

## 基于二次插值算法的采样值保护新算法

江卫良, 陆源, 郑作伟, 郝后堂, 马营, 李延新

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 针对现有采样值保护存在动作模糊区大、定值不易整定等问题, 提出一种新型的基于二次插值算法的采样值保护算法。该算法利用二次插值算法来生成虚拟的过零点采样值, 计算数据窗内满足动作条件的时间和数据窗时间的比值, 进而将该比值和内部定值进行比较, 将比较结果作为保护主判据。该算法在不提高微机保护装置采样率的前提下, 能大幅提高采样值保护的動作门槛精度, 消除动作模糊区的影响。软件仿真和样机试验结果证明了该算法的有效性。

**关键词:** 二次插值算法; 采样值保护; 微机保护; 动作模糊区

### A new algorithm on sampled value protection based on quadratic interpolation algorithm

JIANG Weiliang, LU Yuan, ZHENG Zuowei, HAO Houtang, MA Ying, LI Yanxin

(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** For the existing sampled value protection, the fuzzy operating zone is too large and the protection settings are difficult to set for users. To solve the above problem, a new algorithm on the sampled value protection based on quadratic interpolation algorithm is proposed. The new algorithm generates virtual zero crossing sampled values based on interpolation algorithm. Within the selected data window, the ratio of meeting the operation conditions time and data window time is calculated, which will be compared with an inner setting. The comparison result is used as a main criterion of the sampled value protection based on interpolation algorithm. The algorithm can greatly improve the accuracy of operating threshold and eliminate the effects of fuzzy operating zone without increasing the sampling rate of computer protection devices. The results of computer simulation and prototype testing demonstrate the validity of the proposed algorithm.

This work is supported by National Science and Technology Support Program (No. 2012BAA15G01).

**Key words:** quadratic interpolation algorithm; sampled value protection; microprocessor-based protection; fuzzy operating zone

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0030-06

## 0 引言

二十世纪 90 年代以来, 随着微机保护装置的大量普及, 采样值差动保护作为微机保护特有的一种保护形式, 受到了广泛的关注。众多科研院所和设备研制厂家对采样值差动保护进行了深入的研究, 并且逐步推广应用, 积累了很多宝贵的理论和实践经验<sup>[1-13]</sup>。

采样值差动保护和常规相量差动保护相比, 具有抗干扰数据能力强、动作速度快、抗 CT 饱和能

力强等优点, 但是也具有存在动作模糊区的缺点<sup>[11-13]</sup>。采样值差动保护由于存在动作模糊区的问题, 动作边界条件存在不确定性, 因此, 它不能作为一个通用的继电器来独立使用, 这也严重制约了它的应用范围。为了保证采样值差动保护动作的可靠性, 相关定值的选取不能保证它有足够的灵敏度, 依然要靠相量差动保护来保证差动保护的灵敏度。因此, 目前采样值差动保护一般不能脱离相量差动保护单独使用, 只是作为相量差动保护的一个有益的补充。

理论分析和实践表明, 微机保护装置的采样率越高, 采样值差动保护的动作模糊区就越小。理论上, 当采样率足够高的时候, 动作模糊区足够小,

使得采样值差动保护的动作为返回精度满足相关规范对定值精度的要求, 这时就可认为消除了动作模糊区的影响。但是微机保护装置由于受到硬件水平的制约和成本的考虑, 采样率并不能无限提高, 单靠提高采样率仍无法完全消除动作模糊区的影响。本文在不提高当前微机保护装置采样率的前提下, 从软件上入手, 提出基于二次插值的采样值保护新算法, 在较低采样率条件下也可消除动作模糊区的影响, 可用作通用的过量或欠量继电器, 例如差动速断保护、过流速断保护等。

## 1 原理与实现

设待测量的交流信号  $i(t)$  为

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(2\pi ft + 2\pi ft_0) = \sqrt{2}I \sin(\varphi(t) + \varphi_0) \quad (1)$$

式中:  $I$  为交流信号有效值;  $f$  为交流信号频率;  $t$  为采样时刻;  $t_0$  为初始时刻;  $\varphi(t) = 2\pi ft$ ;  $\varphi_0 = 2\pi ft_0$ 。

设每周期对交流信号  $i(t)$  采样  $N$  点, 对应采样频率为  $f_s$ , 则式(1)离散化为

$$i_k = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi f}{f_s}k + \varphi_0\right) \quad (2)$$

式中:  $k$  为采样序号, 为整数  $0, 1, 2, \dots$ ;  $i_k$  为第  $k$  点的采样值。

### 1.1 定值的设置

基于二次插值算法的采样值保护设置三个用户可整定定值和五个内部固定定值。

三个用户可整定定值为  $I_{\text{set}}$ 、 $K_{\text{ret}}$  和  $t_{\text{set}}$ 。 $I_{\text{set}}$  为交流量的动作门槛定值, 按有效值整定,  $K_{\text{ret}}$  为返回系数,  $t_{\text{set}}$  为延时定值。这三个定值的整定方法和常规相量保护一样, 均按照行业内相关整定技术规范的要求进行整定。

五个内部固定定值为:  $I_{\text{set}}$ 、 $\varphi_{\text{iset}}$ 、 $W$ 、 $K_{\text{iset\_opt}}$  和  $K_{\text{iset\_ret}}$ , 其中定值  $I_{\text{set}}$  为采样值门槛定值, 定值  $\varphi_{\text{iset}}$  为相位角门槛定值, 定值  $W$  为连续数据窗所取的采样点数定值, 定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  为动作比率定值, 定值  $K_{\text{iset\_ret}}$  为返回比率定值。

对于式(1)所示的交流信号  $i(t)$ , 假设其有效值刚好为  $I_{\text{set}}$ , 则定值  $I_{\text{set}}$ 、 $\varphi_{\text{iset}}$  和定值  $I_{\text{set}}$  之间的关系如图 1 所示, 其关系表达式为式(3)。

$$I_{\text{set}} = \sqrt{2}I_{\text{set}} \sin(\varphi_{\text{iset}}) \quad (3)$$

定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  反映的是有效值为  $I_{\text{set}}$  的交流量在一个数据窗内, 其瞬时值的绝对值大于  $I_{\text{set}}$  的累积时间与数据窗时间的比值。在数据窗取半个周波或

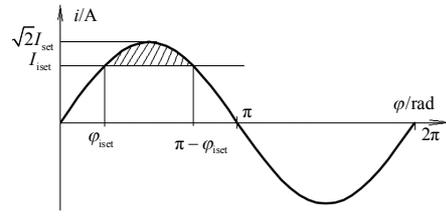


图 1 定值  $I_{\text{set}}$ 、 $\varphi_{\text{iset}}$  和  $I_{\text{set}}$  之间的关系

Fig. 1 Relationship between  $I_{\text{set}}$ ,  $\varphi_{\text{iset}}$  and  $I_{\text{set}}$

一个周波(内部定值  $W = \frac{N}{2}$  或  $N$ )的条件下, 定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  与定值  $\varphi_{\text{iset}}$  之间的关系为

$$K_{\text{iset\_opt}} = \frac{\pi - 2\varphi_{\text{iset}}}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi}\varphi_{\text{iset}} \quad (4)$$

定值  $K_{\text{iset\_ret}}$  反映的是有效值为  $K_{\text{ret}}I_{\text{set}}$  的交流量在一个数据窗内, 其瞬时值的绝对值大于  $I_{\text{set}}$  的累积时间与数据窗时间的比值。在数据窗取半个周波或一个周波(内部定值  $W = \frac{N}{2}$  或  $N$ )的条件下, 定值

$K_{\text{iset\_ret}}$  与定值  $I_{\text{set}}$ 、 $K_{\text{ret}}$  和  $I_{\text{set}}$  之间的关系为

$$K_{\text{iset\_ret}} = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{I_{\text{set}}}{\sqrt{2}K_{\text{ret}}I_{\text{set}}}\right) = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}I_{\text{set}} \sin(\varphi_{\text{iset}})}{\sqrt{2}K_{\text{ret}}I_{\text{set}}}\right) = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sin(\varphi_{\text{iset}})}{K_{\text{ret}}}\right) \quad (5)$$

### 1.2 保护算法

为了实现基于二次插值算法的采样值保护, 需要先进行一系列的运算, 具体计算步骤如下。

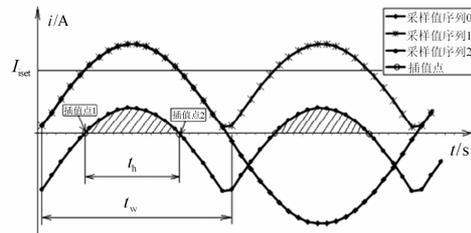


图 2 采样值变换序列

Fig. 2 Conversion series of sampled values

1) 交流信号  $i(t)$  对应的离散化采样值序列如图 2 中“采样值序列 0”所示。

2) 对采样值序列 0 中的每个采样值进行取绝对值运算, 得到采样值序列 1, 如图 2 中“采样值序列 1”所示。

3) 对采样值序列 1 中每个采样值进行减去  $I_{\text{set}}$

运算,得到采样值序列 2,如图 2 中“采样值序列 2”所示。

4) 对采样值序列 2,通过二次插值法计算采样值序列 2 的过零点时刻,形成虚拟的过零点采样值,如图 2 中“插值点”所示。采样值序列 2 加上通过插值法形成的虚拟过零点采样值,构成采样值序列 3。

5) 对采样值序列 3,从当前点开始往前取连续  $W$  点的数据窗(本文中  $W$  点只针对原始采样点进行计数,如果某数据窗内两个原始采样点之间存在虚拟的过零点采样值,则该虚拟的过零点采样值自然也包含在该数据窗内),数据窗的时间宽度为  $t_w$ 。在数据窗内,对采样值大于零的采样间隔时间进行累加运算,采样值大于零的累积时间为  $t_h$ 。

6) 根据  $t_h$  和  $t_w$ , 计算  $K$  值。 $K$  值计算公式为

$$K = \frac{t_h}{t_w} \quad (6)$$

### 1.3 保护判据

根据实时计算所得的  $K$  值和内部固定动作定值  $K_{\text{iset\_opt}}$ 、返回定值  $K_{\text{iset\_ret}}$  的比较结果,保护的最终判据分为如下三种情况:

1) 若  $K > K_{\text{iset\_opt}}$ , 说明待测交流信号的有效值大于定值  $I_{\text{set}}$ , 过量保护满足动作判据; 当  $K < K_{\text{iset\_ret}}$  时, 过量保护满足返回判据。

2) 若  $K = K_{\text{iset\_opt}}$ , 说明待测交流信号的有效值等于定值  $I_{\text{set}}$ 。

3) 若  $K < K_{\text{iset\_opt}}$ , 说明待测交流信号的有效值小于定值  $I_{\text{set}}$ , 欠量保护满足动作判据; 当  $K > K_{\text{iset\_ret}}$  时, 欠量保护满足返回判据。

## 2 内部定值的整定方法

$\varphi_{\text{iset}}$  是一个关键的内部定值,一旦内部定值  $\varphi_{\text{iset}}$  和  $W$  确定下来,则定值  $I_{\text{iset}}$  可根据式(3)确定,定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  可根据式(4)确定,定值  $K_{\text{iset\_ret}}$  可根据式(5)确定,这样所有的内部定值都可确定下来。所以下面重点讨论内部定值  $W$  和  $\varphi_{\text{iset}}$  的取值原则。

基于二次插值算法的采样值保护的数据窗为从当前采样点开始,向前取  $W$  点的数据窗,并且数据窗是随着采样值向后逐点平移的。为了保证在数据窗平移过程中, $K$  值的计算保持稳定,不受数据窗移动的影响, $W$  值应取半个周波或者一个周波的采样点数,  $W = \frac{N}{2}$  或  $N$ 。如要求保护快速动

作,可采用短数据窗,  $W = \frac{N}{2}$ 。

定值  $\varphi_{\text{iset}}$  的基本取值范围是:  $0 < \varphi_{\text{iset}} < \frac{\pi}{2}$ 。当  $\varphi_{\text{iset}}$  趋近于 0 时,定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  趋近于 1,计算  $K$  值也趋近于 1,此时对交流幅值变化的检测不灵敏;当  $\varphi_{\text{iset}}$  趋近于  $\frac{\pi}{2}$  时,定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  趋近于 0,此时对交流幅值变化的检测较灵敏,但是由于定值  $K_{\text{iset\_opt}}$  太小,会造成较大的误差。综合分析,本文建议取  $\varphi_{\text{iset}} = \frac{\pi}{4}$ ,此时  $K_{\text{iset\_opt}} = 0.5$ ,  $I_{\text{iset}} = I_{\text{set}}$ , 采样值动作门槛定值恰好和有效值动作门槛定值相等。

## 3 二次插值算法

在微机保护中,利用插值算法来虚拟采样数据的技术已经获得非常成熟的应用,广泛用于频率测量、线路差动保护数据同步、智能变电站数据同步等领域<sup>[14-20]</sup>。微机保护中常用的插值算法包括线性插值、二次插值和三次样条插值等。考虑到插值精度和计算量等因素,本文在文献[14]描述的二次插值算法基础上做进一步的分析。

设采样间隔为  $\tau$ ,  $A(\tau, y_0)$  为当前采样点,  $B(0, y_1)$  为当前点的前 1 个采样点,  $C(-\tau, y_2)$  为当前点的前 2 个采样点,  $x(t, 0)$  为过零点,过零点  $x$  处于  $A$  和  $B$  采样点之间,如图 3 所示。

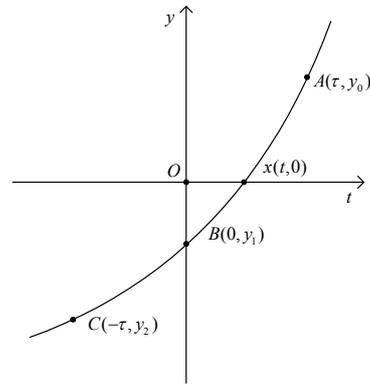


图 3 二次插值算法示意图

Fig. 3 Principle of quadratic interpolation algorithm

设二次拟合曲线为

$$f(t) = at^2 + bt + c \quad (7)$$

根据已知的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  采样点,使用二次插值法拟合  $A$  至  $C$  间的曲线,计算出过零点  $x$  的横坐标时刻  $t$ 。计算结果为

$$a = \frac{y_0 + y_2 - 2y_1}{2\tau^2} \quad (8)$$

当  $a \neq 0$ ,  $t \geq 0$ ,  $y_0 \geq 0$  且  $y_1 < 0$  时, 过零点时刻  $t$  为

$$t = \frac{(y_2 - y_0) + \sqrt{(y_0 - y_2)^2 - 8(y_0 + y_2 - 2y_1)y_1}}{2(y_0 + y_2 - 2y_1)} \tau \quad (9)$$

当  $a \neq 0$ ,  $t \geq 0$ ,  $y_0 \leq 0$  且  $y_1 > 0$  时, 过零点时刻  $t$  为

$$t = \frac{(y_2 - y_0) - \sqrt{(y_0 - y_2)^2 - 8(y_0 + y_2 - 2y_1)y_1}}{2(y_0 + y_2 - 2y_1)} \tau \quad (10)$$

当  $a = 0$  时, 过零点时刻  $t$  为

$$t = \frac{-2y_1}{y_0 - y_2} \tau \quad (11)$$

#### 4 仿真分析

通过 Matlab 编程对基于二次插值算法的采样值保护进行仿真计算和误差分析<sup>[21]</sup>。输入交流信号采用式(1)的定义, 离散采样值采用式(2)的定义, 信号频率设定为 50 Hz。

三个用户定值设定为:  $I_{\text{set}} = 1 \text{ A}$ 、 $K_{\text{ret}} = 0.95$ 、 $t_{\text{set}} = 0 \text{ s}$ ; 五个内部固定定值设定为:  $I_{\text{iset}} = 1 \text{ A}$ 、 $\varphi_{\text{iset}} = \frac{\pi}{4}$ 、 $W = \frac{N}{2}$ 、 $K_{\text{iset\_opt}} = 0.5$ 、 $K_{\text{iset\_ret}} = 0.4655$ 。

在不同的每周波采样点数  $N$  和初相角  $\varphi_0$  下, 对基于二次插值算法的采样值保护进行仿真计算, 得到最小动作电流  $I_{\text{op}}$ , 进而计算其动作误差  $\Delta\varepsilon = (I_{\text{op}} - I_{\text{set}}) / I_{\text{set}}$ 。每周波采样点数  $N$  取值分别为 12、20、40、80; 初相角  $\varphi_0$  取值从  $-\pi$  至  $\pi$ , 变化步长为  $\pi/1000$ ; 交流信号从 0.95 A 逐步增大到 1.05 A, 变化步长为 0.000 1 A。仿真结果如图 4 所示。

由仿真结果可知,  $N = 12$  时最大相对误差为  $\Delta\varepsilon = 1.78\%$ ,  $N = 20$  时最大相对误差为  $\Delta\varepsilon = 0.03\%$ ,  $N = 40$  时最大相对误差为  $\Delta\varepsilon = 0.01\%$ ,  $N = 80$  时最大相对误差为  $\Delta\varepsilon = 0.01\%$ 。可见基于二次插值算法的采样值保护在  $N = 40$  点时动作误差已非常小, 采用每周波 40 点采样足以满足保护动作精度的要求, 继续提高采样率对动作精度影响不大。

#### 5 试验验证

本文提出的基于二次插值算法的采样值保护已在微机保护装置样机上实现, 用作发电机差动速断保护进行测试验证。样机的主 CPU 采用 OMAP-

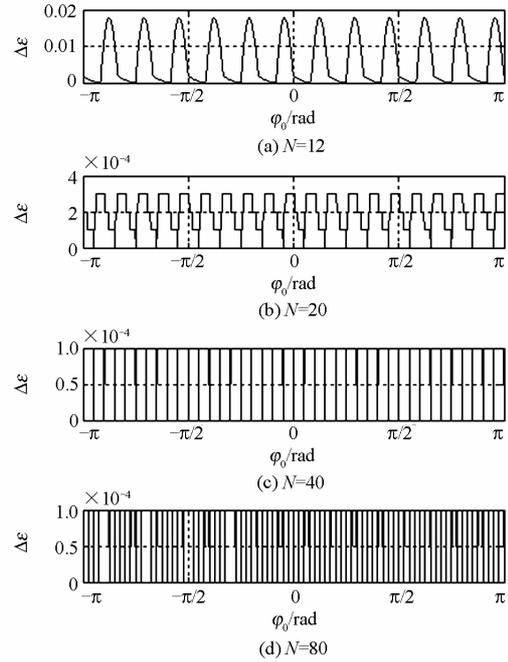


图 4 动作误差的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of operating error

L138 处理器, AD 采样为 16 位, 每周波采样 40 点, CT 额定电流  $I_n$  为 1 A。内部定值的设置和仿真计算相同。通过样机对基于二次插值算法的采样值保护进行试验研究, 采用继电保护测试仪加量测试, 动作门槛电流定值  $I_{\text{set}}$  取不同值时, 动作误差统计结果如表 1 所示。

表 1 动作误差的试验结果

Table 1 Testing results of operating error		
定值	最大绝对误差	最大相对误差/%
$0.1I_n$	$-0.002I_n$	-2.0
$0.2I_n$	$-0.003I_n$	-1.5
$0.5I_n$	$-0.007I_n$	-1.4
$1.0I_n$	$-0.014I_n$	-1.4
$2.0I_n$	$-0.018I_n$	-0.9
$5.0I_n$	$-0.029I_n$	-0.6
$10.0I_n$	$-0.101I_n$	-1.0

根据《GB/T 14598.300-2008 微机变压器保护装置通用技术要求》、《DL/T 671-2010 发电机变压器组保护装置通用技术条件》等规范的要求, 发电机差动保护整定值的准确度应小于  $\pm 5\%$  或  $\pm 0.02I_n$ 。样机试验结果表明, 采用基于二次插值算法的采样值保护原理作为发电机差动速断保护, 其动作门槛具有很高的精度, 完全能够满足相关技术规范的要求, 可以认为消除了采样值保护动作模糊区的影响。

## 6 结语

本文提出了一种基于二次插值算法的新型采样值保护算法。该算法利用二次插值算法来生成虚拟的过零点采样值,计算数据窗内满足动作条件的时间和数据窗时间的比值,进而将该比值和内部定值进行比较,将比较结果作为保护主判据。该算法在不提高微机保护装置采样率的前提下,和现有的采样值差动保护算法相比,其动作门槛精度更高,消除了动作模糊区的影响;并且,其用户定值的设置和整定方法,与常规相量保护一致,便于用户整定,有利于推广应用。软件仿真和样机试验结果证明了本文所提算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 杨恒坤, 邓祥力, 王传启, 等. 采样值差动保护安全性及灵敏度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 107-113.  
YANG Hengkun, DENG Xiangli, WANG Chuanqi, et al. Research on security and sensitivity of sampled-value differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 107-113.
- [2] 李刚, 陈军良, 李君毅. 基于前置数学形态滤波器的采样值差动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 52-56.  
LI Gang, CHEN Junliang, LI Junyi. A differential protection method with mathematical morphology filter[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 52-56.
- [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, 24(10): 40-44.  
HU Yufeng, CHEN Deshu, YIN Xianggen. New differential protection of power apparatus based on sampled values and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 40-44.
- [4] 胡玉峰, 陈德树, 尹项根, 等. 自适应采样值差动在变压器保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 31-34.  
HU Yufeng, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. Sampling value based adaptive differential current protection of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 31-34.
- [5] 陈德树, 尹项根, 张哲. 再谈采样值差动保护的一些问题[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 1-3.  
CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. On problems about sampling value differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 1-3.
- [6] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 采样值电流差动保护原理的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(1): 1-3.  
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, MA Tianhao, et al. Study on the principle of current differential protection based on sampled values[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(1): 1-3.
- [7] 江卫良, 郝后堂. 变压器采样值差动保护误动分析及改进[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 37-40.  
JIANG Weiliang, HAO Houtang. Analysis and improvement on malfunction of sampled value differential protection for transformer[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 37-40.
- [8] JIANG Weiliang, HAO Houtang. Design and application of digital transformer differential protection based on new principles[C] // The Asia Pacific Power Association Annual Meeting, October 18-22, 2004, Shanghai, China: 177.
- [9] 张方军, 张伟中. 采样值电流差动保护一种新动作判据的研究分析[J]. 继电器, 2006, 34(18): 12-14.  
ZHANG Fangjun, ZHANG Weizhong. Analysis of a new action criterion for current sample value differential protection[J]. Relay, 2006, 34(18): 12-14.
- [10] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 电流采样值差动保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 27-33.  
LIN Xiangning, HE Zhanhu, LIU Shiming, et al. Discussions on some aspects of sampling value differential current protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 27-33.
- [11] 杨经超, 尹项根, 陈德树, 等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 71-77.  
YANG Jingchao, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Study on the operating characteristic of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 71-77.
- [12] 赵东, 黄益庄. 关于采样值差动动作模糊区的若干问题的讨论[J]. 继电器, 2003, 31(2): 18-22.  
ZHAO Dong, HUANG Yizhuang. Study of several points on the action fuzzy region of sample value differential relay[J]. Relay, 2003, 31(2): 18-22.
- [13] 张方军, 乐秀璠. 采样值电流差动保护动作模糊区分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 81-84.  
ZHANG Fangjun, LE Xiufan. Analysis of action fuzzy area of sampled value current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 81-84.
- [14] 方存洋, 陈玉兰, 潘汉广. 一种实用的软件测频算法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 36-39.  
FANG Cunyang, CHEN Yulan, PAN Hanguang. Power

- frequency measurement algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 36-39.
- [15] 曹团结, 陈建玉, 黄国方. 基于 IEC61850-9 的光纤差动保护数据同步方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 58-60.  
CAO Tuanjie, CHEN Jianyu, HUANG Guofang. A study on data synchronization method for optical fiber differential protection based on IEC 61850-9[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 58-60.
- [16] 蔡超, 陆于平, 黄涛, 等. 基于插值和时标变换的智能变电站保护数据重采样算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 80-85.  
CAI Chao, LU Yuping, HUANG Tao, et al. Re-sampling algorithm for smart substation protection data based on interpolation and time scale transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 80-85.
- [17] 李宝伟, 倪传坤, 唐艳梅, 等. 智能变电站组网传输采样值光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 142-147.  
LI Baowei, NI Chuankun, TANG Yanmei, et al. Research of the sample synchronization scheme for optical differential protection based on sampled value transmit by network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 142-147.
- [18] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新一代重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.  
WANG Ye, LU Yuping, XU Yichao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.
- [19] 朱超, 梅军, 王椿丰, 等. 基于低延迟有限冲击响应滤波器的差动保护采样率转换算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 241-248.  
ZHU Chao, MEI Jun, WANG Chunfeng, et al. FIR filter with reduced group delay based a sampling frequency conversion algorithm for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 241-248.
- [20] 黄纯, 彭建春, 刘光晔, 等. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 75-79.  
HUANG Chun, PENG Jianchun, LIU Guangye, et al. Research on software synchronous sampling in measurement of period electric signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 75-79.
- [21] 赵磊, 单渊达, 李蔚. 正弦信号二次插值算法的误差分析[J]. 继电器, 2004, 32(13): 11-14.  
ZHAO Lei, SHAN Yuanda, LI Wei. Error analysis of quadratic interpolation method on sine wave signal[J]. Relay, 2004, 32(13): 11-14.

收稿日期: 2014-11-06; 修回日期: 2014-12-22

作者简介:

江卫良(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护、厂站自动化; E-mail: jiangweiliang@sgepri.sgcc.com.cn

陆源(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力营销管理技术、电力系统自动化;

郑作伟(1984-), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、厂站自动化。

(编辑 周金梅)