

直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响

郭一飞, 高厚磊

(山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 高压直流输电和地磁感应电流引起的直流偏磁现象日趋严重, 分析其对电流互感器暂态传变特性的影响十分必要。通过建立等效分析模型, 针对直流偏磁及故障起始角对于电流互感器暂态传变特性, 特别是对起始饱和时间的影响进行了详细的推导和分析。通过 MATLAB 程序对某实际电网中运行的电流互感器暂态传变特性参数进行计算, 得出偏磁电流大小与起始饱和时间、二次电流的基波和 2 次谐波的定量关系。分析结论为了解电流互感器在偏磁条件下的工作状况以及继电保护装置的整定提供了参考。

关键词: 直流偏磁; 互感器; 故障起始角; 起始饱和时间; 故障电流; 基波; 2 次谐波; 暂态

中图分类号: TM 55

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.019

0 引言

高压直流输电(HVDC)^[1-4]工程和地磁感应电流(GIC)^[5-7]造成的电力系统直流偏磁现象日益严重, 严重威胁着电力系统某些电磁设备的安全运行。直流偏磁现象是指电磁设备中励磁电流含有直流分量, 使得铁芯的工作点发生偏置, 极易造成铁芯的半波饱和。

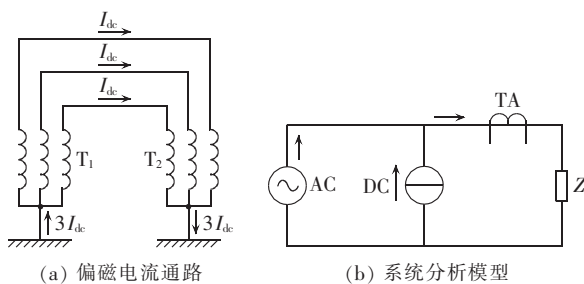
电流互感器(TA)作为电网中重要的电力设备, 在电能计量和继电保护中起到重要作用, 对于保护用 TA, 其暂态传变特性^[8-10]对继电保护装置的正确动作有重要影响。文献[11-12]对保护用 TA 在故障电流全偏移条件下的暂态传变特性进行了定性分析, 并基于估计的参数对 TA 直流偏磁条件下的暂态特性进行了仿真计算, 得出了偏磁电流与起始饱和时间的关系。但之前的研究通常采用仿真软件中提供的 TA 模型以及研究者假定的故障参数, 这不能直接反映实际工程条件下直流偏磁对 TA 工作状况的影响, 且仅选取故障电流全偏移时进行分析, 而针对故障起始角的影响分析很少涉及。本文对直流偏磁条件下 TA 暂态传变特性进行了详细推导和分析, 并引入故障起始角的影响, 给出故障起始角对 TA 暂态特性的影响机理分析以及计算结果, 提出与之前的研究有所不同的观点。并选取工程中应用的 TA, 通过实验获得了其各项参数及励磁曲线, 对直流偏磁条件下该 TA 暂态特性进行了计算, 得出不同偏磁电流和故障起始角条件下的临界故障电流, 以及偏磁电流和故障起始角对起始饱和时间、二次电流基波和 2 次谐波的定量影响。

1 模型建立

1.1 一次电流分析模型

根据直流偏磁产生的机理, 偏磁电流产生的根本原因是地表电势分布不均, 两变压器中性点接地处有电势差, 使得直流窜入交流系统, 所以对于偏磁电流的模型可以由图 1(a)简单表示^[13]。而在下文的分析中, 以理想的直流量 I_{dk} 来等效偏磁电流。

当考虑直流偏磁问题时, 整个系统的等效模型如图 1(b)所示, 偏磁电流等效为一个直流电流源, 在分析 TA 暂态传变特性时, 故障前认为流过 TA 一次侧电流为正常负荷电流和偏磁电流之和, 故障后为含偏磁电流分量的故障电流。



(a) 偏磁电流通路

(b) 系统分析模型

图 1 一次电流模型

Fig.1 Model of primary current

1.2 TA 分析模型

TA 的暂态特性取决于铁芯的性质, 描述较为完善的模型有基于 Jiles-Atherton 铁磁材料现象学理论的 J-A 模型^[14-16]和非线性等效时域模型(LUCAS 模型)^[14,17]等。在实际中, 分析 TA 暂态传变特性, 主要是针对其在故障电流下的饱和特性, 因此作如下简化(如图 2(a)所示, 等效至 TA 二次侧): 将励磁支路等效为一个具有饱和特性的可变电感 L_μ ; $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ 为 TA 二次侧负载总和, 其包括 TA 自身二次侧阻抗以及外接负载。对 TA 铁芯励磁特性的描述模型采用基本磁化曲线模型(如图 2(b)所示), 铁芯的

收稿日期: 2015-03-02; 修回日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177094)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177094)

基本磁化曲线描述了 TA 的饱和特性,且便于进行暂态特性分析,并且在工程中可以通过 TA 的伏安特性曲线转化获得。

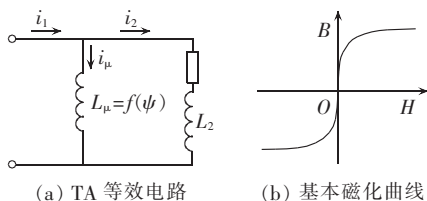


图 2 电流互感器分析模型

Fig.2 Analysis model of CT

2 影响分析

2.1 磁链和励磁电流数学描述

当一次系统发生接地故障时,一次系统故障电流 i_p 可以表示为:

$$i_p = I_{pm} [-\cos(\omega t + \theta) + \cos \theta \cdot e^{-t/T_1}] + I_{dc} \quad (1)$$

其中, I_{pm} 为无偏磁时故障电流的稳态峰值; T_1 为一次系统时间常数; θ 为故障起始角,取 $0 \sim \pi/2$; I_{dc} 为偏磁电流。

取 $i_1 = i_p / K_n$, 为故障电流归算至 TA 二次侧的值,其中, $K_n = N_1 / N_2$ 为 TA 额定电流比。

由 TA 的等值电路知,铁芯饱和前,励磁电感 L_μ 近似看作常数不变,微分方程可描述 TA 的暂态过程:

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{\psi}{T_2} = \frac{L_\mu}{T_2} i_1 + q L_\mu \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

其中, $T_2 = (L_\mu + L_2) / R_2$, 为二次回路的时间常数; $q = L_2 / (L_\mu + L_2)$ 表征负载电感的相对大小。

令 $\psi_{(0)} = \psi_{dc} = L_\mu I_{dc} / K_n$, 可得磁链暂态表达式为:

$$\begin{aligned} \psi = & \frac{L_\mu I_{dc}}{K_n} + \frac{L_\mu I_{pm}}{K_n} \frac{T_1 - qT_2}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \cos \theta + \\ & \frac{L_\mu I_{pm}}{K_n} \frac{(1 + q\omega^2 T_2^2) \cos \theta + (1 - q)\omega T_2 \sin \theta}{1 + \omega^2 T_2^2} e^{-t/T_2} - \\ & \frac{L_\mu I_{pm}}{K_n} \frac{(1 - q)\omega T_2}{1 + \omega^2 T_2^2} \sin(\omega t + \theta) - \\ & \frac{L_\mu I_{pm}}{K_n} \frac{1 + q\omega^2 T_2^2}{1 + \omega^2 T_2^2} \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

通常情况下 $\omega^2 T_2^2 \gg 1$, $L_\mu \gg L_2$, 上式可简化为:

$$\begin{aligned} \psi = & \psi_{dc} + \psi_m \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \cos \theta + \right. \\ & \left. \sin \theta \cdot e^{-t/T_2} - \sin(\omega t + \theta) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\psi_{dc} = \frac{L_\mu I_{dc}}{K_n}, \quad \psi_m = \frac{L_\mu I_m}{K_n}$$

又因为 $\psi = L_\mu i_\mu$, 所以有:

$$\begin{aligned} i_\mu = & \frac{I_{dc}}{K_n} + \frac{I_{pm}}{\omega T_2 K_n} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \cos \theta + \right. \\ & \left. \sin \theta \cdot e^{-t/T_2} - \sin(\omega t + \theta) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,偏磁电流将完全作为励磁电流的一部分而不能传变到 TA 的二次侧,因此偏磁电流产生的偏磁磁通将作为铁芯磁通的恒定组成部分,使得铁芯的工作点发生偏置,导致 TA 容易出现暂态饱和现象。

2.2 对起始饱和和时间影响分析

起始饱和时间^[18-19]是 TA 重要的暂态性能指标之一,TA 的起始饱和时间对于继电保护正确可靠动作有重要影响。令铁芯饱和磁链为 ψ_{sat} , TA 起始饱和时间为 t_s , 当铁芯达到饱和的瞬间有:

$$1 = K_{dc} + K_m \left[(\omega T_1 T_2) / (T_1 - T_2) (e^{-t_s/T_1} - e^{-t_s/T_2}) \cos \theta + \sin \theta \cdot e^{-t_s/T_2} - \sin(\omega t_s + \theta) \right] \quad (6)$$

其中, $K_{dc} = \psi_{dc} / \psi_{sat} \propto I_{dc}$, $K_m = \psi_m / \psi_{sat} \propto I_m$, 分别表征偏磁电流大小和故障电流周期分量的幅值大小。

上式可归结为 $t_s = f(\theta, K_{dc})$, 经数学分析可知,该函数为非线性的隐函数,理论上没有其解析表达式,可通过铁芯磁通密度的图像进行分析。

图 3 为直流偏磁对起始饱和时间的影响。由图 3 可知,当正向偏磁($K_{dc} > 0$),与非周期分量方向一致,铁芯饱和磁密约为 1.8 T 时,TA 偏置点为正,相对于无偏磁时起始饱和时间减小,加剧了 TA 饱和;而当反向偏磁($K_{dc} < 0$)时,TA 偏置点为负,起始饱和时间增大,延缓 TA 的暂态饱和。

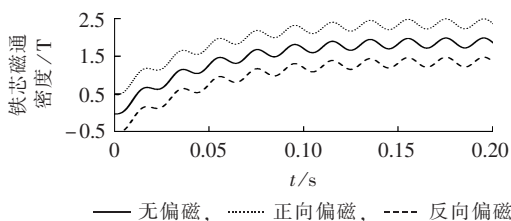


图 3 直流偏磁对起始饱和时间的影响

Fig.3 Effect of DC bias on initial saturation time

图 4 为故障起始角对起始饱和时间的影响。由图 4 可知,当故障电流周期分量幅值一定时,不同的故障起始角使得 TA 的暂态过程不同。因此,故障起始角对起始饱和时间的影响,可分成下面 2 种情况讨论。

a. 若故障电流幅值不大(不超过 TA 一次侧额定电流的 30 倍,根据在后文中有体现),如图 4(a)所示,TA 一般在故障后 2~5 个周期发生饱和,此时故障起始角对起始饱和时间的影响主要体现在磁通的非周期分量。因此, θ 越接近 0, 非周期分量越大,偏磁电流达到饱和和越快。例如,图 4(a)中, $\theta = 0$ 时的起始饱和时间明显小于 $\theta = \pi/6$ 时的起始饱和时间。

b. 若故障电流幅值很大(超过 TA 一次侧额定电流的 30 倍),有可能在故障后的第 1 个周期内 TA 迅速发生饱和,此时磁通的非周期分量较小,因而周

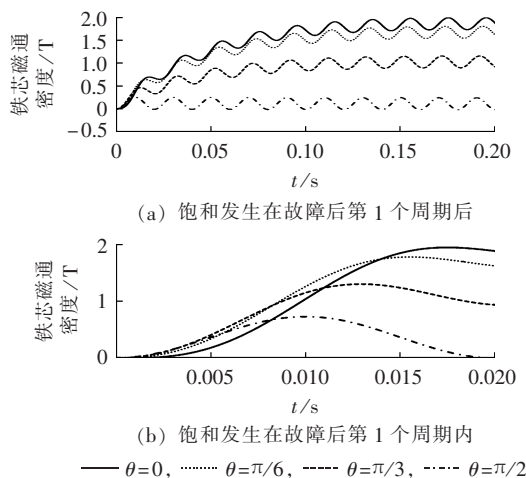


图 4 故障起始角对起始饱和时间的影响

Fig.4 Effect of initial fault angle on initial saturation time

期分量的影响作用变得明显,故障起始角对起始饱和时间的影响变得复杂,不再是单调的关系,2.3 节给出了详细的分析。

综上可知,仅正向偏磁(偏磁电流与非周期分量方向一致)才会加剧 TA 的暂态饱和,所以下文中的分析和计算仅针对发生正向偏磁的情况;且由于若 TA 在故障后第 1 个周期内发生饱和,对继电保护装置的威胁更严重,因此,本文仅研究第 1 个周期内出现的饱和情况。

2.3 故障起始角与起始饱和时间的关系

这里,针对第 1 个周期内出现饱和的情况,给出故障起始角与起始饱和时间的关系,分析如下。

本文中,称故障电流周期分量幅值一定时,起始饱和时间最小的故障起始角为最危险故障起始角,用 θ_r 表示。

取 $T_1=0.05\text{ s}$ 、 $T_2=3.2\text{ s}$ 、 $K_{dc}=0$,计算出故障起始角与起始饱和时间的关系如图 5 和表 1 所示。

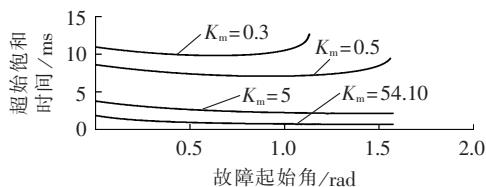


图 5 故障起始角与起始饱和时间的关系

Fig.5 Relationship between initial fault angle and initial saturation time

表 1 K_m 与 θ_r 的关系

Table 1 Relationship between K_m and θ_r

K_m	θ_r
(0,0.19)	不发生饱和
(0.19,54.10)	$(0,\pi/2)$
$(54.10,+\infty)$	$\pi/2$

K_m 取不同的值时,故障起始角与起始饱和时间

关系不同。 K_m 小于一定值时,第 1 个周期不发生饱和,随着 K_m 增大,第 1 个周期出现饱和, $0<\theta_r<\pi/2$;当 K_m 大于一定值后, $\theta_r=\pi/2$ 。

因此,当饱和出现在第 1 个周期内,且起始饱和时间取最小值时,所对应的故障起始角不是 0。在分析特大电流引起 TA 饱和的问题时,应该充分考虑 θ_r 的取值。

3 定量计算

本节中,将对于目前工程中的所用的保护用 TA,在遇到的一次系统发生故障时,TA 是否会发生暂态饱和以及暂态饱和的程度进行编程计算。通过临界电流值、起始饱和时间、基波和谐波等数据体现 TA 的暂态特性。

3.1 计算方法及参数的选取

选取某地区电网变电站中 220 kV 保护用(P 级)TA 作为计算对象,其额定电流比为 1 200 A/5 A,额定负载 $60\text{ V}\cdot\text{A}$ 、 $\cos\varphi=0.8$ 。其伏安曲线可由 TA 的伏安特性实验测得(见表 2),通过文献[20]中的方法可将 U - I 曲线转化为 ψ - i 曲线如图 6 所示。对于一次系统,根据该地区电网的继电保护的整定方案,目前该线路出口短路电流整定值为 11.949 kA。220 kV 系统时间常数取值范围一般为 40~60 ms,在本文计算中,取一次系统时间常数 $T_1=50\text{ ms}$ 。

表 2 电流互感器伏安特性实验数据

Table 2 Experimental data of CT volt-ampere characteristic

U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA
1.001	1.609	269.700	107.600	396.600	317.200
3.004	3.394	282.700	115.300	409.000	395.100
5.346	5.148	394.700	123.200	419.600	496.100
9.541	7.848	305.900	131.600	429.000	629.200
16.930	11.980	316.200	140.600	437.000	802.900
30.140	18.230	325.800	150.100	444.600	1 031.000
43.240	22.530	334.800	160.400	451.400	1 332.000
61.770	29.240	343.200	171.500	458.000	1 731.000
85.570	37.690	351.200	183.700	464.000	2 254.000
125.700	49.220	358.600	197.000	469.700	2 936.000
189.100	70.110	365.800	211.700	475.000	3 814.000
235.400	90.620	382.300	257.600	479.900	4 933.000

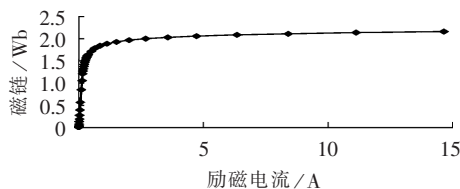


图 6 ψ - i 曲线

Fig.6 Curve of ψ vs. i

在进行暂态计算时,将微分方程式(2)转化为差分方程处理[21],并且为提高计算精度,使得计算结果更贴合实际,在整个暂态计算过程中励磁电感 L_μ 不能

视为常数,通过分段线性化的方法来实现 L_{μ} 的取值。

对二次电流的波形分析,采用全波傅氏算法^[22-23]求其基波和 2 次谐波,某时刻的计算值是计及该时刻点前 1 个周期内的采样数据计算得出。

3.2 计算结果

通过 MATLAB 程序对 TA 暂态特性进行计算,通常情况下,220 kV 线路的继电保护装置,其故障判断过程通常在短路发生后 1 个周期内完成,若 TA 在故障后 1 个周期内就发生严重饱和,将会严重威胁继电保护装置的正确动作。

3.2.1 临界故障电流

表 3 为不同故障起始角条件下,TA 在故障后第 1 个周期内发生饱和时短路电流周期分量临界值,该临界值用 TA 额定一次电流倍数 $K_s=I_{pm}/(\sqrt{2} I_{nl})$ 来表示, I_{nl} 为 TA 额定一次电流。

表 3 临界故障电流值
Table 3 Critical fault currents

偏磁 电流/A	K_{dc}	K_s			
		$\theta=0$	$\theta=\pi/6$	$\theta=\pi/3$	$\theta=\pi/2$
0	0	31.7	34.4	46.8	83.0
20	0.074	29.7	32.2	43.8	77.6
50	0.184	26.8	29.2	39.6	70.0
100	0.369	24.1	26.2	35.6	62.7

由表 3 数据可知,对于某一确定的故障起始角,随着偏磁电流增大,短路电流的临界值减小,这表明正向偏磁电流会加剧 TA 的饱和。在偏磁电流一定的前提下,随着故障起始角的增大,临界值不断增大,且影响明显。上述结论符合上文定性分析结果。当短路电流取整定值 11.949 kA,偏磁电流取 100 A ($K_{dc}=0.369$)时,由 MATLAB 程序计算可知,TA 故障后第 1 个周期不会发生饱和,这符合表 3 结果($K_s=9.96<24.1$)。

3.2.2 起始饱和时间

直流偏磁条件下的电流波形如图 7 所示,分别在 $\theta=0$ 、 $K_s=30$ 和 $\theta=\pi/3$ 、 $K_s=50$ 这 2 种情况下进行分析,取故障时刻为 $t=20$ ms,偏磁电流大小为 100 A ($K_{dc}=0.369$)。

由图 7 可知,当 $\theta=0$ 、 $K_s=30$ 时,偏磁电流使得无偏磁时本不发生饱和的 TA 出现严重饱和。当 $\theta=\pi/3$ 、 $K_s=50$ 时,饱和发生在故障后前半个周期内,偏磁电流使得起始饱和时间提前约 2.5 ms。

图 8 更加直观地表明偏磁电流大小以及故障起始角对起始饱和时间的影响。 $K_s=30$ 时,取 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi/6$ 对比分析可知,当 $\theta=0$ 时,当偏磁电流超过 16 A ($K_{dc}=0.059$),饱和进入第 1 个周期;而当 $\theta=\pi/6$ 时,偏磁电流超过 41.5 A ($K_{dc}=0.153$),饱和进入第 1 个周期,基本上有 $t_s(\theta=\pi/6)<t_s(\theta=0)$ 。

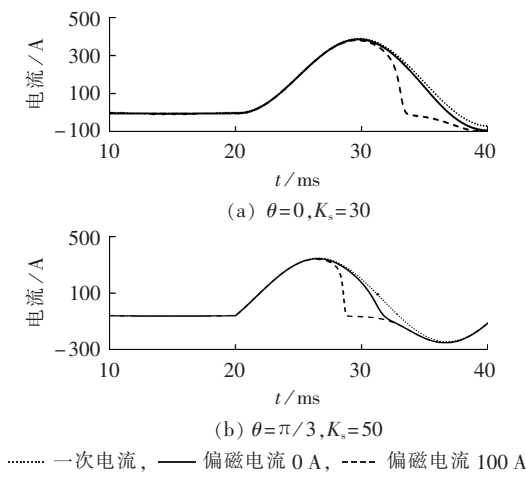


图 7 直流偏磁条件下的电流波形
Fig.7 Current waveforms of CT with DC bias

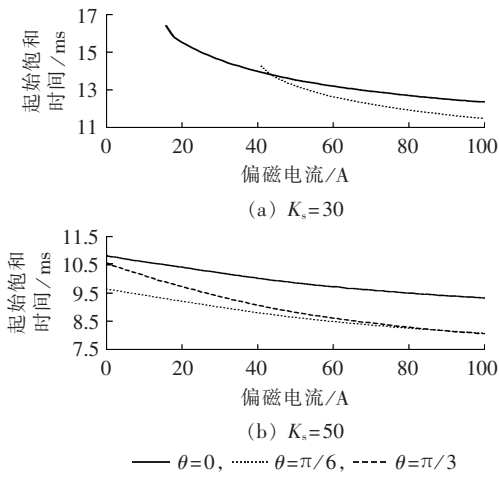


图 8 I_{dc} 与 t_s 的关系
Fig.8 Relationship between I_{dc} and t_s

当 $K_s=50$ 时, θ 取 0、 $\pi/6$ 和 $\pi/3$ 对比分析可知,起始饱和时间的关系为 $t_s(\theta=\pi/6)<t_s(\theta=\pi/3)<t_s(\theta=0)$ 。且无论 K_s 取值为多少,随着偏磁电流增大,起始饱和时间都会减小。

总体而言,偏磁电流会使得本不发生饱和的 TA 提早进入饱和状态,或加剧本已发生饱和的 TA,并且随偏磁电流增大,起始饱和时间减小。若 TA 在故障后第 1 个周期内发生饱和,一般会发生在故障后半周期附近,通常不会发生在第 1 个周期的末端,这是因为第 1 个周期的末端为周期分量的负半周,有去磁作用,饱和不易发生。

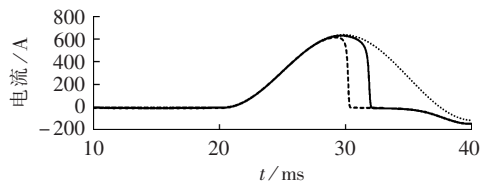
3.2.3 基波及 2 次谐波

目前,一些微机型继电保护是通过电流采样并依据各种算法求解出应用于故障判断的数据。基波和 2 次谐波作为重要根据,应用于保护。

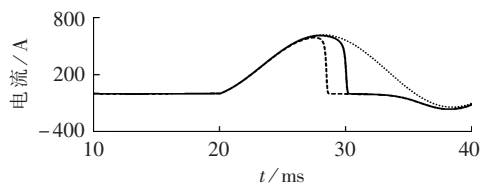
取 $K_s=50$,分别在 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi/6$ 时通过全波傅氏算法提取基波和 2 次谐波幅值,每周采样个数为 20。由于一次电流经折算后,偏磁电流的影响很小,所以一次电流相应的计算值仅考虑无偏磁时的情

况。图 9 为原始电流波形,图 10 和图 11 中的一次电流所指曲线为无偏磁时一次电流的基波和 2 次谐波计算值,其余 2 条曲线分别为不同偏磁电流条件下的二次电流相应的计算值。

根据图 10(a)和 10(b)可知,无偏磁电流时,大



(a) $\theta=0$

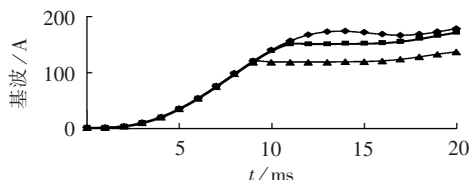


(b) $\theta=\pi/6$

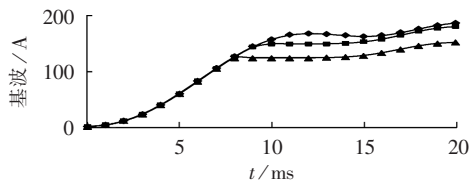
..... 一次电流, —— 偏磁电流 0 A, ---- 偏磁电流 100 A

图 9 电流波形

Fig.9 Current waveforms



(a) $\theta=0$

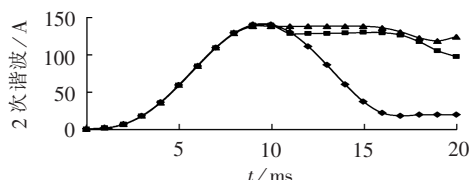


(b) $\theta=\pi/6$

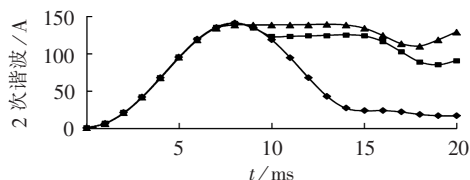
—— 一次电流, —— 偏磁电流 0 A, —— 偏磁电流 100 A

图 10 基波曲线

Fig.10 Fundamental waveforms



(a) $\theta=0$



(b) $\theta=\pi/6$

—— 一次电流, —— 偏磁电流 0 A, —— 偏磁电流 100 A

图 11 2 次谐波曲线

Fig.11 2nd-order harmonic waveforms

约故障后 11 ms($\theta=0$)和 9 ms($\theta=\pi/6$)基波计算值开始偏离真实值(一次电流的基波计算值),偏磁电流加速 TA 饱和,使得分别在故障后 9 ms($\theta=0$)和 8 ms($\theta=\pi/6$)之后开始偏离真实值;且偏磁电流使基波计算值与真实值的误差变大。由此可知,偏磁电流对于基波值的提取可能造成严重误差,特别是短路电流幅值越大、TA 饱和越严重时,误差越明显。

在故障电流周期分量相等的前提下,故障起始角对基波的计算值大小影响不明显, $\theta=\pi/6$ 时比 $\theta=0$ 时基波计算值与真实值的偏离点提前出现,这与之前对起始饱和时间的分析相符。

根据 2 次谐波曲线(图 11)可知,2 次谐波含量在 TA 发生饱和之后激增。无偏磁电流时二次电流已发生严重畸变,偏磁电流的存在会使 2 次谐波含量进一步增大。因此,若将 2 次谐波含量应用于保护中时,需重视偏磁电流的影响。

故障起始角对 2 次谐波的计算值大小影响不明显,但 $\theta=\pi/6$ 比 $\theta=0$ 时 2 次谐波计算值开始偏离真实值(一次电流的 2 次谐波计算值)的时刻提前大约 1 ms。

4 结论

a. 偏磁电流会缩短 TA 的起始饱和时间,使得临界故障电流值减小,暂态饱和极有可能出现在故障后第 1 个周期内,严重威胁继电保护装置的正确动作。

b. 故障起始角对 TA 的暂态转变特性有直接影响。当故障电流周期分量幅值不大时,TA 一般在故障后 2~5 个周期内发生饱和,故障起始角越接近 0,起始饱和时间越小,TA 暂态饱和越严重。而当故障电流周期分量幅值较大时,TA 会在故障后第 1 个周期内发生饱和,此时,故障电流全偏移时不是起始饱和和时间最小的情况,不同故障起始角条件下第 1 个周期内的饱和分析变得复杂,分析结果在不同的参数条件下也不相同。

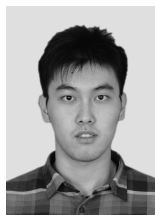
c. 在故障后的第 1 个周期内,二次电流的基波和 2 次谐波计算值与二次电流的畸变程度有关,偏磁电流越大,非周期分量增长越快,二次电流畸变越严重,基波计算值偏离真实值越严重,2 次谐波幅值越大,二次电流将不能正确反映一次电流的情况。此时,以基波和谐波提取值为重要依据的保护将受到影响。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [2] 李春来,汤晓宇,黄业安,等. 计量用 TA 在直流偏磁条件下转变特性的实验与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):143-145.
LI Chunlai,TANG Xiaoyu,HUANG Yean,et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC

- magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 143-145.
- [3] 刘曲, 郑健超, 李立涅. 直流输电系统变压器中性点电流分布的影响因素[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 643-646.
LIU Qu, ZHENG Jianchao, LI Licheng. Influence factors on distribution of DC current flowing through neutrals of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 643-646.
- [4] 杨勇. 高压直流输电技术发展与前景应用[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 58-60.
YANG Yong. High voltage DC technology and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 58-60.
- [5] 马晓冰, FERGUSON I J, 孔祥儒, 等. 地磁感应电流(GIC)的作用与评估[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1282-1287.
MA Xiaobing, FERGUSON I J, KONG Xiangru, et al. Effects and assessments of Geomagnetically Induced Current(GIC)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1282-1287.
- [6] PRICE P R. Geomagnetically induced current effects on transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4): 1002-1008.
- [7] BOKIM B, CHANO S R, DOVRAK L L. The effects of GIC on protective relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 5-8.
- [8] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 84-89.
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Effects of geomagnetically induced current on transferring characteristics of current transformer and transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 84-89.
- [9] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 电磁式电流互感器暂态特性试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 1-4.
CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 1-4.
- [10] 袁继修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(12): 1-5.
YUAN Jixiu, SHENG Hele. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30(12): 1-5.
- [11] 梁仕斌, 文华, 曹敏, 等. 铁芯剩磁对电流互感器性能的影响[J]. 继电器, 2007, 35(22): 27-32.
LIANG Shibin, WEN Hua, CAO Min, et al. The effect of remanent in CT core[J]. Relay, 2007, 35(22): 27-32.
- [12] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 89-93.
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC Magnetic Bias and its impact on differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 89-93.
- [13] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [14] 东洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学模型建模及其仿真的比较研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 11-14.
SHU Hongchun, LIN Min. Comparative study on modeling and transient simulation of current transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 11-14.
- [15] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jile-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.
- [16] 李贞, 李庆民, 李长云, 等. J-A 磁化建模理论的质疑与修正方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 124-131.
LI Zhen, LI Qingmin, LI Changyun, et al. Queries on the J-A modeling theory of the magnetization process in ferromagnets and proposed correction method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 124-131.
- [17] LUCAS J R, MCLAREN P G, KEETHIPALA W L, et al. Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 152-159.
- [18] 袁季修, 盛和乐, 高惠民, 等. 电流互感器和电压互感器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [19] KOJOCIC L A. Guidelines for current transformers selection for protection systems[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 593-598.
- [20] 史丽萍, 董海波. 非线性励磁特性曲线转换方法的研究及应用[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 162-164.
SHI Liping, DONG Haibo. Study and application of non-linearity excitation character curve's transform method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(2): 162-164.
- [21] 刘从爱. 互感器与相序过滤器[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [22] 姚亮, 胡再超, 杭决. 常见傅里叶变换的滤波性能分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 73-76.
YAO Liang, HU Zaichao, HANG Yang. Performance analysis of filtering algorithms based on Fourier transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 73-76.
- [23] 朱桂英, 龚乐年. 傅氏算法在微机保护应用中的探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 41-44.
ZHU Guiying, GONG Lenian. Discussion on application of fourier algorithm in microcomputer protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(4): 41-44.

作者简介:



郭一飞

郭一飞(1992—),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 289794023@qq.com);

高厚磊(1963—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,通信作者,长期从事电力系统继电保护方面的教学与科研工作(E-mail: houlei@sdu.edu.cn)。

(下转第 144 页 continued on page 144)

Overall design of integrated analysis centre for physically-distributed and logically-integrated dispatch system

FENG Shuhai, YAO Jianguo, YANG Shengchun, YU Yijun, ZHUANG Weijin,
ZHANG Hong, TANG Biqiang

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Since the construction of UHV grid makes the operating characters of power grid more complicated and its integration feature more obvious, the analysis and decision-making of dispatch system needs an integrated analysis function, which can't be satisfied by the traditional dispatch system. Based on the overall concept of "physically-distributed and logically-integrated" dispatch & control technology for entire grid, an overall architecture of integrated analysis centre is proposed and its model center, online analysis service and offline analysis service are designed in detail. Combined with the demands of future power grid for the analysis and decision-making function, the development direction of analysis and decision-making software for future dispatch system is pointed out, providing a reference for the R&D of online power grid dispatch and decision-making.

Key words: UHV power transmission; physical distribution; logical integration; model centre; integrated analysis and decision-making; dispatch automation system; software design

.....
(上接第 131 页 continued from page 131)

Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer

GUO Yifei, GAO Houlei

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,
Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: As the DC bias caused by HVDC power transmission and geomagnetic induction becomes more serious, its effect on the transient transferring characteristics of CT (Current Transformer) should be analyzed. An equivalent analysis model is built and the effects of DC bias and initial fault angle on the transient transferring characteristics of CT, especially the initial saturation time, are deduced and analyzed in detail. The transient transferring characteristic parameters of an operating CT in an actual power grid are calculated by MATLAB programs and the quantitative relations between the DC bias current and the initial saturation time, between the DC bias current and the fundamental of secondary current and between the DC bias current and the second-order harmonic of secondary current are obtained. The conclusions of analysis provide the references for understanding the working state of CT with DC bias and for the setting of relay protections.

Key words: DC bias; electric transformers; initial fault angle; initial saturation time; electric fault currents; fundamental wave; second-order harmonic current; transients