基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和检测方法研究

罗 慧[1]，周卿松[1]，苗洪雷[2]，徐 舜[1]，曾祥君[1]

(1.电网安全监控技术教育部工程研究中心(长沙理工大学)，湖南 长沙 410004；
2.华自科技股份有限公司，湖南 长沙 410205)

摘要：为解决由于 CT 饱和而引起的保护不能进行可靠动作的问题，提出一种适用于母线差动保护的基于局部均值分解(LMD)原理的 CT 饱和检测和故障区判定方法。对流过母差保护的 CT 暂态电流进行局部均值分解，通过高频分量瞬时频率的突变检测 CT 的饱和。依据差动电流分解得到的瞬时频率发生突变的间隔时间的不同，对母线发生区内故障、区外故障以及一般转换性故障进行故障识别。用 EMTP-ATP 软件对所提方法进行了仿真，结果表明该方法能检测 CT 的饱和，并准确对 CT 饱和情况下的故障类型进行识别。

关键词：局部均值分解；电流互感器饱和；瞬时频率；检测；间隔时间

A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection

LUO Hui[1], ZHOU Qingsong[1], MIAO Honglei[2], XU Shun[1], ZENG Xiangjun[1]

(1. Engineering Research Center of Power Grid Safety Monitoring & Control Technology, Ministry of Education (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China;
2. HNAC Technology Corporation, Changsha 410205, China)

Abstract: In order to solve the problem that protection cannot act reliably caused by CT saturation, this paper puts forward a new method of CT saturation detection and fault area judgement based on local mean decomposition (LMD) principle for bus differential protection. By decomposing the CT transient current, CT saturation can be detected through the mutations of instantaneous frequency of high frequency component. Based on different time interval of mutations of the instantaneous frequency decomposed from differential current, the fault area, such as the internal fault, external fault and the general transform fault can be identified accurately. EMTP-ATP software is used to simulate the application of the method, the result shows that it can detect CT saturation and identify the fault type accurately under the CT saturation.

Key words: local mean decomposition (LMD); CT saturation; instantaneous frequency; detection; time interval

中图分类号： TM772 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0049-06

0 引言

母线连接着发电机、变压器、输电线路以及配电线路等电气设备[1-2]，起着接收和分配电能的作用，因此是一类至关重要的电气设备。尽管设置了母线保护且母线发生故障的概率相对于输电线路较小，但是如果在故障的时候不能及时切除，将造成重大影响。随着电网规模的日益扩大，电力系统电压等级的提高对母线保护的准确性及速动性提出了更为严格的要求[3-4]。母线保护的原理一般是基于电流差动原理[5]。差动电流通过 CT 测量而得，当发生故障时电流很大且含有暂态分量，CT 易产生饱和，影响保护的判断和动作[6-7]。为了解决 CT 饱和所带来的问题，学者们提出了一些方法，主要有通过分析电流参数提出的异步法、导数法、采样值法、虚拟制动电流采样法、参数识别法[8-12]，以及根据饱和时波形特征进行检测的波形判别法、小波变换法、形态学法[13-15]等。这些方法能够检测到 CT 饱和并将保护闭锁，但是对于一般转换性故障仍有不足之处，稳定性与可靠性还有待改善。文献[16]提出了基于希尔伯特-黄的抗 CT 饱和判别方法，通过 Hilbert 变换得到瞬时频率，但此种方法在 EMD 的分解过程中会出现模态混叠，影响所得 IMF 分量，并且得到的瞬时频

基金项目：国家自然科学基金项目(61233008，51277014，51425701)，湖南省科技重大专项(2012FJ1003)，湖南省高校产业化培育项目（12CY007）

率会出现无物理意义的负频率，因此仍然具有一定的限制性。

局部均值分解法(LMD)是近几年提出的一种处理时频信号的方法，其最初用于脑电波、心电图等医学领域。LMD分解可得到具有物理意义的PF分量，通过PF分量即可得到瞬时频率值，更简便，更好地保证了原信号的特性。该方法具有很好自适应性，与小波变换相比，无需选择确定小波基，同时克服了EMD一些弱点，对非线性非平稳信号的处理能力更强大[17-19]。本文采用LMD方法对母线差动保护CT的二次侧电流进行分析判断。当CT进入与退出饱和时，发生区外故障时其差动电流波形会产生明显的畸变点，而区内故障时无畸变点。利用LMD能够快速准确地得到时间与瞬时频率关系，对差流波形进行分析，对于差流突变信号进行快速、准确、精准的检测分析。在区外故障发生CT饱和后发生转换性故障的极端情况下仍能快速切除故障。

1 CT 饱和电流特性分析

对于差动保护中所用到的电流互感器其等值电路图可以简化成如图 1 所示，其中 i_1、i_2、i_μ分别表示电流互感器的一次侧、二次侧电流以及励磁电流。电流互感器在一次侧将所检测到电流能按变比转换成二次侧的小电流，一次侧暂态电流可以表示为

$$i_1 = I_m(\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} - \cos\omega t) \tag{1}$$

式中：I_m为一次侧短路电流的最大值；τ 为一次时间常数。

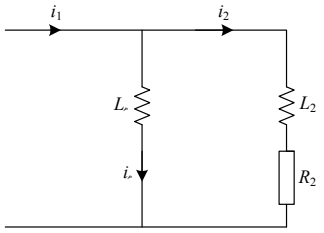


图 1 差动保护中电流互感器等值电路图

Fig. 1 Current transformer equivalent circuit diagram of differential protection

电流互感器通过一、二次侧对其所测电流进行传变，由于其铁芯为非线性元件，磁通与磁感应强度成非线性的关系，会出现饱和现象。电流互感器 CT 的励磁阻抗的大小与铁芯的饱和程度有关，当铁芯不饱和时，励磁阻抗可以认为很大，从而励磁电流很小甚至可以认为是 0。

当 CT 通过较大的含有很大的非周期分量的一次暂态电流时，由于非周期分量不能通过线圈传变到二次侧，使得铁芯进入饱和区，铁芯的磁导率下降到低值，励磁电流激增，二次电流发生畸变，导致出现很大的差动电流，从而引起保护的误动作。CT 饱和一般分为稳态饱和与暂态饱和两种[12]。本文主要分析由非周期分量所导致的暂态饱和现象，该状态一般与下列因素有关：① 一次侧非周期分量的大小；② 一次系统的时间常数；③ 二次负载阻抗的大小；④ CT 的铁芯剩磁等。

由以上分析可得，区外故障发生 CT 饱和时，其铁芯会周期性的进入退出饱和区，电流波形发生畸变出现奇异点。当出现转换性故障的时候，电流波形的畸变也会经历从有到无的过程。因此 CT 电流波形的这种特点可以用来进行检测分析以提高母差保护的可靠性。

2 LMD 分解的基本原理

局部均值分解法(LMD)是一种具有良好时频特性及自适应能力的处理非线性非平稳信号的方法。能将一个复杂信号分离出若干个 PF 分量，这样便可以得到被检测信号的时频分布。每个 PF 分量都是由包络信号与纯调频信号相乘而得，因此在未得到 PF 分量之时就可以从包络信号得到相对应的瞬时幅值，并由纯调频信号求导得到相对应的瞬时频率，具有实际物理意义。该方法所得到的瞬时频率无需进行复杂变换就能得到，更好地保留了原始信号的特征，能敏感地反映信号的突变，突变信号在时频图中表现为幅值非常大的瞬时频率。对于任意信号 $x(t)$，其分解过程如下。

1) 找出原始信号$x(t)$中的所有的极值点n_i，求出所有相邻的局部极值点的平均值m_i。

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \tag{2}$$

将平均值的点连接起来用滑动平均方法得到局部平均值函数$m_{11}(t)$。

2) 根据信号所求出的极值点，求出局域包络函数a_i。

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \tag{3}$$

通过滑动平均处理后得到局部包络函数$a_{11}(t)$。

3) 从原始信号 $x(t)$中分离出经步骤 1)所得出的局部均值函数$m_{11}(t)$，得到函数$h_{11}(t)$。

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \tag{4}$$

4) 将函数 $h_{11}(t)$ 除以局部包络函数进行解调 $a_{11}(t)$，得到函数 $s_{11}(t)$。

$$s_{11}(t)=\frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \tag{5}$$

对 $s_{11}(t)$ 重复以上步骤就能得到 $s_{11}(t)$ 的包络均值函数 $a_{12}(t)$，若 $a_{12}(t)\neq 1$，则说明 $s_{11}(t)$ 不是一个纯调频信号，需要重复上述步骤迭代n次，直到 $a_{1(n+1)}(t)=1$，则 $s_{1n}(t)$ 为一个纯调频信号。所以有：

$$\begin{cases} h_{11}(t)=x(t)-m_{11}(t) \\ h_{12}(t)=s_{11}(t)-m_{12}(t) \\ \quad\vdots \qquad\qquad \vdots \\ h_{1n}(t)=s_{1n}(t)-m_{1(n+1)}(t) \end{cases} \tag{6}$$

上式中，

$$\begin{cases} s_{11}(t)=\dfrac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \\ s_{12}(t)=\dfrac{h_{12}(t)}{a_{12}(t)} \\ \quad\vdots \qquad \vdots \\ s_{1n}(t)=\dfrac{h_{1n}(t)}{a_{1n}(t)} \end{cases} \tag{7}$$

实际应用中可以将 $a_{1n}(t)\approx 1$ 作为迭代终止的条件。

5) 将迭代所产生的所有局域包络函数相乘就得到包络信号即 PF 分量的瞬时幅值。

$$a_1(t)=a_{11}(t)a_{12}(t)...a_{1n}(t)=\prod_{k=1}^{n}a_{1k}(t) \tag{8}$$

6) 构 PF 分量：

$$PF_1=a_1(t)s_{1n}(t) \tag{9}$$

它包含了原始信号中最高的频率成分，其包络信号 $a_1(t)$ 就是瞬时幅值，瞬时频率由式(10)得出。

$$f_1(t)=\frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}\left[\arccos\left(s_{1n}(t)\right)\right]}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

7) 将 PF_1 从原始信号 $x(t)$ 中减去，得到信号 $x_1(t)$，在 $x_1(t)$ 上重复上述步骤，直到所得的 $x_k(t)$ 为一个单调的函数。

8) 将所得的 k 个 PF 分量及余项参数组合，得到原始信号完整的时频分布。

本文采用 LMD 方法分解 CT 二次电流，得到的 PF 分量为单分量信号，根据式(10)求导所得到的瞬时频率分析，瞬时频率的极小值点就可以反映信号的突变。

3　仿真实例

采用 EMTP-ATP 仿真软件建立了一个如图 2 所示的 500 kV 的双端电源线路供电系统模型，采用 TYPE-96 型非线性电感元件模拟电流互感器模型，考虑了磁滞特性[20]，其中系统频率 50 Hz，E_1 的参数为：Z_{s1}=1+j43.156 Ω，Z_{s0}=2+j21.578 Ω，E_2 参数与 E_1 相同。线路长度为 100 km，提取故障时的电流信号进行分析。仿真的采样频率为 20 kHz。由于 CT 的饱和特性与一次系统常数以及二次负载有关，设仿真模型的一次系统常数 T_s=50 ms，L=8 mH，R=4 Ω。

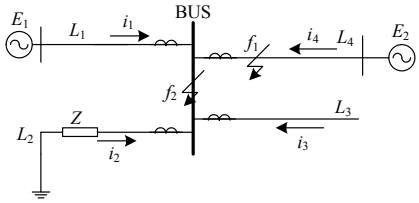


图 2 电力系统仿真模型

Fig. 2 Power system simulation model

3.1 发生持续性内部故障情形

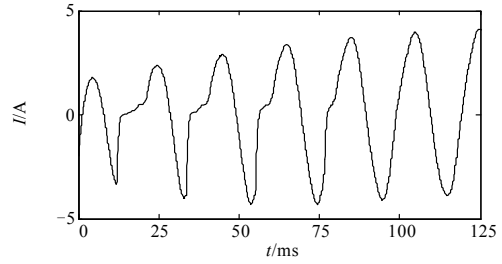
当发生持续性的内部故障 f_2 时，由CT得到的差动电流波形及经过LMD分解得到的瞬时频率如图3所示。如图3(a)所示，在经过约10 ms的线性传变区后，电流正弦波形开始出现失真。发生内部故障时，其差动电流的波形分为周期分量和非周期分量两个部分，非周期分量为余量，周期分量可以分解成生产函数。所以经过LMD分解得到瞬时频率如图3(b)所示，可以得到3个PF分量及1个残余量，且频率的最高成分在 PF_1 中。瞬时频率在 PF_1 分量信号相位突变时，其值也发生突变，突变点发生的时间分别在10 ms、35 ms、60 ms处，其中瞬时频率的最大幅值发生在约10 ms，约隔25 ms会发生一次突变。

3.2 发生持续性区外故障情形

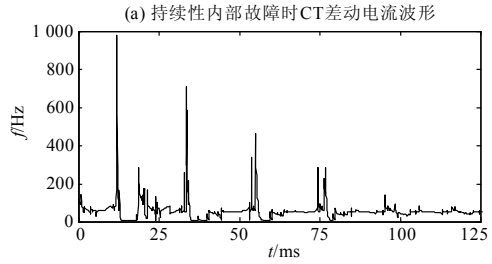
在发生持续性区外故障 f_1 的情况下，在经过一小段线性传区后，由于存在很大的非周期分量，CT 的励磁磁通饱和，励磁电流激增，CT 达到饱和状态，经 CT 传变的二次电流也发生畸变，所得到的差动电流波形出现很大失真如图 4(a)所示。

差动电流的波形经 LMD 分解后，得到瞬时频率如图 4(b)所示，由于波形发生严重失真，在

一个周期内，波形信号可以得到多个突变点，瞬时频率的突变点为 13 ms、23 ms、33 ms、43 ms、53 ms、63 ms、…，区外故障瞬时频率的幅值相对于区内故障的瞬时频率的幅值明显增大很多，两相邻突变间隔约为 10 ms。



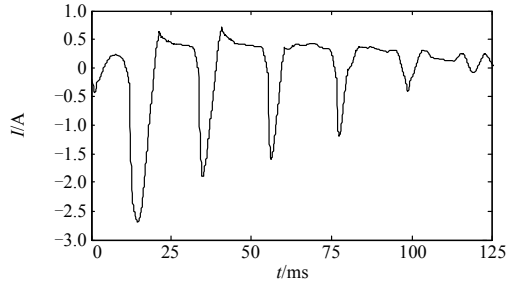
(a) 持续性内部故障时CT差动电流波形



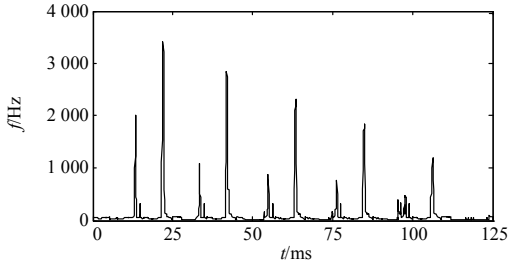
(b) 持续性内部故障差动电流对应瞬时频率

图 3 持续性内部故障差流波形及对应瞬时频率

Fig. 3 Persistent internal fault current waveform and the corresponding instananeous frequency



(a)持续性区外故障CT电流差动波形



(b) 持续性区外故障差流波形对应瞬时频率

图 4 持续性区外故障差流波形及对应瞬时频率

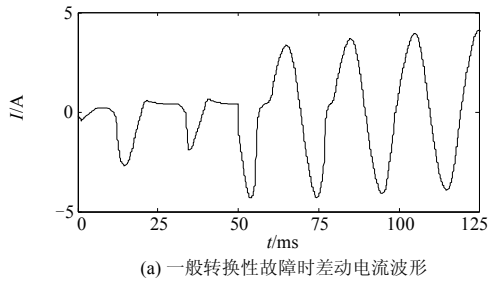
Fig. 4 Persistent external fault current waveform and the corresponding instananeous frequency

3.3 发生一般转换性故障

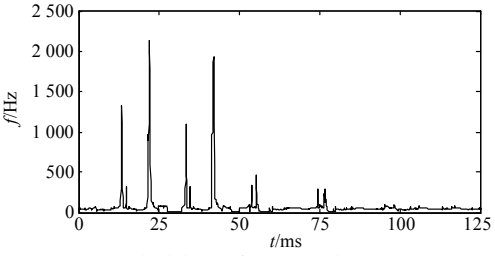
当发生一般转换性故障(即故障由母线区外转至区内)时，所得到的差动电流波形如图 5(a)所示，在 50 ms 时由区外故障转为区内故障。

差动电流的波形经 LMD 分解后，得到瞬时频率如图 5(b)所示，在发生转换性故障时，其波形会因为非周期分量存在而引起 CT 状态的变化而发生变化，根据波形信号分析所得的瞬时频率也随着发生相应的变化。在区外故障时瞬时频率的突变点为两相邻突变间隔约为 10 ms，发生转换性故障后两相邻突变间隔变为 25 ms。

由理论分析与仿真结果可知：在一个周期内，区内故障时差动电流的两相邻突变点的时间间隔为 25 ms，而区外故障时由于 CT 饱和所对应的瞬时频率会发生不止一次的突变，约隔为 10 ms 就会发生一次突变。因此可以根据突变发生的间隔时间区分区内、区外故障以及一般转换性故障。



(a) 一般转换性故障时差动电流波形



(b) 一般转换性故障差动电流波形对应瞬时频率

图 5 一般转换性故障差流波形及对应瞬时频率

Fig. 5 Gerneral transform fault current waveform and the corresponding instananeous frequency

4 结论

本文提出了一种基于LMD原理的CT饱和识别及母线差动保护故障去判断的新方法。利用差流波形在发生区外故障、区内故障以及一般转换性故障时的波形畸变的差别，通过 LMD 进行信号的分解，通过信号分析所得信号突变之间时间的间隔进行故障发生区域的判定。仿真分析表明，该方法对于区外故障与区内故障具有明显的区分度且简单易行，仅用大约 10 ms 就能快速准确地进行故障判断，为防止 CT 饱和对保护的干扰具有一定的意义。

参考文献

[1] 索南加乐, 邓旭阳, 阿里木江·卡德尔, 等. 基于综合

阻抗的母线保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 31(3): 72-78.
SUONAN Jiale, DENG Xuyang, ALIMJAN Kader, et al. A novel principle of integrated impedance based bus-bar protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 31(3): 72-78.

[2] 姜宪国, 王增平, 李琛. 不受汲出电流影响的方向式四分段双母线保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 22-27.
JIANG Xianguo, WANG Zengping, LI Chen. Directional 4-segment double-bus protection immune to outgoing current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 22-27.

[3] 于梦瑶, 于群, 史建省, 等. 电流互感器饱和对低压电动机保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 78-82.
YU Mengyao, YU Qun, SHI Jiansheng, et al. Influences and countermeasures for saturation of current transformers on low voltage motors protections[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 78-82.

[4] 叶志浩, 王刚, 黄靖, 等. 船舶电力系统短路保护性能综合量化指标模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 26-30.
YE Zhihao, WANG Gang, HUANG Jing, et al. Integrated quantizing index model of short-circuit protection performance of vessel power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 26-30.

[5] 李建新, 桂小军, 俞镛伟. 一种适用于母差保护的 CT 饱和判据[J]. 继电器, 2006, 31(3): 72-78.
LI Jianxin, GUI Xiaojun, YU Yongwei. CT saturation criterion suited for busbar differential protection[J]. Relay, 2006, 31(3): 72-78.

[6] 王志华. 高压电网电流互感器饱和对继电保护的影响应用分析与研究(英文)[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 44-49.
WANG Zhihua. Analysis and study on effects of saturation of current transformers on relay protection in the high voltage grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 44-49.

[7] 田晓倩, 李宝树, 申路. 直流偏磁下电流互感器误差特性分析[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 24-29.
TIAN Xiaoqian, LI Baoshu, SHEN Lu. Analysis of transfer characteristic for current transformers with DC bias[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 24-29.

[8] 赵永彬, 陆于平. 一种基于异步法的母线保护中电流互感器饱和判据[J]. 电网技术, 2006, 21(6): 9-14.
ZHAO Yongbin, LU Yuping. An asynchronous method based saturation criterion for CT in busbar protection[J]. Power System Technology, 2006, 21(6): 9-14.

[9] 张庆伟, 谭建成. 基于导数法的电流互感器饱和新判据[J]. 继电器, 2005, 33(3): 45-48.
ZHANG Qingwei, TAN Jiancheng. A new derivative method to detect CT saturation point[J]. Relay, 2005, 33(3): 45-48.

[10] 程利军, 龙翔，杨奇逊. 基于采样值的 CT 饱和检测方案的研究[J]. 继电器, 2000, 28(8): 45-48.
CHENG Lijun, LONG Xiang, YANG Qixun. The researth of the sampling method for CT saturation in numberic busbar protection[J]. Relay, 2000, 28(8): 45-48.

[11] 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): 40-45.
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): 40-45.

[12] 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): 31-39.
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): 31-39.

[13] 张新刚, 王泽忠, 王晓华. 基于波形奇异性特征检测电流互感器铁心饱和的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 28-33.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong, WANG Xiaohua. New current transformer saturation detecting method based on singularity charaeteristics of waveforms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 33(1): 28-33.

[14] 曹豫宁, 李永丽, 张兴华, 等. 基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化, 2001, 20(3): 27-30.

CAO Yuning, LI Yongli, ZHANG Xinghua, et al. A new on-line criterion for current transformer saturation based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 20(3): 27-30.

[15] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 32(2): 53-57.
ZHENG Tao, LIU Wanshun, XIAO Shiwu, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protecion[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 32(2): 53-57.

[16] 公茂法, 夏文华, 张晓明, 等. 基于 HHT 的抗 CT 饱和变压器故障识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 79-85.
GONG Maofa, XIA Wenhua, ZHANG Xiaoming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 79-85.

[17] 宋斌华. 基于 Hilbert-Huang 变换和局部均值分解的时变结构模态参数识别[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
SONG Binhua. Time-varying structure modal parameters Based on the HHT and LMD[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[18] 贾东强, 韦统振, 霍群海, 等. 局部均值分解在电力系统间谐波和谐波失真信号检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 104-107.
JIA Dongqiang, WEI Tongzhen, HUO Qunhai, et al. Operating modes with dual-DVR coordinated compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 104-107.

[19] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005(2): 443-454.

[20] 赵永福, 焦彦军, 姚进岐. 基于 EMTP-ATP 的电流互感器饱和特性仿真[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会, 2009, 长沙理工大学, 25-40.
ZHAO Yongfu, JIAO Yanjun, YAO Jinqi. Current transformer saturation characteristics based on EMTP-ATP simulation[C] // China's Institutions of Higher Learning Power System and Its Automation Professional 25th Session Academic Annual Meeting, 2009, Changsha University of Science & Technology: 25-40.

收稿日期：2015-01-19； 修回日期：2015-04-10

作者简介：

罗 慧(1989-)，女，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统保护与控制；E-mail: luohui0421@foxmail.com

苗洪雷(1976-)，男，工程师，从事电力系统继电保护产品的研发工作；

曾祥君(1972-)，男，博士，教授，从事电力系统微机保护与控制教学和研究开发工作。

(编辑 姜新丽)