

母线采样值差动保护数据窗选取方法研究

王风光^{1,2}, 杜兴伟³, 吕航^{1,2}, 鲍凯鹏¹, 丁杰¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 智能电网保护和运行控制企业国家重点实验室, 江苏 南京 211102; 3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450018)

摘要: 采样值差动保护动作行为的正确性取决于数据窗选取的准确性。文中基于电流互感器 (current transformer, CT) 的磁滞特性, 分别对母差区内外故障情况下制动电流与差动电流瞬时值和变化率的特征进行分析, 在此基础上, 提出一种应用于母线采样值差动保护的数据窗选取方法: 首先选取数据窗特征点, 再由数据窗特征点倒推数据窗起始点, 并进行了实时数字仿真 (real time digital simulation, RTDS) 验证。本采样值差动保护原理不受系统频率、电流非周期分量及 CT 传变特性等影响, 在区外转区内复杂故障情况下, 依然可以保证差动保护动作的快速性和可靠性, 数据窗选取方法精准可靠, 提高了采样值差动保护动作的灵敏性。

关键词: 电流互感器; CT 饱和; 采样值; 差动保护; 数据窗

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)03-0112-06

0 引言

与传统的电流相量差动保护相比, 电流采样值差动保护具有动作速度快、计算量少等特点, 目前广泛应用于母线差动保护、变压器差动保护及线路光差保护等微机保护装置。国内虽然有大量文献对电流采样值差动保护原理进行探讨, 但是探讨的内容多集中在采样值差动动作模糊区的处理, 数据窗长度 R 及重复判断次数 S 的选取等问题, 对于采样值差动保护每周波数据窗的选取方法, 鲜有文献进行重点探讨^[1-3]。

电流采样值差动保护依靠被保护对象的电流瞬时值来进行故障判别, 其基本动作原理为: 如果连续 R 个采样点的数据窗中有不少于 S 个点符合动作条件, 则保护动作。每周波数据窗的选取正确与否是采样值差动保护动作行为是否正确的关键^[4-6]。

对采样值差动保护来说, 第 1 个数据窗比较容易选择, 但是后续数据窗的选择需要考虑多种因素的影响, 如系统频率、电流非周期分量及电流互感器 (current transformer, CT) 传变特性等。当故障一次电流很大, 尤其是一次电流中含有较大的非周期分量时, CT 将出现饱和, 将严重影响数据窗选取的正确性, 如果再发生复杂的转换性故障, 则更增加了数据窗选取的难度^[7-10]。

母差保护是电力系统中非常重要的元件保护装置, 母差保护的稳定、安全、可靠直接关系到电力系统的稳定性及供电的可靠性。当母线上的某个

支路发生故障时, 母线上所有支路的电流均流向故障点, 可能导致故障支路发生严重 CT 饱和, 因此将采样值差动保护原理应用于母差保护时, 需要保证 CT 饱和情况下保护动作行为的正确性^[11-12]。

文中分析了 CT 饱和时的故障电流特征, 并对比了母差区内外故障时差动电流及制动电流波形特征, 提出一种应用于采样值差动保护的数据窗选取方法, 可靠地保证了每周波数据窗选取的连续性及准确性, 提高了 CT 饱和情况下采样值差动保护动作的快速性及准确性。

1 采样值差动保护原理

1.1 饱和电流波形特征分析

图 1 为电流互感器铁芯磁滞回线图, 其中纵坐标 Ψ 为磁感应强度, 横坐标 i 为励磁电流。正常情况下, CT 铁心工作于励磁特性上磁感应强度 Ψ 较小的线性区域, CT 可以正确传变一次电流。当发生母线区外故障时, 故障线路流过全部短路电流, 线路 CT 流入较大含非周期分量的短路电流, 导致磁感应强度 Ψ 沿磁滞回线进入饱和区。CT 饱和导致励磁阻抗变小, 一次电流大部分流入励磁支路, CT 二次电流急剧下降, CT 无法正确传变一次电流波形, 随后由于反向励磁磁感应强度降低, CT 逐渐退出饱和, 可以正确传变一次电流^[13-14]。

基于电流互感器磁滞回线, 可以推论出 CT 在每个周波均存在线性传变区, 图 2 的 CT 饱和波形符合这一典型特征。

在饱和 CT 每周波均存在线性传变区的基础上, 分析图 2, 总结得到以下主要特征:

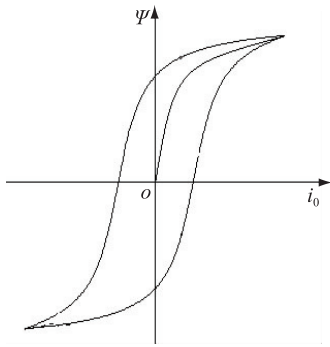


图1 电流互感器磁滞回线

Fig.1 Magnetic hysteresis loop of CT

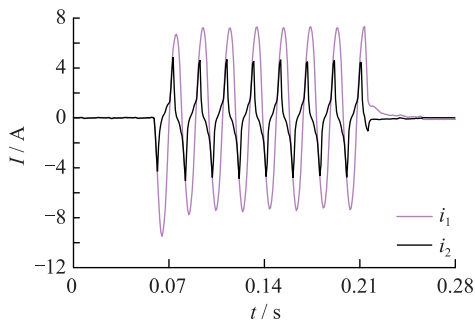


图2 CT饱和波形

Fig.2 Saturation waveform of CT

(1) 短路发生后,CT不会立即进入饱和,通过研究表明,即使故障电流达到额定电流的100倍以上,CT仍有不低于2ms的线性段可转变一次电流^[6-7];

(2) CT进入饱和后,二次电流波形出现严重缺损,无法正确转变一次电流;

(3) 即使短路电流中存在较大的正向非周期分量,也不会影响二次波形的正向过零点;

(4) 对于由非周期分量引起CT饱和的情况,CT励磁电流中包含大量非周期分量,波形偏向时间轴一侧^[15-17]。

1.2 CT饱和时区内故障电流对比

母线发生区外故障时,根据基尔霍夫定律,流入母线的电流与流出母线的电流应当大小相等,方向相反,因此母线差流为0。如果故障线路CT发生饱和,则CT一次电流大量流入励磁回路,CT二次电流急剧降低,差动电流随之上升。母线发生区内故障时,如果CT发生饱和,则由于CT二次电流降低导致差动电流降低,严重情况下(单电源系统)差动电流接近0。图3为CT饱和情况下母线区外故障时差动电流及制动电流波形,图4为CT饱和情况下母线区外故障时差动电流及制动电流变化率波形。

基于饱和CT在每周波均存在线性转变区的结

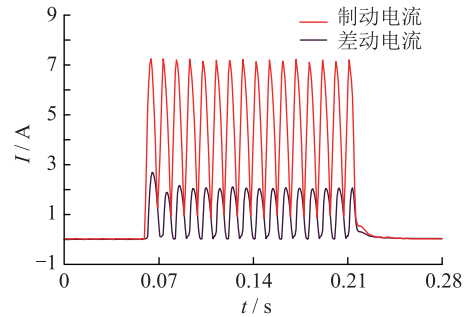


图3 CT饱和时区外故障差动电流及制动电流波形

Fig.3 Differential current and restraint current under external fault with CT saturated

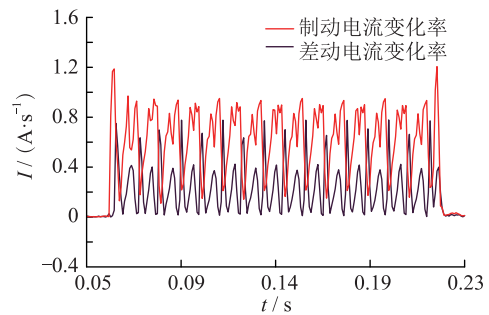


图4 CT饱和时区外故障差动电流及制动电流变化率

Fig.4 Change rate of differential current and restraint current under external fault with CT saturated

论,分析图3和图4,得差动电流及制动电流具备以下特征:

(1) 故障起始时刻,因为CT尚未进入饱和,所以制动电流瞬时值先于差动电流瞬时值发生变化;

(2) 在每周波正向过零点附近,由于CT均存在线性转变区,所以差动电流瞬时值接近于0,而制动电流瞬时值不为0;

(3) 在每周波正向过零点,制动电流变化率远远大于差动电流变化率。

图5为CT饱和情况下母线区内故障时差动电流及制动电流波形。分析图5可知,差动电流及制动电流不具备上述3个特征,在故障起始时刻,制动电流与差动电流同时发生变化。

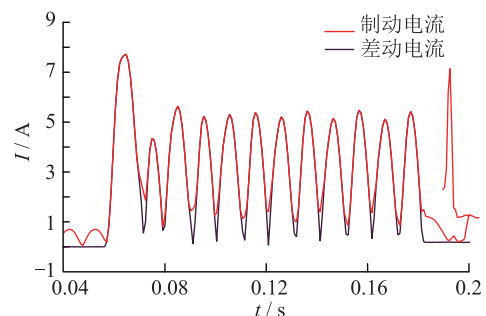


图5 CT饱和时区内故障差动电流及制动电流波形

Fig.5 Differential current and restraint current under internal fault with CT saturated

1.3 采样值差动保护原理

采样值差动保护在线性传变区内可保证动作行为的正确性,因此获取电流每周波的线性传变区是采样值差动保护的基础;通过制动电流、差动电流的瞬时值及变化率的对比,可以准确获取 CT 二次电流每个周波的正向过零点,进而获得线性传变区。采样值差动保护具体逻辑如下:

(1) 无论是母差区内故障还是区外故障,制动电流变化量均可以准确反映故障起始时刻,所以可以根据制动电流变化量来获取采样值差动保护的第一个数据窗,具体见式(1):

$$(|I_{rk} - I_{r(k-N)}| - |I_{r(k-N)} - I_{r(k-2N)}|) > I_{set1} \quad (1)$$

式中: I_r 为制动电流; k 为当前采样点; N 为一个周波的采样点数; I_{set1} 为启动门槛,需要躲过 CT 正常运行的不平衡电流。

(2) 将满足式(1)的第一个采样点记为 t_m , 以此点为起点,判断连续 R 个采样点的数据窗内是否有 S 点满足式(2)动作条件:

$$\begin{cases} I_{dk} > I_{dset1} \\ I_{dk} > K_{set1} I_{rk} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{dk} 为当前点差动电流; k 为当前采样点; I_{dset1} 为差动电流启动定值; K_{set1} 为比率制动系数。

(3) 因为第 2 个数据窗的起始点选取受多种因素影响,所以文中采用首先选取数据窗特征点,再由数据窗特征点倒推数据窗起始点的方法,如图 6 所示。以 t_m 为起点向后顺延 N 点 (N 为每周波采样点数),记为 t_n' ,以 t_n' 为起点向后寻找第 2 个数据窗的特征点 t_n ,该特征点需满足式(3):

$$\begin{cases} I_{dk} > I_{dset2} \\ I_{dk} > K_{set2} I_{rk} \end{cases} \quad (3)$$

如果找到满足式(3)的特征点,则认为发生了母差区内故障或母差区外故障支路 CT 饱和,继续执行步骤 4 进行母差区内外故障的判别,否则认为发生母差区外故障且 CT 未饱和,以 t_n' 为起点寻找下一个数据窗特征点。

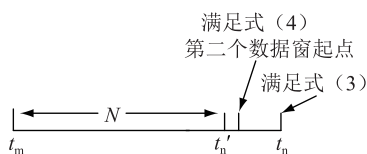


图 6 数据窗选取示意

Fig.6 Diagram of data window selection

(4) 将满足式(3)的特征点记为 t_n , 以此点为起点,向前寻找满足式(4)的采样点,将此采样点作为第 2 个数据窗的起点。

$$\begin{cases} \frac{dI_r}{dt} \geq K_{set3} \frac{dI_d}{dt} \\ I_r > K_{set4} I_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: dI_r/dt 为制动电流变化率; dI_d/dt 为差动电流变化率。如 1.2 节所述,在区外故障情况下,每周波正向过零点附近,制动电流变化率大于差动电流变化率,制动电流大于差动电流,故可以选取符合式(4)的采样点作为数据窗起始点。

(5) 如果向前寻找不到满足式(4)的采样点,则说明发生了区内故障,可以将 t_n' 作为第 2 个数据窗的起点,进行步骤 2 判别。如果寻找到满足式(4)的采样点,说明发生区外故障且 CT 饱和,本数据窗内闭锁母差保护,将此采样点作为第 2 个数据窗的起点,进行步骤 2 判别,并作为后续每个周波数据窗起始点的参考点。

(6) 重复步骤 3,4,5,进行采样值差动保护动作判别。

采样值差动保护流程如图 7 所示。

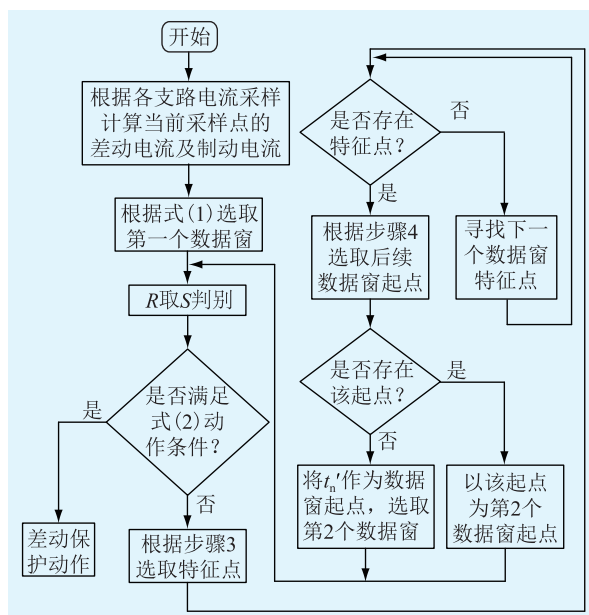


图 7 采样值差动保护原理流程

Fig.7 Flow chart of the sampling value differential protection

2 仿真实验

为验证上述电流采样值差动保护逻辑,搭建了 220 kV 实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)试验系统,系统如图 8 所示。

2.1 正常情况下母差区内故障

图 9 为保护录波图。使用式(1)准确选取第 1 个数据窗起点,使用式(2)进行采样值差动保护动作判别,采样值差动保护在故障后 9 ms 动作出口。

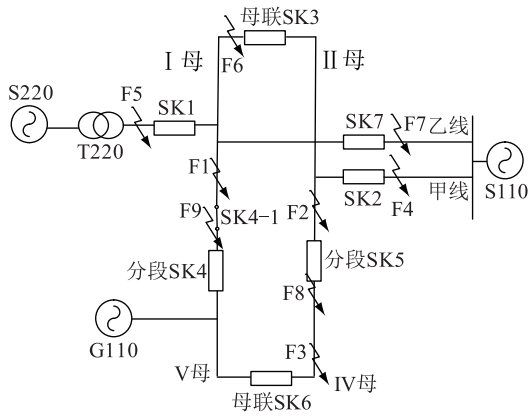


图8 RTDS 仿真模型

Fig.8 Simulation model of RTDS

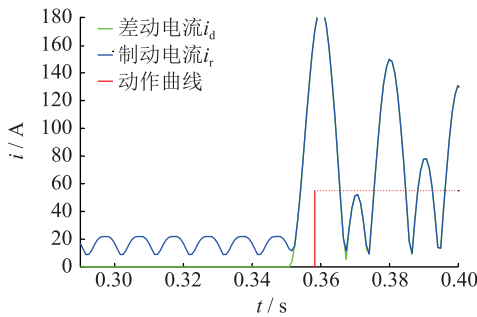


图9 区内故障保护录波

Fig.9 Record of internal fault

2.2 CT 饱和情况下母差区内故障

图 10 为保护录波图。虽然发生 CT 饱和,但仍然可以使用式(1)及式(2)进行采样值差动保护相关判别,采样值差动保护在故障后 9 ms 动作出口。

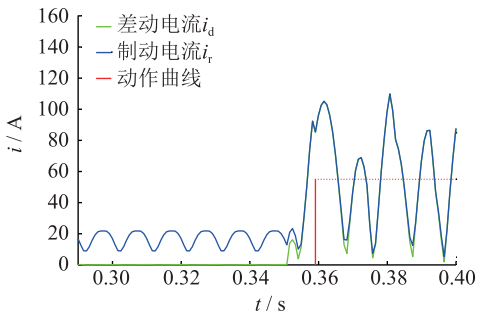


图 10 区内故障 CT 饱和保护录波

Fig.10 Record of internal fault with CT saturated

2.3 CT 饱和情况下母差区外故障

图 11 为保护录波图。使用式(1)选取第 1 个数据窗起始点,使用式(3)选取后续每个数据窗的特征点,再由特征点倒推数据窗起始点。每个数据窗内采样值差动保护均不满足动作条件,所以差动保护可靠不动作。

2.4 CT 饱和情况下母差区外转区内故障

转换时间 50 ms,图 12 为保护录波图。采样值

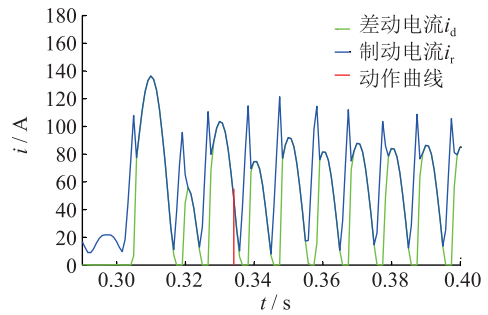


图 11 区外故障 CT 饱和保护录波

Fig.11 Record of external fault with CT saturated

差动保护从第 2 个周波开始,依靠数据窗特征点倒推数据窗起始点,区外故障时采样值差动保护可靠不动作。在区外转区内故障的第 1 个周波内,采样值差动保护快速动作出口,动作时间为区外转区内故障后 10 ms。

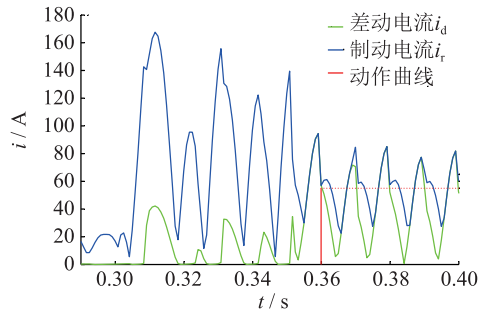


图 12 区外转区内故障 CT 饱和保护录波

Fig.12 Record of conversion fault with CT saturated

2.5 频率偏移及 CT 饱和情况下母差区外转区内故障

图 13 为频率偏移情况下区外转区内故障 CT 饱和保护录波图。频率偏移情况下,依靠式(4)仍然可以准确选取区外故障时每个周波的数据窗起始点,采样值差动保护可靠不动作。区外转区内故障后,由于频率偏移导致数据窗起始点的选取有偏差,采样值差动保护动作时间略有延迟,动作时间为区外转区内故障后 15 ms。

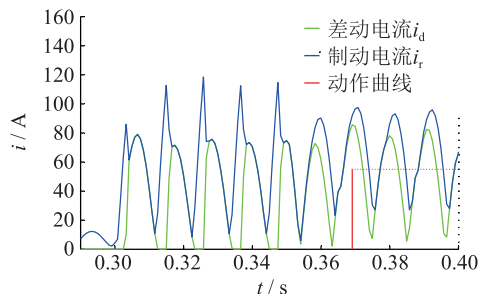


图 13 频率偏移情况下区外转区内故障 CT 饱和保护录波

Fig.13 Record of conversion fault with CT saturated and frequency shift

3 结语

基于 CT 进入饱和的“延迟”特性,以及 CT 在每个周波过零点附近均存在线性传变区的特点,文中提出了一种采样值差动保护原理,并着重介绍了采样值差动保护每周波数据窗的选取方法,进行了 RTDS 仿真实验验证原理的正确性。实验证明:

(1) 本数据窗选取方法不受系统频率、电流非周期分量及 CT 传变特性等影响,可保证在每个周波均准确选取数据窗,提高了采样值差动保护动作的可靠性;

(2) 对于区外转区内故障,采样值差动保护可保证在区外转区内故障后 1~2 个周波内动作,提高了差动保护动作的快速性;

(3) 采样值差动保护数据窗选取的准确性,为降低差动保护比率制动系数提供了保证,在母差区内故障并存在汲出电流时,差动保护依然可以快速动作,提高了差动保护动作灵敏性。

参考文献:

[1] 薛蓉. 多采样率转换算法对差动保护的应用研究[J]. 电力工程技术, 2014, 33(5): 62-65.
XUE Rong. Research on the impacts of multi-Rate conversion algorithm on differential protection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2014, 33(5): 62-65.

[2] 刘志仁, 殷志. 电流互感器饱和导致保护拒动事故的分析[J]. 电力工程技术, 2016, 35(4): 84-86.
LIU Zhiren, YIN Zhi. Analysis of protective action resistance accidents caused by current transformer saturation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(4): 84-86.

[3] 胡玉峰, 陈德树, 尹项根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000(10): 40-44.
HU Yufeng, CHEN Deshu, YIN Xianggen. New differential protection of power apparatus based on sampled value and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000(10): 40-44.

[4] 黄继东, 倪传坤, 郭文利, 等. 母线保护区外转区内故障再动作判据[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 120-124.
HUANG Jidong, NI Chuankun, GUO Wenli, et al. Re-tripping discrimination of busbar differential protection when external fault transforms internal faule[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 120-124.

[5] 张雪梅, 李湛. 线路故障引起母差保护异常动作的分析[J]. 电力工程技术, 2016, 35(5): 88-89.
ZHANG Xuemei, LI Zhan. Analysis of abnormal action of bus differential protection caused by line fault[J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(5): 88-89.

[6] 李肖博, 谭凌, 揭萍, 等. 基于虚拟电流波形特征的母线保护原理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 115-119.
LI Xiaobo, TAN Ling, JIE Ping, et al. An algorithm based on

virtual current for busbar protection[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(16): 115-119.

[7] 吴崇昊, 陆于平, 刘小宝, 等. 基于电流互感器线性传变区检测的母线采样值差动保护[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 70-73.
WU Chonghao, LU Yuping, LIU Xiaobao, et al. Busbar sampled value differential protection based on linear transfer section checking of TA[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 70-73.

[8] 徐晓春, 刘革明, 戴光武, 等. 3/2 开关接线方式下基于能量制动的抗电流互感器饱和措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 189-193.
XU Xiaochun, LIU Geming, DAI Guangwu, et al. Energy resistance based anti-saturation scheme with breaker-and-a-half configuration[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(12): 189-193.

[9] 杜丁香, 周泽昕, 王兴国, 等. 克服母线差动保护汲出电流的对策[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 86-90.
DU Dingxiang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Countermeasures to overcome outflow current for busbar differential protection[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(24): 86-90.

[10] 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, 30(15): 86-90.
ZHAO Yongbin, LU Yuping. An asynchronous method based saturation criterion for CT in busbar protection[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 86-90.

[11] 李艳鹏, 侯启方, 刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 15-18.
LI Yanpeng, HOU Qifang, LIU Chengzhi. Influence of non-periodic components on transient saturation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 15-18.

[12] 任龙飞, 郝治国, 张保会. 继电保护抗 TA 暂态饱和和改进 Prony 算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 126-131.
REN Longfei, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui. Improved Prony algorithm against transient CT saturation for relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 126-131.

[13] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-53.
LUO Hui, ZHOU Qingsong, Miao Honglei. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-53.

[14] 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.

[15] 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 characteristics of waveforms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 33(1): 28-33.
- [16] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武. 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. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 32(2): 53-57.
- [17] 公茂法, 夏文华, 张晓明. 基于HHT的抗CT饱和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. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 79-85.

作者简介:



王风光

王风光(1981—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作(E-mail:wangfg@nrec.com);

杜兴伟(1980—),男,硕士,高级工程师,从事继电保护运行与管理工 作(E-mail:81251659@qq.com);

吕航(1971—),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工 作(E-mail:lvh@nrec.com)。

Research of Data Window Selection for Busbar Current Sampled Value Differential Protection

WANG Fengguang^{1,2}, DU Xingwei³, LYU Hang^{1,2}, BAO Kaipeng¹, DING Jie¹

(1.NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. The State Key Laboratory for Smart Grid Protection and

Operation Control, Nanjing 211102, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: The correctness of the sampled value differential protection behavior depends on the accuracy of the data window selection. Based on the hysteresis characteristics of the current transformer (CT), this paper analyzes instantaneous value and the rate of change of restraint current and differential current under the situation of busbar internal and external faults, and puts forward a data window selection method for sampled value differential protection: first select feather point of data window, then by the feather point to push down the starting point of data window, and RTDS test is carried out to verification the principle. The sampled value differential protection principle is not affected by the system frequency, the non-periodic current and CT transfer characteristics and so on, and it can still guarantee the reliability and rapidity in the complex fault condition, data window selection method is accurate and reliable, improves the sensitivity of sampled value differential protection action.

Key words: current transformer; CT saturated; sampled value; differential protection; data window

(编辑 方 晶)