祥坤,吕艳萍,杨丽,等. 与ECT混合用于差动保护的电磁型CT的校验方法[J]. 电网技术,2012,36(10):275-280.
YU Xiangkun,LÜ Yanping,YANG Li,et al. A verification method for electromagnetic current transformers mixedly applied in differential protection with electronic current transformers[J]. Power System Technology,2012,36(10):275-280.
- [12] 殷伯云,罗志娟,杨丽,等. 主变差动保护采用不同原理CT的仿真研究[J]. 电网技术,2013,37(1):281-286.
YIN Boyun,LUO Zhijuan,YANG Li,et al. Simulation analysis of power transformer differential protection adopting current transformer based on different principles[J]. Power System Technology,2013,37(1):281-286.
- [13] 张霖,吕艳萍. 光电式电流互感器传感特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):68-71.
ZHANG Lin,LÜ Yanping. Simulation analysis of optical current transducer characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):68-71.
- [14] 徐雁,毕然. 空心线圈电流传感器对暂态电流响应的仿真分析[J]. 电工技术学报,2004,19(11):61-65.
XU Yan,BI Ran. Analysis and simulation of air-core coil transducer's response to transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(11):61-65.
- [15] 李伟,尹项根,陈德树,等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器暂态特性研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):34-37.
LI Wei,YIN Xianggen,CHEN Deshu,et al. Transient characteristics of Rogowski coil-based current sensor[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):34-37.
- [16] 何瑞文,蔡泽祥,王奕,等. 空心线圈电流互感器传变特性及其

- 对继电保护的适应性分析[J]. 电网技术,2013,37(5):1471-1476.
HE Ruiwen,CAI Zexiang,WANG Yi,et al. Analysis on transfer characteristics of air-core current transformer and its adaptability to relay protection[J]. Power System Technology,2013,37(5):1471-1476.
- [17] 韩小涛,李伟,尹项根,等. 应用电子式电流互感器的变压器差动保护研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(4):47-53.
HAN Xiaotao,LI Wei,YIN Xianggen,et al. Applying electronic current transformer to transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(4):47-53.
- [18] 孙向飞,束洪春,于继来. 变压器并联与串联和应涌流对差动保护影响的比较研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):36-41.
SUN Xiangfei,SHU Hongchun,YU Jilai. Comparison of sympathetic inrush influence on differential protection between parallel and series transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):36-41.

作者简介:



孙向飞

孙向飞(1977—),女,云南个旧人,副教授,博士,从事电力系统新型继电保护与故障测距、变压器涌流问题研究(E-mail:fly_beauty@163.com);

束洪春(1961—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事新型继电保护与故障测距、电力系统稳定与控制等方面研究(E-mail:kmshe@sina.com);

周建萍(1989—),女,浙江临安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统新型继电保护、变压器涌流(E-mail:fqyd926@163.com);

夏聆峰(1990—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统新型继电保护、高压直流线路保护(E-mail:lingfeng_xia@sina.com)。

Comparison of sympathetic inrush transfer characteristics between electromagnetic and electronic current transformers

SUN Xiangfei,SHU Hongchun,ZHOU Jianping,XIA Lingfeng

(Department of Electrical Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500,China)

Abstract: Since the electronic CT(Current Transformer) is now widely used in smart substations and its current transfer characteristics are quite different from those of traditional electromagnetic CT,it is necessary to compare the sympathetic inrush transfer characteristics between electronic and electromagnetic CTs. The transfer gain of transiently saturated electromagnetic CT is theoretically calculated for the harmonic of different orders,which shows that,after the electromagnetic CT is saturated by the sympathetic inrush,its transfer capability for the second-order harmonic is better than that for the fundamental,resulting in the increased second-order harmonic ratio and reduced dead-angle of the transferred sympathetic inrush. The transfer function of electronic CT based on air-core is theoretically deduced,which shows that,the proper sympathetic inrush transfer depends mainly on its integral time constant and decay time constant;the waveform of transferred sympathetic inrush is possibly shifted,but its dead-angle characteristics and second-order harmonic ratio are unchanged,resulting in the uninfluenced dead-angle and second-order harmonic restraint criteria.

Key words: current transformer; electromagnetic current transformer; electronic current transformer; sympathetic inrush; transfer characteristic; differential protection; harmonic analysis