

DOI: 10.7667/PSPC160548

基于动态虚拟磁通分析的 CT 饱和识别方案研究

董新涛^{1,2}, 康小宁², 步梦琼³, 方正¹, 李宝伟¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 阐述了 CT 的工作原理, 分析了 CT 饱和时铁芯磁通的特征, 提出了基于动态虚拟磁通分析的 CT 饱和识别方案。该方案通过二次电流与 CT 铁芯磁通存在的联系计算动态虚拟磁通, 根据 CT 饱和时饱和区磁通达到最大值与电流过零时刻的相对时间变短进行 CT 饱和识别, 根据 CT 饱和时线性区磁通小于饱和区的磁通进行线性区识别。该方案利用磁通特征识别饱和及线性区, 不受非周期分量、高次谐波等电流特征的影响。经仿真验证, 该方案能够快速判断 CT 是否发生饱和, 准确定位线性区起止点, 原理简单, 实现方便, 具有实际应用价值。

关键词: CT 饱和; 动态虚拟磁通; 线性区

Research on the method to identify CT saturation based on dynamic virtual magnetic flux

DONG Xintao^{1,2}, KANG Xiaoning², BU Mengqiong³, FANG Zheng¹, LI Baowei¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: After analyzing the characteristic of core magnetic flux of CT during CT saturation, a new method based on dynamic virtual magnetic flux to identify CT saturation is proposed. The method calculates the dynamic virtual magnetic flux with secondary current with the relations between secondary current and magnetic flux. The method can identify CT saturation with the characteristic of core magnetic flux that the time between the starting of CT saturation when the magnetic flux reaches the maximum and zero time of secondary current is shorter, and identify linear data with that value of core magnetic flux during linear data is less than it during CT saturation. The method uses the characteristic of core magnetic flux to identify CT saturation, which will not be affected by the characteristic of secondary current such as aperiodic component and high harmonics. The simulation results show that the proposed method can quickly identify CT saturation, position the start and end point of linear data accurately, which has simple principle, is easy to realize and has practical application value.

Key words: CT saturation; dynamic virtual magnetic flux; linear data

0 引言

随着我国电网规模的不断扩大, 系统断路容量越来越大, 使 CT 饱和的问题变得越来越突出。在高压线路中经常会出现 CT 饱和的现象, 饱和严重时可能引起保护在区内故障时延时动作, 区外故障时误动作, 扩大停电范围甚至影响系统的稳定运行。

很多文献进行了仿真研究^[1-2], 介绍了 CT 饱和的影响与判别方法^[3-9], 其中一些方法受保护采样率和计算时间的限制无法在工程中应用。时差法^[10-11]、虚拟制动电流法^[12-13]因其原理简单、实现方便、可靠的优点, 得到了广泛应用。差动保护中应用的 CT

饱和识别方法, 目的是无论 CT 是否饱和总能正确识别区内外故障, 通常以差流为分析对象, 输出结果为区内外, 并不判别某个具体支路具体相别是否发生了 CT 饱和。

本文分析了 CT 饱和时铁芯磁通的特征, 研究了通过二次电流与 CT 铁芯磁通存在的联系计算动态虚拟磁通, 提出了基于动态虚拟磁通分析的 CT 饱和识别方案, 并进行了仿真验证, 结果表明本方案能快速识别 CT 饱和, 并准确定位线性区。

1 CT 饱和磁通分析

由全电流定律:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1)$$

在电流互感器铁芯中磁场强度 H 正比于励磁电流 i_m , 又主磁通 Φ 正比于磁感应强度 B , 可知 $\Phi=f(i_m)$ 的曲线与铁芯的磁化曲线相同。如图 1 所示。

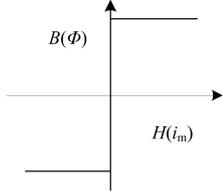


图 1 理想铁芯磁化曲线

Fig. 1 Magnetizing curve of the iron core

CT 的简化模型如图 2 所示。 Z_m 为励磁阻抗, 二次负载简化为纯电阻 R_2 , i_1, i_2, i_m 分别为 CT 一次侧、二次侧及励磁电流。

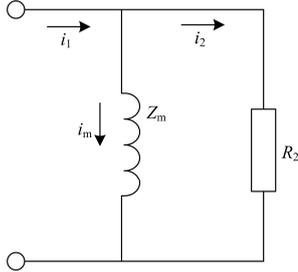


图 2 CT 简化模型

Fig. 2 Simplified circuit diagram of CT

由图 1、图 2 分析饱和过程的磁通变化: 在磁通密度未达到最大值之前, 需要较小的磁场强度与励磁电流, 等效于励磁阻抗接近于无穷大, 一次电流准确传变到二次回路; 当磁通密度达到最大值附近, 即使磁场强度与励磁电流继续增加, 磁通密度与主磁通的增加有限并逐渐趋于零, 等效于励磁阻抗趋近于零, 在一次电流保持原方向(正半轴或负半轴)的整个期间, 一次电流几乎全部转化为励磁电流, 不传变到二次回路中; 当一次电流在原方向降为零并开始反向时, 磁通密度与磁通从最大值下降, CT 重新正常传变, 直至下次饱和。图 3 是 PSCAD 仿真得到的 CT 饱和时的 i_2 线性区及饱和区曲线及对应的主磁通曲线。

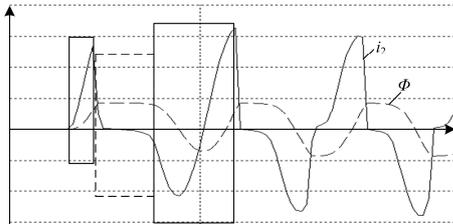


图 3 CT 饱和时二次侧电流和主磁通

Fig. 3 Secondary current and main magnetic

flux of saturated CT

由图 2 应用电磁感应定律和 KCL 定律可以得到

$$\frac{d\Phi}{dt} = i_2 R_2 \quad (2)$$

式中: Φ 为主磁通; i_2 为二次侧电流。由式(2)可以看出, 二次侧电流是主磁通的微分, 主磁通是二次电流的积分, CT 饱和时磁通到达最大之后不再相应增加, 其微分接近于零, 图 3 反映了这种关系。

根据式(2)可得

$$\Phi(t) = R_2 \int_0^t i_2 dt + \Phi_0 \quad (3)$$

$$\Phi_0 = R_2 \int_{-\infty}^0 i_2 dt \quad (4)$$

式中: $\Phi(t)$ 为 t 时刻的主磁通; Φ_0 为 0 时刻剩磁; i_2 是二次侧电流。 Φ_0 可由 0 时刻之前 i_2 计算得到, 所以在故障前通过式(4)计算得到 Φ_0 , 从故障起始点通过式(3)计算得到故障开始后任一时刻的 $\Phi(t)$ 是可行的。

无 CT 饱和时 $\Phi(t)$ 为正弦波, 以 i_2 过零点为起点, $\Phi(t)$ 在 $T/2$ 达到绝对值最大值。发生 CT 饱和时, $\Phi(t)$ 在第一个饱和畸变点达到绝对值最大值并保持, 与 i_2 过零点的相对时间小于 $T/2$ 。图 3 体现了这一特征。

由以上分析可以得出:

- 1) CT 饱和时, 在饱和区主磁通达到最大值, 其特征为一条直线, 低于最大值时 CT 工作在线性区。
- 2) 与 CT 正常工作时相比, CT 饱和时, 主磁通达到最大值时刻相对一次电流过零点的时间前移。

2 动态虚拟磁通算法

利用保护装置采集的二次电流, 可按照式(3)得到动态虚拟磁通 Φ_{cal} 。保护装置采集的二次电流为离散值, 按照每个周波 24 点采样来分析(下同), 即采样间隔 0.833 ms, 积分值可由采样点累加结果与采样间隔的乘积得到。在本文中对 Φ_{cal} 的使用只存在相对运算, 并不要求 Φ_{cal} 等值反映 Φ , Φ_{cal} 等比反映 Φ 即可满足要求, 式(3)、式(4)可改写为

$$\Phi_{cal}(0) = K \sum_{-\infty}^0 i \quad (5)$$

$$\Phi_{cal}(n) = K \sum_0^n i + \Phi_{cal}(0) \quad (6)$$

式中: K 为计算系数, 为方便装置运算、存储、结果直观便于分析为取值原则; n 为采样序号。但按照式(5)无法计算 $\Phi_{cal}(0)$, 因为保护装置无法定位起点, 程序也没有一直进行累加计算的必要。 $\Phi_{cal}(0)$ 可由以下方式获得。

在故障前正常运行时 i_2 为正弦波, 以故障前某

采样点为起始点, 设剩磁为零, 按照式(6)计算从起始点到采样序号 n 的 $\Phi_{cal}(n)$, 其波形相对于时间轴的偏移即负的 $\Phi_{cal}(0)$ 。可得

$$\Phi_{cal}(0) = -\frac{(\max(\Phi_{cal}(n)) + \min(\Phi_{cal}(n)))}{2} \quad (7)$$

式中, $\max(\Phi_{cal}(n))$ 与 $\min(\Phi_{cal}(n))$ 分别为 $\Phi_{cal}(n)$ 在这期间的最大值和最小值。在故障前将 $\Phi_{cal}(n)$ 减去偏移, 即可得到从故障起始等比反映主磁通 Φ 的 $\Phi_{cal}(n)$, 图 4(a)反映了 t 时刻减去偏移前后的 $\Phi_{cal}(n)$ 。

由式(6)可推出

$$\Phi_{cal}(n) = K \cdot i + \Phi_{cal}(n-1) \quad (8)$$

在动态虚拟磁通 Φ_{cal} 计算已完成, 有新的采样点时, 新采样点对应的动态虚拟磁通按式(8)计算。

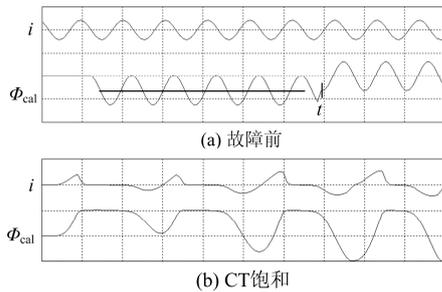


图 4 二次电流及其动态虚拟磁通

Fig. 4 Secondary current and its calculated magnetic flux

图 4(b)是 CT 饱和时的动态虚拟磁通 Φ_{cal} , t 时刻进行了将 $\Phi_{cal}(n)$ 减去偏移计算, 动态虚拟磁通 Φ_{cal} 与图 3 中仿真磁通特征一致。

3 饱和判别逻辑

通过以下步骤判断饱和及线性区。

1) 有新采样点, 设序号为 k

为快速判断是否饱和, 必须在保护得到最新的采样点后立即进行判断。

2) 设置磁通饱和和门槛

从当前采样点序号 k 向前 24 个采样点进行以下判断:

如果 $|\Phi_{cal}(n)| > \Phi_{cal.set1}$ 且 $|\Phi_{cal}(n)| > \Phi_{cal.set2}$, $M_n=1$, 否则 $M_n=0$ 。其中 $\Phi_{cal.set1}$ 为饱和判别绝对门槛, 文献[14]的研究表明 CT 工作在饱和系数 $K_s < 1$ 时, 不发生饱和。 $K_s = I_2 / (K_{alf} I_n)$, 其中 K_{alf} 是 CT 的准确限制系数, I_n 是二次额定值。 I_2 取 $5I_n$ 可保证 $K_s < 1$, 取 $I_2 = 5I_n$ 时的虚拟磁通的绝对值最大值, 在 $\Phi_{cal} < \Phi_{cal.set1}$ 时 CT 不会发生饱和。

$\Phi_{cal.set2}$ 为虚拟磁通饱和和门槛, 取值为: $\Phi_{cal.set2} = (0.85 \max(|\Phi_{cal}(n)|))$ 。式中 n 的范围是当前采样点序号 k 前一个周波的 24 点。饱和时磁通达到最大值并

保持数个采样点近似在一条直线上, 线上各采样点相对偏差非常小, 本文取 0.15, 即饱和期间满足采样点的 $|\Phi_{cal}(n)| > \Phi_{cal.set2}$ 。

动态虚拟磁通计算及采样点 n 的 M 值的判断流程如图 5。

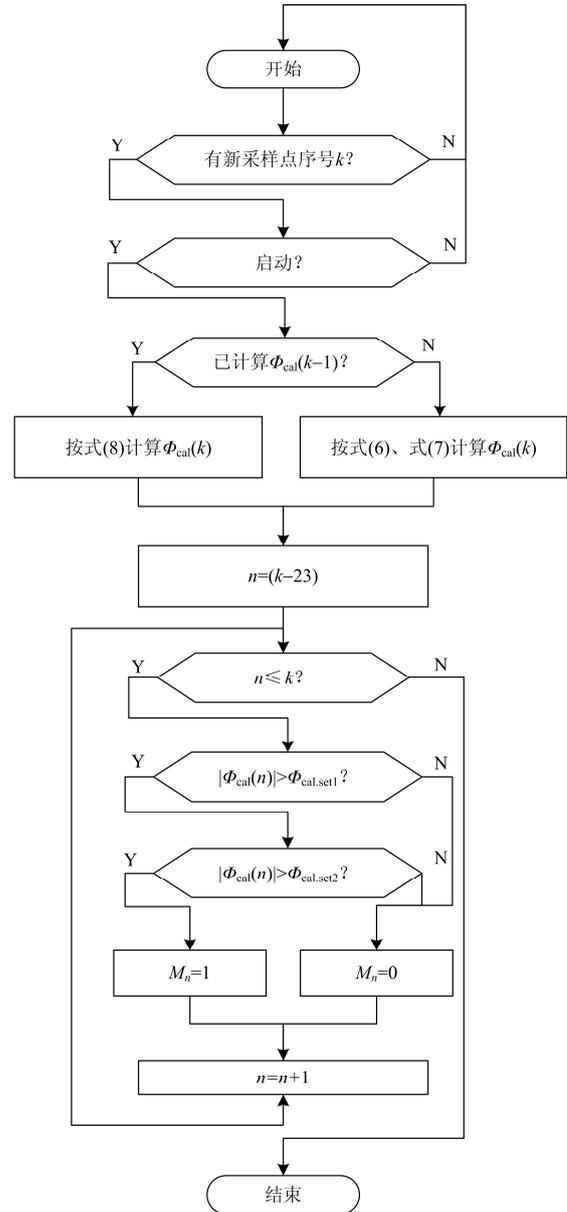


图 5 动态虚拟磁通计算及判断流程图

Fig. 5 Logic of calculation and judgment of dynamic virtual magnetic flux

3) 线性区判别

连续观察两个采样点的 M 值, 共有 4 种组合:

00、01、11、10。

(1) $M_{n-1}M_n=00$, 可以判断 $k-1$ 点为线性点。

(2) $M_{n-1}M_n=10$ 时, 若此时无饱和标志, 则序号

k 到之前的线性点之间均为线性点。

(3) $M_{n-1}M_n=01$ 或 11 时, 由判据 2) 判断是否线性点。

4) 饱和判别

饱和时磁通达到最大值并保持一段时间为直线, 序号 s 为直线的起点。 j 为故障开始后序号 s 前最近的电流过零点的序号, 由前面分析可知, 与 CT 正常工作时相比, CT 饱和时, 主磁通达到最大值时刻相对一次电流过零点的时间前移, 则有: $(s-j) < N$ 时, CT 饱和。

判出 CT 饱和时, 置 CT 饱和标志并保持一个周波以上, 本文取 30 ms, 即 36 个采样点。

起点 s 可通过求满足 $\prod_{n=s}^k M_n = 1$ 的最小序号 s 来确定, 即存在连续 $(k-s+1)$ 个点在一条直线上, 如果 $(k-s+1) \geq 4$, s 为起点。

故障起始点可用突变量启动点来确定, 电流过零点可由连续线性区内的绝对值最小电流采样点来确定。

5) N 的选取

动态虚拟磁通饱和和门槛取其最大值的 0.85 倍, CT 正常传变时动态虚拟磁通曲线为正弦波, 当 CT 工作在大电流, 即动态虚拟磁通满足绝对门槛时, 按照步骤 4) 得到的 $(s-j)$ 为 10, 考虑一定裕度, N 取 8。

4 仿真验证

采用基于动态虚拟磁通的 CT 饱和识别方案对暂态饱和和电流波形和稳态饱和和电流波形进行仿真分析, 分析结果如图 6、图 7 所示。其中 Φ 为动态虚拟磁通, M 为各采样点是否满足磁通最大值水平线的判断结果; 线性区为各采样点是否线性区的判断结果; 饱和判据为各采样点饱和识别判据的判断结果; 饱和标志是饱和判据满足标志保持 36 点的结果。

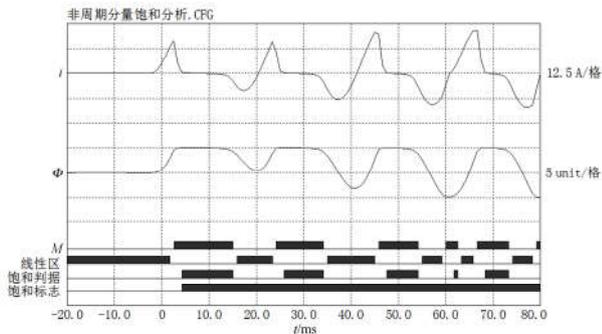


图 6 暂态饱和识别结果

Fig. 6 Identification of transient saturated CT

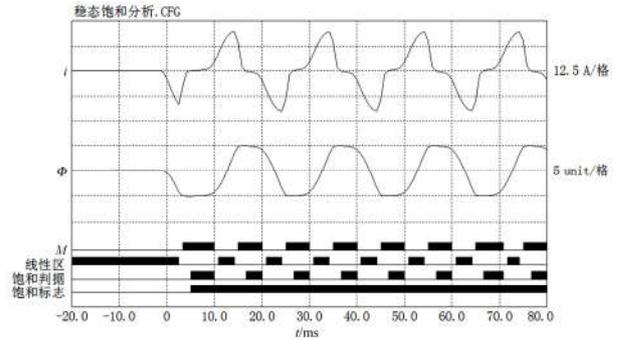


图 7 稳态饱和识别结果

Fig. 7 Identification of steady saturated CT

经试验验证, 本方案可以准确定位线性区, 能够在饱和电流的第 4 个畸变点(2.5 ms)识别 CT 饱和。

5 结论

基于动态虚拟磁通的 CT 饱和识别方案具有以下特点。

- 1) 以 CT 饱和时的磁通特征分析, 不受非周期分量、高频分量等电流特征影响。
- 2) 以单个 CT 为对象进行识别。
- 3) 识别结果为该 CT 是否发生饱和。
- 4) 能够定位该 CT 正常传变的采样点。
- 5) 快速识别: 在饱和电流的第 4 个畸变点(2.5 ms)判出 CT 饱和。

经仿真验证, 本方案能够快速判断 CT 是否发生饱和, 准确定位线性区起止点, 原理简单, 实现方便, 具有推广价值。

参考文献

- [1] 王振浩, 王学斌, 李国庆, 等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 15-22.
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, LI Guoqing, et al. Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 15-22.
- [2] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [3] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J].

- 电工技术学报, 2015, 30(3): 1-12.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CT secondary voltage and CT secondary current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.
- [4] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10-16.
- GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 10-16.
- [5] 张建功, 赵军, 谢鹏康, 等. VFTO 作用下电子式电流互感器二次端口电磁特性仿真分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 88-94.
- ZHANG Jianguo, ZHAO Jun, XIE Pengkang, et al. Simulation and analysis of electromagnetic properties at the secondary port of electronic current transformers under very fast transient overvoltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 88-94.
- [6] 李笑, 段建东, 王倩, 等. 基于等效瞬态电感频域特性的配电网励磁涌流识别方法研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(6): 34-38.
- LI Xiao, DUAN Jiandong, WANG Qian, et al. Identification of distribution network inrush current based on equivalent magnetizing inductance frequency characteristics[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6): 34-38.
- [7] 邓旭阳, 索南加乐, 李广, 等. 基于参数识别的电流互感器饱和识别原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 38-43.
- DENG Xuyang, SUONAN Jiale, LI Guang, et al. A novel current transformer saturation detecting method based on parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 38-43.
- [8] 陈丽艳, 何奔腾. 一种基于负荷电流检测的电流互感器饱和识别辅助判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 69-73.
- CHEN Liyan, HE Benteng. An assistant criterion for distinguishing current transformer saturation based on the load current detection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 69-73.
- [9] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷, 等. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-54.
- LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei, et al. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-54.
- [10] 沈全荣, 严伟, 梁乾兵, 等. 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.
- SHEN Quanrong, YAN Wei, LIANG Qianbing, et al. Asynchronous method for the recognition of current transformer saturation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86.
- [11] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器, 2001, 29(11): 1-4, 8.
- LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4, 8.
- [12] 杨恢宏, 谢百煌, 毕大强, 等. 基于虚拟制动电流采样点差动的 CT 饱和识别方法[J]. 继电器, 2006, 34(13): 50-53.
- YANG Huihong, XIE Baihuang, BI Daqiang, et al. Using the sampling differential protection based on the constructed restraint current to identify CT saturation[J]. Relay, 2006, 34(13): 50-53.
- [13] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.
- LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [14] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(2): 1-5.
- YUAN Jixiu, SHENG Hele. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30(2): 1-5.

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-06-15

作者简介:

董新涛(1987-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: dongxintao66@126.com

康小宁(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统继电保护的科研和教学工作; E-mail: kangxn@xjtu.edu.cn

步梦琼(1989-), 女, 助理工程师, 主要从事电子式互感器的研发和设计工作。E-mail: bumengqiong@126.com

(编辑 周金梅)