

一种基于形态学梯度的电流互感器饱和检测改进算法

乾维江, 王晓茹

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 分析了目前电流互感器(CT)饱和检测各种算法的优势和不足, 提出一种基于形态学梯度的电流互感器饱和检测的改进算法。算法包括两方面: 一方面, 利用混合形态滤波器对信号进行滤波预处理, 最大限度地去除噪声对饱和检测的影响; 另一方面, 利用合适的形态学算子对去噪后的信息进行暂态突变检测。仿真结果表明, 该算法设计简单、计算量小, 具有较强的抗噪与奇异性检测性能, 可通过选择合适的结构元素准确地确定CT饱和发生与结束的时刻。

关键词: 电流互感器; 形态学梯度; 饱和检测; 改进算法; 混合形态滤波器; 形态学算子

An improved algorithm for current transformer saturation detection based on morphology grade

QIAN Wei-jiang, WANG Xiao-ru

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the analysis of advantages and disadvantages to current transformer(CT) detecting algorithms, an improved algorithm to detect CT saturation is presented based on morphological gradient. The algorithm includes two aspects: on the one hand, using the mixed morphological filters to remove noise; on the other hand, using the improved morphological operators to detect the transient information. Simulation results show that the algorithm has features of easy implementation and fast speed. The CT saturation occurs and ending time can be detected by choosing proper morphological structure elements.

Key words: CT; morphology grade; saturation detection; improved algorithm; mixed morphological filters; morphological structure element

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0015-04

0 引言

电流互感器(CT)铁心发生饱和时将使二次电流畸变, 使得故障电流传变存在较大误差, 引起保护不正确动作^[1]。因此, 有必要研究关于CT饱和检测的问题。

CT饱和发生与结束(简称CT入出饱和)时, 二次电流波形会出现奇异性。小波模极大值方法能够检测定位二次电流入出饱和的奇异点^[2-3], 但小波变换在时窗边界和二次电流过零点处也可能出现模极大值, 该方法还有待进一步完善; 在饱和发生与结束时刻, CT二次电流的二阶或三阶差分值会出现突变, 据此特征可以检测出CT发生饱和的时刻^[4-7], 但差分法易受噪声干扰的影响, 其稳定性差。由于形态学梯度具有较强的奇异点识别能力, 文献[8]利用形态学梯度(MG)设计了一种多分辨率形态学(MMG)检测CT饱和发生与结束时二次电流的奇异特征。但需要用输入信号的最大绝对值

作为斜坡形结构元素的系数, 而在实际电力系统中, 受故障类型以及短路容量变化的影响, 故障电流最大幅值会发生变化, 故MMG的适应性大大降低。

本文在数学形态学梯度基础上, 提出一种改进算法, 先滤波再奇异性检测, 使该算法在抗噪声与饱和时奇异性检测两方面具备较优异的能力, 从而增强算法的灵活性、鲁棒性以及适应性。

1 数学形态学原理

数学形态学(MM)是1964年由法国GMatheron和J. Serra在积分几何研究成果的基础上创立的^[9]。它目前已被应用于信号和图像处理、数字滤波(被滤除的信号包括未知的脉冲噪声)、形状的简化和分类等^[10]。奇异特征提取是运用形态梯度来检测加于稳态信息之上的暂态信息^[11]。

数学形态学的基本运算包括膨胀、腐蚀以及由此引出的开、闭运算等。设待处理信号 $f(n)$ 是采样得到的一维多值信号, 其定义域为 $D[f]=\{1, 2,$

3, ..., N}; g(x) 为一维结构元素序列, 其定义域为 D[g]={1, 2, 3, ..., P}; 其中 P 和 N 为整数, 且 N>P, 则腐蚀与膨胀运算分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min \{f(n+x) - g(x) : n+x \in D[f], x \in D[g]\} \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max \{f(n-x) + g(x) : n-x \in D[f], x \in D[g]\} \quad (2)$$

式中: \ominus 为腐蚀运算; \oplus 为膨胀运算。则腐蚀运算是求取极小值, 膨胀运算是求取极大值运算。

形态学开运算、闭运算的定义分别为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

式中: \circ 为开运算; \bullet 为闭运算。

形态开—闭 (open-closing) 和闭—开 (close-opening) 滤波器:

$$Foc(f(n)) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (5)$$

$$Fco(f(n)) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (6)$$

利用二者的加权组合, 构成交替混合滤波器, 即可同时滤除信号中的正、负两种噪声^[11]。

$$F(n) = (Foc(f(n)) + Fco(f(n))) / 2 \quad (7)$$

形态学梯度被定义为: 原始采样函数 f(x) 分别经结构元素 g 腐蚀、膨胀后的数字差分。可表示为^[8]

$$G_{grad} = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (8)$$

形态学梯度主要应用在图像的边缘检测和信号处理, 在电力系统可以用来进行信号奇异性检测。

在形态学梯度基础上, 文献[8]设计了一种多分辨形态梯度 (MMG) 进行 CT 饱和检测。为检测上升沿与下降沿的奇异信号, 定义了两套方向相反的结构元素。该方法能够准确检测故障发生时刻和 CT 饱和发生的时刻, 但需要用输入信号的最大绝对值作为斜坡形结构元素的系数, 而在实际电力系统中, 受故障类型以及短路容量变化的影响, 故障电流最大幅值会发生变化, 故 MMG 的适应性大大降低。

2 改进形态学梯度的 CT 饱和检测原理

2.1 改进形态学梯度

本文在形态学梯度的基础上, 提出一种改进算法—改进形态学梯度, 进行 CT 饱和时的奇异性检测。采用先滤波后奇异性检测的策略, 滤波与奇异性检测采用不同类型与长度的结构元素。

分别设为 g_1 与 g_2 。滤波采用混合交替滤波器, 即

$$F(n) = [(f \circ g_1 \bullet g_1)(n) + (f \bullet g_1 \circ g_1)(n)] / 2 \quad (9)$$

定义改进形态学梯度为

$$GRADE_F = (F \oplus g_2)(n) - (F \ominus g_2)(n) \quad (10)$$

2.2 CT 饱和检测时结构元素选取

不同类型的结构元素, 以及相同类型不同长度的结构元素, 其消噪功能和奇异性检测功能是不一样的, 故结构元素的选择十分重要。然而, 关于合适的结构元素类型与长度选择的一般性方法仍然缺乏。于是本文通过仿真研究对 CT 饱和检测消噪和奇异性检测效果好的结构元素以及合适的结构元素长度。

2.2.1 仿真模型及仿真参数

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立如图 1 所示 500 kV 双端输电模型, 线路 L 全长为 100 km, 其分布参数见表 1。选用 EMTDC 中的饱和 CT 模型^[14]。CT 参数为^[14]: 铁芯匝数比 $N_1/N_2=5/600$, 铁芯截面积为 25.08 cm², 平均磁路长度为 62 cm, 额定负载为 30 VA。

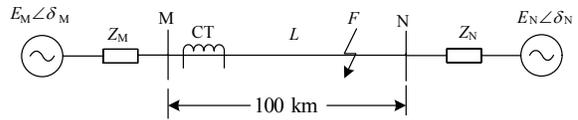


图 1 系统仿真模型

Fig.1 Simulation model of the system

表 1 输电线路分布参数

Tab.1 Distributed parameters of transmission line			
序分量	R/ (Ω·km ⁻¹)	L/ (mH·km ⁻¹)	C/ (μF·km ⁻¹)
正序	0.014 31	0.869 4	0.013 72
零序	0.071 65	2.608 2	0.008 57

设置仿真系统采样频率为 20 kHz, 两侧电源相角差为 10°。系统 0.08 s 发生三相短路, 饱和电流波形如图 2 所示 (归算到二次侧)。其中: CT 一次侧短路电流有效值 $I_1 = 800$ A; CT 二次侧阻抗 $R=2$ Ω, $L=1$ mH。

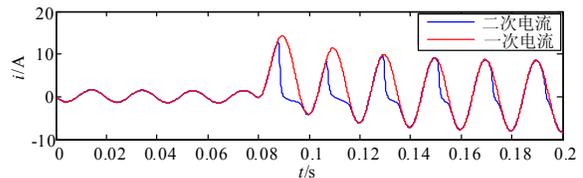


图 2 电流互感器饱和时的电流波形

Fig.2 Current waveform of the saturated CT

2.2.2 结构元素的选择

结构元素 (SE) 的类型和长度是影响滤波和奇异性检测性能的两个关键因素, 常用的 SE 主要有球形 SE、钻石 SE、圆盘 SE、半圆 SE、扁平 (也

称直线) SE 以及阶梯 SE ([1, 1, ..., 0, 0, ...]) 等。为选定合适的结构元素和合适的结构元素长度, 对前面仿真的二次饱和和电流加入 30 dB 白噪声, 当选定 SE 长度为 10。首先考察各种 SE 对滤波效果的影响。表 2 给出了各种 SE 滤波时均方根误差 (RMSE) 和信噪比 (SNR) 评价。

表 2 滤波效果评价

Tab.2 Evaluation of filter effect

	球形	钻石形	圆盘形	半圆形	直线形	阶梯形
RMSE	0.337	0.386	0.329	0.127	0.139	0.013
SNR/dB	37.67	36.59	37.88	45.49	44.77	63.72

通过表 2 可知, 后三种 SE 滤波效果要优于前三种 SE, 但通过仿真发现, 半圆形 SE 过度平滑原信号, 造成暂态信号失真, 而阶梯 SE 过度锐化原信号, 同样造成原信号暂态细节失真, 故选择扁平直线形结构元素滤波效果好。对于直线 SE, 不同的长度对滤波效果也不同, 图 3 给出了不同长度的直线 SE 滤波时的均方根误差 (RMSE) 和信噪比 (SNR) 评价。

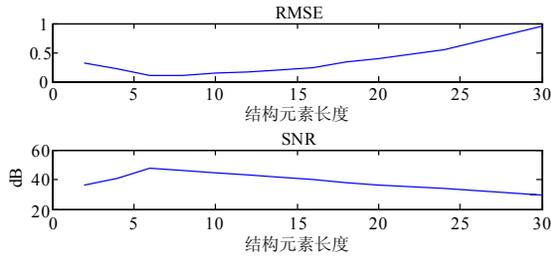


图 3 RMSE 与 SNR 变换曲线

Fig.3 Curve of the RMSE and SNR

由图 3 可知, 结构元素长度存在一个最优区间。由大量仿真可以得到, 在每周波采样 400 点时, 直线形结构元素长度选择 6~12 比较合适。综合考虑, 最后选定长度为 10、元素大小为 1 的扁平 SE 构成的 MM 滤波器用于滤波。

然后再考察不同的 SE 和不同的 SE 长度对信号奇异性检测效果的影响。通过同样仿真比较研究, 选择不同的 SE 和不同的 SE 长度进行实验仿真, 通过大量的仿真分析, 选择长度为 4, 幅值为 1 的扁平 SE 或者阶梯 SE 进行滤波后的信号奇异性检测效果较好。至此, 得到了改进形态学梯度的合适的结构元素和结构元素长度。

3 仿真结果与分析

取前面仿真的二次饱和和电流作为实验样本, 考察三阶差分法、形态学梯度法和改进形态学梯度法的 CT 饱和和奇异性检测效果。

图 4 为在第 92.9 ms 加入幅值为 1.5 A, 持续时间为 50 μs 的脉冲干扰时的效果图, 图 5 为加入 30 dB 的白噪声干扰时的效果图。

第一个尖峰脉冲对应故障发生时刻, 第二个尖峰脉冲对应首次发生饱和的时刻, 第三个小尖峰脉冲对应首次饱和和结束时刻, 第四个尖峰脉冲对应第二个周期发生饱和和时刻, 后面的情况以此类推。

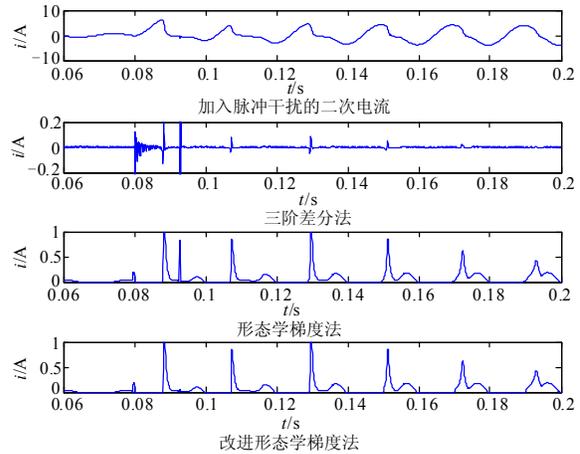


图 4 加入脉冲干扰时的饱和检测

Fig.4 Detection results with pulse noise

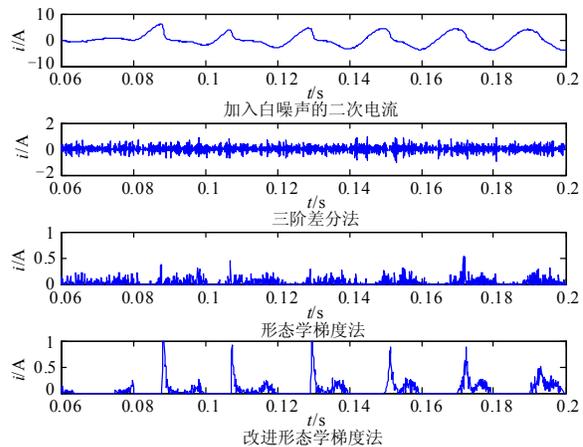


图 5 加入白噪声时的饱和检测

Fig.5 Detection results with white noise

由图 4 可以看出, 在第 92.9 ms 加入脉冲干扰时, 三阶差分法和形态学梯度法在此时刻都得到表征奇异特征的尖峰脉冲, 出现了误判。而改进形态学梯度法在此时刻没有得到尖峰脉冲, 并且由第二个尖峰脉冲可以得到 CT 首次发生饱和的时刻, 为 88 ms, 由第三个小尖峰脉冲对应时刻得到本次饱和和结束时刻为 97.5 ms, 后面几个周期的饱和发生与结束时刻可依次检测出。

由图 5 可知, 当加入 30 dB 白噪声后, 三阶差

分法完全失效, 形态学梯度法检测的效果不佳, 饱和发生时的奇异信息勉强能得到, 而饱和结束时的奇异信息完全被噪声所“淹没”, 故有白噪声干扰时, 形态学梯度法的灵敏度不高。而对于改进形态学梯度法, 可以检测出 CT 首次发生饱和的时刻为 88 ms, 首次饱和和结束的时刻为 97.5 ms, 只是饱和和结束时刻对应的尖峰脉冲受到白噪声的一定影响, 但仍能正确检测出饱和和结束的时刻, 同理, 后面几个周期内的 CT 饱和和发生与结束时的奇异性也能够检测出来, 从而可以确定饱和和发生与结束的时刻。

通过以上两个对比实验可知, 在有脉冲噪声和白噪声干扰时, 改进形态学梯度法仍能有效地检测出 CT 饱和和发生与结束时二次电流的奇异性特征, 从而准确地求出饱和和发生与结束的时刻。在有脉冲干扰时, 三阶差分法和形态学梯度法出现误判, 在有白噪声干扰时, 三阶差分法完全失效, 而形态学梯度法灵敏度不高, 效果不明显。

4 结语

本文提出了改进形态学梯度法, 仿真实验和对比分析验证了该方法的正确性与有效性。

1) 与三阶差分法以及形态学梯度法相比较, 改进形态学梯度法不受白噪声、脉冲噪声等干扰的影响, 具有较强的鲁棒性。

2) 与多分辨形态学梯度法相比较, 改进形态学梯度法不需要多分辨系数与结构元素相匹配, 增强了算法的适应性。

3) 与小波的方法相比, 改进形态学梯度法只用加、减运算, 计算量明显减少, 而且不受信号过零点、时窗边界等因素的影响。

参考文献

- [1] 陈三运. 一起 CT 饱和引起的继电保护拒动分析[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 85-87.
CHEN San-yun. Analysis of a Misoperation of Protection Device Caused by Saturation of Current Transformer[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 85-87.
- [2] 李贵存, 刘万顺, 贾清泉, 等. 一种利用小波原理检测电流互感器饱和的新方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 36-44.
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, JIA Qing-quan, et al. A New Algorithm to Prevent Misoperation of Transformer Differential Protection Based on Principle of Wavelet Transform[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 48-51.
- [3] 李忠安, 何奔腾. 一种利用小波变换开放电流互感器线性区的方法[J]. 继电器, 2000, 28(5): 20-23.
LI Zhong-an, HE Ben-teng. Open Linear Section of CT by Wavelet Transform[J]. Relay, 2000, 28(5): 20-23.
- [4] KANG Yong-cheol, Seung-Hun Ok, Kang S H, et al. A CTSaturation Detection Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 78-85.
- [5] 张新刚, 王泽忠, 徐春丽, 等. 差分判定电流互感器饱和的改进措施[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(5): 1-6.
ZHANG Xin-gang, WANG Ze-zhong, XU Chun-li, et al. Improvements for CT Saturation Discrimination with Difference Method[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(5): 1-6.
- [6] 张庆伟, 赵翔, 谭建成. 基于多阶导数的CT饱和检测[J]. 继电器, 2008, 36(5): 10-13.
ZHANG Qing-wei, ZHAO Xiang, TAN Jian-cheng. Multiple Derivatives Based CT Saturation Detection Method[J]. Relay, 2008, 36(5): 10-13.
- [7] 罗萍萍, 金菲, 洪骅. 电流互感器饱和检测的一种新算法[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(4): 319-322.
LUO Ping-ping, JIN Fei, HONG Ye. A New Detection Method of Current Transformer's Saturation[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2006, 22(4): 319-322.
- [8] 林湘宁, 刘沛. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 44-48.
LIN Xiang-ning, LIU Pei. A Novel Method to Identify the Saturation of the Current Transformer Using Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 44-48.
- [9] Serra J. Morphological Filtering: an Overview[J]. Signal Processing, 1994, 38 (4): 3-11.
- [10] 龚炜, 石青云, 程民德. 数字空间中的数学形态学—理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
GONG Wei, SHI Qing-yun, CHENG Min-de. The Digital Space in the Mathematical Morphology—Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [11] 马静, 徐岩, 王增平. 利用数学形态学提取暂态的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 19-23.
MA Jing, XU Yan, WANG Zeng-ping. Power Transformer Protection Based on Transient Data Using Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 19-23.
- [12] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.
CHEN Ping, LI Qing-min. Design and Analysis Mathematical Morphology-based Digital Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 60-65.

(下转第 70 页 continued on page 70)

电电流可达30 A, 充电电压可在1.8~14.5 V 之间调节, 满足了大部分变电站和电厂对2 V、6 V、12 V 单只电池的在线活化功能。同时该电路还采用了功率因数校正技术大大改善了开关电源的功率因数, 主电路采用正激变换器的形式, 驱动电路简单, 控制电路具有良好的响应速度和控制精度。

参考文献:

[1] 朱松然. 铅蓄电池技术(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
ZHU Song-ran. Lead Acid Battery Technologies, Second Edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[2] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 207-215.
ZHANG Zhan-song, CAI Xuan-san. Theory and Design of Switching Power[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 207-215.

[3] 刘胜利. 现代高频开关电源实用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
LIU Sheng-li. Modern High-frequency Switching Power Practical Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.

[4] Aguilar C, Canales F, Arau J, et al. An Improved Battery Charger Discharger Topology with Power Factor Correction[A]. in: IEEE IECON[C]. 1995.590-595.

[5] 冯仁斌, 魏晓斌, 胡恒生, 等. 铅酸蓄电池的快速充电[J]. 电源技术, 2003, 27(1): 72 - 74.
FENG Ren-bin, WEI Xiao-bin, HU Heng-sheng, et al. Fast Charging of Lead-acid Batteries[J]. Power Technology, 2003, 27(1): 72-74.

[6] 吴寿松. 谈铅酸蓄电池的充电接受率[J]. 电池, 2005, 35(5): 388-389.
WU Shou-song. Charging Acceptance Rate of Lead-acid Batteries[J]. Battery, 2005, 35(5): 388 - 389.

[7] 陈静瑾, 余宁梅. 阀控铅酸蓄电池分段恒流充电特性

的研究[J]. 电源技术, 2004, 28(1): 32-33.
CHEN Jing-jin, YU Ning-mei. Study of Sub-constant-current Charge Characteristics of VRLA Battery[J]. Power Technology, 2004, 28(1): 32 - 33.

[8] 何莉萍, 等. 基于马斯理论的蓄电池充电电流衰减指数研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(10): 26-30.
HE Li-ping, et al. Study of Battery Charge Current Attenuation Index Based on Mas Theory[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(10): 26-30.

[9] 徐伟东, 宣伟民, 等. 基于PSM 技术高压脉冲电源的模拟实验[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 110-113.
XU Wei-dong, XUAN Wei-min, et al. PSM Technology-based Simulation Experiment of High-voltage Pulsed Power[J]. Journal of Electrotechnical, 2008, 23(1): 110-113.

[10] ITER Joint Central Team and Home Teams. The ITER Pulsed Power Supply System[A]. in: 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering[C]. San Diego: 1997. 491-496.

[11] 王久和, 黄丽培, 等. 一种新的电压型PWM 整流器无源控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 38-41.
WANG Jiu-he, HUANG Li-pei, et al. A New Type of Voltage Source PWM Rectifier Controller Design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 38-41.

收稿日期: 2009-05-06; 修回日期: 2009-06-12

作者简介:

张元敏(1963-), 男, 教授, 主要从事电力自动化方面的研究; E-mail: zym@xcu.edu.cn

罗书克(1976-), 男, 研究生, 主要从事控制理论与控制工程和电力传动及自动化方向的研究。

YUAN Ji-xiu, SHENG He-yue, WU Ju-ye. Protective Current Transformers Application Guide[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.157-161.

收稿日期: 2009-05-06

作者简介:

乾维江(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: qwj-927@163.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护和安全稳定控制、变电站自动化。

(上接第 18 页 continued from page 18)

[13] 束洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学模型建模及仿真的比较研究 [J]. 电网技术, 2003, 27(4): 11-14.
SHU Hong-chun, LIN Min. Comparative Study on Modeling and Transient Simulation of Current Transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 11-14.

[14] 袁季修, 声和乐, 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, 2004.157-161.