基于二次电流差分和积分的CT饱和检测方法

电流差动保护中存在着电流互感器（CT）饱和问题，通过对CT二次电流暂态特性的研究，利用二次电流浮动门槛值来近似系统故障后的最大短路电流，解决了三阶差分检测CT饱和的门槛值问题。通过故障启动后二次电流的积分值来构造虚拟的饱和二次磁链值。综合利用改进的三阶差分和二次电流积分法来确定CT所处的工作状态。CT处于线性传遍区开放差动保护，在CT饱和时瞬时闭锁保护。通过理论分析和PSCAD/EMTDC仿真验证该方法不受剩磁的影响；在CT处于严重稳态饱和和暂态饱和时，该方法依然能够正确检测出CT是否处于饱和状态。

姚刚 吴通华 李志坚 余洪 洪丰/国电南瑞科技股份有限公司

姚刚/工程师

关键词/Keywords
差动保护·
CT饱和·
电流差分·
电流积分·
仿真·

0 引言

电流差动保护主要依赖于电流互感器的二次侧电流信号作为保护判断的依据。因此，电流互感器（CT）能否正确传送一次侧的电流信息，直接影响电流差动保护能否正确动作。随着系统容量的日益增大，短路容量也不断增大，衰减时间常数也较大，在超高压系统中，CT饱和问题存在于母线、线路、变压器和发电机等各种元件的差动保护中，CT饱和问题对于线路、元件的差动保护是一个共性的问题。学者们针对CT饱和机理和特征，提出了许多解决方法，国内外保护装置的生产厂家也提出了抑制电流互感器饱和对电流差动保护的影响的措施。

数字式微机保护中普遍采用的抗饱和方法都是基于时差法[1]（异步法）的原理，即利用故障开始时，CT有一段线性的工作区，不会立刻进入饱和状态，对于区内故障，差动电流和制动电流同时上升；区外故障，制动电流先于差动电流出现。国内外保护厂家所采用的其他方法主要有：谐波法[2]，基于采样值抗饱和法[3]自适应阻抗，静态最大等值法，提高比例制动系数，附加制动区[4]等。

本文提出了基于改进的二次电流三阶差分和电流积分的方法，在故障启动后通过二次电流的差分和积分算法实时检测CT所处的工作状态。该方法解决了三阶电流差分饱和门槛值问题，不受CT的剩磁影响，在CT处于线性工作区时快速开放差动保护，在饱和区闭锁差动保护。通过Emtdc和Matlab仿真验证了此种方法的正确性。

1 基于二次电流差分和积分的饱和检测法

1.1 改进的二次电流三阶差分法

通过对CT的暂态特性，文献[5][6]将二次电流的数字形式表示为

$$i_2[n]=Ae^{-\frac{n\Delta T}{T_2}}+Be^{-\frac{n\Delta T}{T_1}}-C\sin(\frac{2\pi}{N}-\alpha-\varphi) \tag{1}$$

其中：T_1为一次系统时间常数；T_2为电流互感器二次回路的时间常数；A，B，C分别为系数；α为故障起始时刻电源的相角；N为每周期的采样点数（本算法取N=48）；ΔT为采样间隔；φ=arctan（ωT）；$If_{\max}$为最大稳态短路电流幅值；系数C的表达式为

$$C=I_{f\max}\frac{\omega T_2}{\sqrt{1+(\omega T_2)^2}} \tag{2}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

二次电流的三阶差分为

$$del3[n]=i_2[n]-3i_2[n-1]+3i_2[n-2]-i_2[n-3] \tag{3}$$

在一次时间常数比较大的情况下，三阶差分式中，前两项直流衰减分量几乎为0，相当于两次差分算法对直流分量的滤除作用，三阶差分正弦分量的幅值减小到 。$C(2\sin\pi/N)^3=0.002\ 2C$。得到电流三阶差分的判据为

$$|del3[n]|>Th3 \tag{4}$$

$$Th3=k_3*|I_{fmax}|*[2\sin(\pi/N)]^3 \tag{5}$$

其中： $Th3$为三阶差分的门槛值，k_3为可靠系数（本算法中暂时取3），根据判据的灵敏性和低通滤波器的影响来设置。

对于系统最大稳态短路电流I_{fmax}，国内外文献都是通过预估计算得到系统能够达到的最大短路电流，从而来设定三阶差分的门槛值，但是随着电力网架结构的不断发展，短路容量也在不断增大，最大稳态短路电流I_{fmax}也是变化的，并不是一个固定的值，若采用此种门槛值，对于短路电流不断增大的电力系统，很容易造成三阶差分判据误判CT饱和，所以采用固定的三阶差分门槛值不具有实用性。

由电力系统暂态分析可知，对于一个故障，故障后短路电流表达式可以确定。所以我们可以利用每次短路电流的瞬时最大值i_{fmax}近似作为系统最大稳态短路电流I_{fmax}，在设置短路电流瞬时最大值i_{fmax}的时候采用组合的浮动电流门槛值$i_{fmax}(n)$，其取值为

$$i_{fmax}(n)=\begin{cases}20*In & (0<n\leqslant 6)\\ \max\{|i_2(1)|,,|i_2(n)|,k_M*M_{int}\} & (6<n\leqslant 24)\\ \max\{|i_2(n-23)|,|i_2(n)|\} & (24<n\leqslant 48)\\ \max\{|i_2(n-47)|,,|i_2(n)|\} & (n>48)\end{cases}$$

式中，In为电流互感器的二次额定值，k_M为二次电流绝对值积分的可靠系数，M_{int}为保护启动后二次电流经滤波后的绝对值积分值。

保护启动后的$T/8$(2.5 ms,$n\leqslant 6$)， 取20倍的CT额定电流In。$T/8$到$T/2$之间，采用 $\{|i^2(1)|,\cdots,|i_2(n)|,k_{int}*M_{int}\}$ 的最大值。电力系统CT从故障开始到饱和有个线性传变区，时间一般为5 ms[3]，考虑一定的裕度为3.75 ms，而我们仅仅利用了2.5 ms。$T/2$到T之间，采用 $\{|i^2(n-23)|,\cdots,|i_2(n)|\}$ 的最大值，即取当前时刻采样点向前半个周期内二次电流的瞬时采样最大值。一个周期T之后，即取当前时刻采样点向前一个周期内所有采样二次电流的瞬时最大值。

保护启动后，综合利用电流互感器二次额定电流、$T/8$时间段内电流绝对值的积分值、故障后的瞬时采样电流值来组成浮动的最大电流门槛值来近似系统最大稳态短路电流I_{fmax}，解决了三阶差分门槛值的问题，对于故障后的初始CT饱和时刻能够做到实时判断，不受系统结构和运行方式的变化的影响。

1.2 二次电流积分法

电流互感器的磁链就是二次电压的积分[7]，磁链$|\psi(t)|$为

$$\psi(t)=\int_0^t U(t)\,dt=L_2(i_2(t)-i_2(0))+R2\int_0^t i_2(t)\,dt+\psi(0) \tag{6}$$

式中，$\psi(0)$为初始剩磁链。

当$|\psi(t)|\geqslant|\psi_{sat}|$，电流互感器铁心饱和；当$|\psi(t)|<|\psi_{sat}|$，电流互感器铁心不饱和。其中：$\psi_{sat}$为饱和磁链。

由于电流互感器二次负载主要是电阻性负载，电感性分量很小，可以认为二次负载为纯电阻负载$L=0$，得到二次电流的积分判据

$$\left|\int_{t_0}^{t} i_2(t)\,dt\right|\geq k_{int}*\left|\int_{t_0}^{t_{sat}} i_2(t)\,dt\right| \tag{7}$$

式中，k_{int}为二次电流积分可靠系数；t_0为故障启动时刻；t_{sat}为电流互感器起始饱和时刻。若满足式(7)，CT判为饱和状态，否则CT不饱和状态。

1.3 二次电流差分和积分检测CT饱和

基于二次电流差分和积分的饱和检测方法首先利用保护装置的启动元件记录故障启动时刻 ，保护启动元件可以选用电流变化量和零序过流元件启动。启动时刻进入二次电流积分程序，保护启动时刻为起始时间对二次电流进行积分，利用改进的二次电流三阶差分来检测电流互感器的起始饱和时刻t_{sat}，若满足改进的电流三阶差分判据，说明CT饱和，记录此时的二次电流积分值，并作为虚拟的饱和磁链值 ψ_s；若电流积分值大于

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

或者等于虚拟的饱和磁链，则CT处于饱和状态，闭锁差动保护；若小于虚拟饱和磁链，则CT退出饱和，开放差动保护。

1.3.1 稳态饱和对饱和检测的影响

稳态饱和是比较严重的饱和情况，存在正向饱和磁链ψ_{sat+}和反向饱和磁链ψ_{sat-}，只靠简单的电流积分判据不能准确的检测CT饱和状态。

对这种情况，我们采取正向饱和和负向饱和分开检测的方式。一个周期内，正反向饱和都发生一次，用三阶差分检测正向饱和及反向饱和的饱和起始时刻，积分得到正向饱和磁链ψ_{sat+}和负向饱和磁链值ψ_{sat-}，分别作为正向饱和及负向饱和的门槛值，把正向饱和与负向饱和分开检测，通过反向饱和磁链最大值法，反复替代反向饱和磁链值，可以避免稳态饱和发生第二次反向饱和检测的正确性。

1.3.2 剩磁对CT饱和检测的影响

假设CT为正向饱和，第一个饱和时刻为t_1，第二个饱和时刻为t_2，可以得到判据的第一个积分值为$\int_{t_0}^{t_1} i_2(t)\mathrm{d}t$，第二个饱和点的积分值为$\int_{t_0}^{t_2} i_2(t)\mathrm{d}t$

$$\begin{cases}\psi_{SAT}=R\int_{t_0}^{t_1} i_2(t)\mathrm{d}t+\psi(0)\\ \psi_{SAT}=R\int_{t_0}^{t_2} i_2(t)\mathrm{d}t+\psi(0)\end{cases} \tag{8}$$

由式(8)可得$\int_{t_0}^{t_1} i_2(t)\mathrm{d}t=\int_{t_0}^{t_2} i_2(t)\mathrm{d}t$

当电流互感器在 和 时刻分别饱和时，二次电流的积分值相同，因此，以故障启动时刻 到第一个饱和点 （起始饱和时刻）的电流积分可以作为饱和磁链的门槛值，二次电流积分判据(7)不受剩磁的影响。

2 饱和判据仿真验证

电流互感器采用EMTDC的典型JA模型；铁心面积S=2.601e^{-3} m^2，磁路长度0.637 7 m；二次负载为ZB=(2+j*0) Ω；变比为1/200，二次匝数为200；通过仿真一次故障电流后，CT发生饱和；得到的饱和波形数据通过Matlab编写的饱和算法进行CT饱和的检测。本仿真所用案例选择复杂的、故障时刻带有初始剩磁的CT模型。

2.1 暂态饱和（带剩磁）

当电流互感器故障起始时刻带有50%正向初始剩磁时，并发生暂态饱和现象，通过仿真程序验证其饱和检测方法的正确性。一次电流$i_1(t)=\sqrt{2}\times3\times(e^{-t/0.04}-\cos(\omega t))$ kA；电流互感器仿真参数如前所述。由于电流互感器故障起始时刻带有50%的正向剩磁，导致故障起始时刻对二次电流积分所反映的正向饱和磁通值小于反向磁通值，如图1、图2所示。

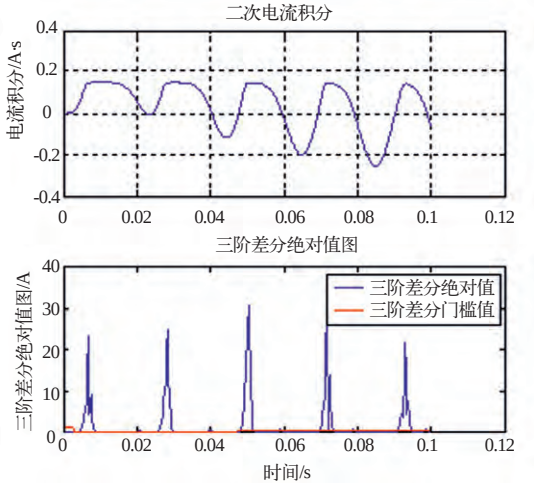

图1 暂态饱和，三阶差分和二次电流积分

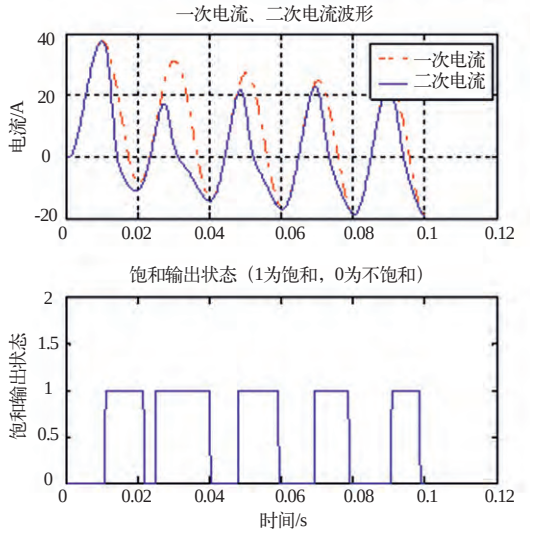

图2 暂态饱和，CT饱和检测结果

2.2 稳态饱和（带剩磁）

当电流互感器故障起始时刻带有80%正向初始剩磁时，并发生稳态饱和现象，通过仿真程序验证其饱和检测方法的正确性。一次电流$i_1(t)=\sqrt{2}\times30\times(-\cos(\omega t+90^\circ))$ kA。

由于故障初始时刻CT带有80%正向剩磁，导致故障起始时刻对二次电流积分所反映的正向饱和磁通值小于反向磁通值。利用二次电流积分所

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得到的正向饱和磁链 和负向饱和磁链值 相结合的方法，在发生稳态饱和时，正向饱和负向饱和此方法也能够正确检测出来。如图3、图4所示。

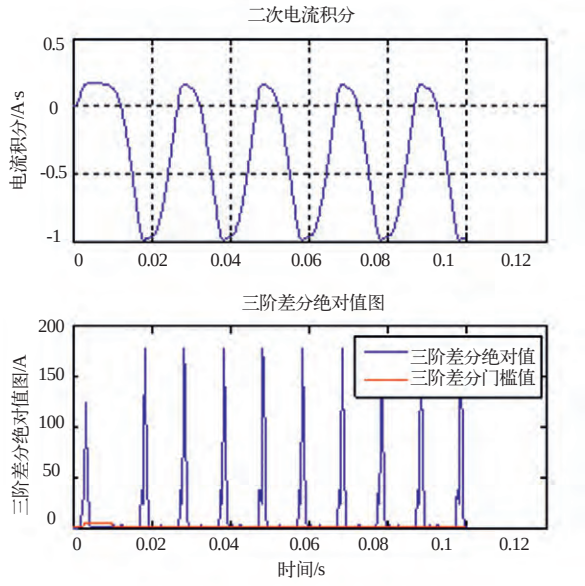

图3 稳态饱和，三阶差分和二次电流积分

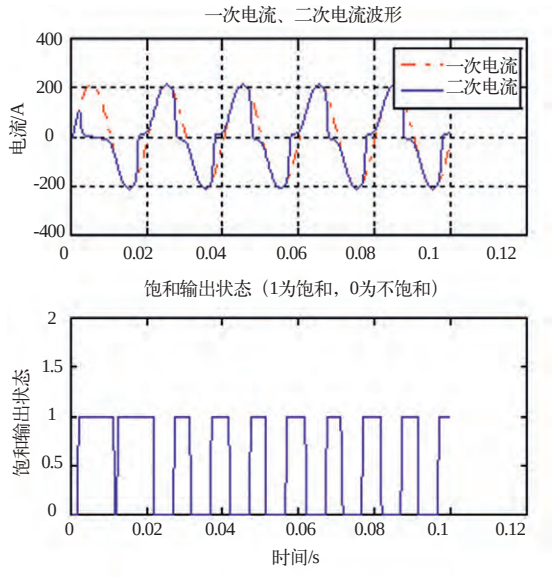

图4 稳态饱和，CT饱和检测结果

通过上述仿真得到，改进的二次电流三阶差分和积分的饱和检测方法能够很好的检测出故障后CT所处的工作状态。即使在电流互感器带有80%初始剩磁时，饱和判据依然能够正确判断。

3 结束语

本文提出的改进的三阶差分法和电流积分法相结合来检测CT的各种饱和状态，不受剩磁的影响，检测简单，计算量小，实时性好，不受外界噪声的影响。当区外故障CT处于饱和时，瞬时闭锁差动保护；当CT处于线性区时，开放差动保护。当系统发生区外故障CT饱和，转区内故障的时候，差动保护能够快速可靠动作。通过Emtdc与Matlab仿真相结合，验证了此种检测方法的可行性。

参考文献

[1] 沈全荣，严伟，梁乾兵，郑玉平．异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J]．电力系统自动化，2005，29（16）：84-86.

[2] 王志鸿，郑玉平，贺家李． 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]．电力自动化学报，2000，12（5），19-24.

[3] 程利军，龙翔，杨奇逊．基于采样值的CT饱和检测方法的研究[J]．继电器．2000，28（8）：19-21.

[4] 丁琰．自适应短数据窗抗TA饱和线路差动保护算法的研究[D]．硕士论文．南京：东南大学，2005.

[5] Yong-Cheol Kang, A TA Saturation Detection Algorithm．IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004.

[6] Yong-Cheol Kang, Sang-Hee Kang and Peter Crossley. An algorithm for detecting detecting CT saturation using the secondary current third-difference.IEEE Bologna PowerTech Conference June 23-26 2003, Bologna Italy.

[7] 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，2004.

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

姚刚（1984-），男，通信作者，硕士，工程师，研究方向为电力系统继电保护。

吴通华（1977-），男，硕士，高级工程师，研究方向为电力系统继电保护。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net