

多采样率转换算法对差动保护的应用研究

薛蓉

(南京供电公司,江苏南京 210019)

摘要:智能变电站中要求合并单元的数据采集满足“一处采集,全站共享”,因此合并单元数字接口必须具有采样率转换的功能,并且满足差动保护动作的要求。文中主要研究了通过抽取和插值环节的级联实现任意分数倍采样频率归一化的方法及其对差动保护差电流的影响,设计了一种零相位滤波算法以解决在采样频率转换过程中高阶 FIR 数字滤波器带来的群延迟较大的问题,与抽取和插值算法配合使用,可以将任意不同采样频率的 ECT 采样数据统一到相同的采样基准下,实现差动保护各分支采样数据之间频率的快速统一,提高保护动作的快速性。

关键词:采样频率转换;差电流;群延迟;零相位滤波

中图分类号:TM774

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0062-04

智能变电站合并单元的数据采集需满足“一处采集,全站共享”,对于继电保护装置,其采样率满足 IEC 60044-8 的要求(额定采样频率可取 1 kHz, 2.4 kHz 和 4 kHz 中的任意一种);对于计量设备,其采样率在 8 kHz 以上;对于电能质量分析装置和行波测距装置,其采样率要求在 12.8 kHz 以上^[1,2]。DL/T 282—2012 则要求合并单元应能可配置采样率,以满足智能变电站中各智能电子装置(IED)的不同需求。因此在智能变电站中,合并单元的数字接口必需具有采样率转换的功能,但是在采样率转换的同时,需要确保差动保护装置能正确判别故障区域和发出动作跳闸信号^[3-5]。文中通过设计一种零相位滤波算法,实现了差动保护各分支采样数据之间频率的快速统一。

1 多采样率信号处理

多采样率信号处理实际上是对采样后的离散序列进行重新采样的过程,主要包括抽取和内插两部分内容,通过抽取和插值的级联可以实现任意分数倍采样频率转换^[6,7]。

降低采样频率以去除多余数据的过程称为信号的抽取,是把原采样序列 $x(n)$ 每隔 $D-1$ 个取一个数据,以形成一个新的序列。整数 U 倍插值就是在已知的 2 个抽样点之间插入 $U-1$ 个抽样值的点。将二者级联则可以实现任意分数倍采样频率之间的转化,采样频率转换因子为 U/D ,其实现过程如图 1 所示^[8,9]。数字滤波器的输入、输出都是离散时间信息,且单位脉冲响应 $h(n)$ 也是离散的。对于一个线性时不变系统,滤波器的时域输入 $x(n)$ 、输出 $y(n)$ 的关系为 $y(n) = x(n) \cdot h(n)$ 。由图 1(a)可见,插值过程中的抗镜像滤波器 $h_U(n)$ 和抽取过程中的抗混叠滤波器 $h_D(n)$ 其输入信号频率均为 $f = Uf_s$, 故可以等效为一个组合低通

滤波器 $h_R(n)$,其理想频率特性为:

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} U & 0 \leq |\omega| \leq \min(\frac{\pi}{U}, \frac{\pi}{D}) \\ 0 & \min(\frac{\pi}{U}, \frac{\pi}{D}) \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

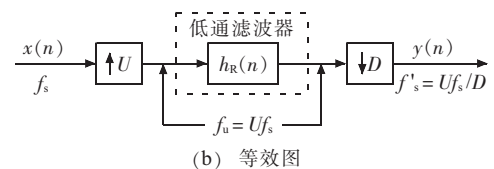
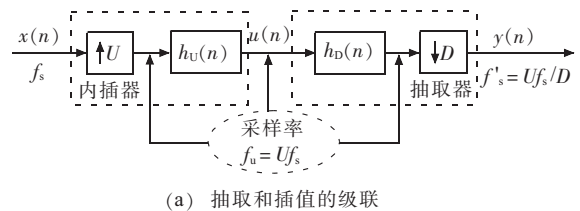


图 1 按有理因子 U/D 的采样频率转换方法

IEC 60044-8 标准规定电子式电流互感器数字化输出数据的额定采样频率可取 1 kHz, 2.4 kHz 和 4 kHz 中任意一种。通过适当设置抽取因子 D 和插值因子 U , 用抽取和级联来实现 IEC 60044-8 标准规定的 3 个采样频率之间的转换,如图 2 所示。

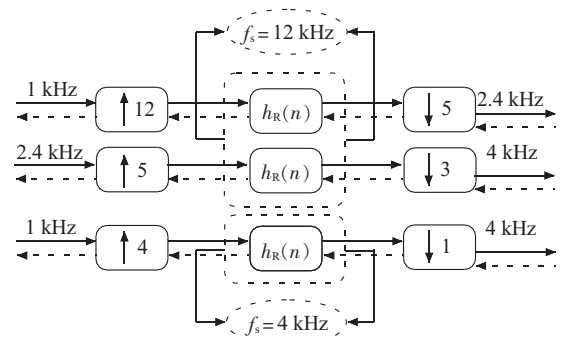


图 2 采样频率转换框图

实现任意分数倍采样频率转换可以分为以下两步:第一,确定转换后的统一采样基准,设置适当的抽取因

子 D 和插值因子 U ; 第二, 设计满足频率转换要求的数字低通滤波器。而对转换后差电流、保护动作时间的影响则关键取决于第二步, 即低通滤波器的设计, 其性能的优劣直接影响采样频率转换的整个效果。

数字滤波器采用有限脉冲响应滤波器(FIR), 由于 FIR 滤波器不存在系统极点, 主要采用非递归结构, 因而从理论上和从实际的有限精度的运算中, 都是绝对稳定的系统。FIR 滤波器可以采用快速傅里叶变换(FFT)来实现, 在阶数相同的条件下, 运算速度可以快很多, 同时 FIR 具有严格的线性相位的优点, 因此文中在采样频率转换过程中选择 FIR 滤波器。

3 零相位滤波算法

通过对线性相位脉冲响应系数 $h(n)$ 的循环移位实现了零相位脉冲响应, 消除了群延迟。假设线性相位 FIR 滤波器的阶数为 N , 其离散傅里叶变换(DFT)为:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi kn/U} \quad k=0, 1, 2, \dots, U-1 \quad (2)$$

令:

$$e^{j2\pi/U} = W_U \quad (3)$$

将式(3)代入(2), 得到:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) W_U^{-nk} \quad k=0, 1, 2, \dots, U-1 \quad (4)$$

计算一个序列的 DFT 是以该周期序列为前提的, 可以看作将脉冲响应 $h(n)$ 系数平均分布在一个圆周上, 起点则是 $h(n)$ 系数的第一个点, 因此对 $h(n)$ 作 DFT, 得到其相频响应为:

$$\Phi(\omega) = -2\pi f \left(\frac{N-1}{2} \right) \quad (5)$$

现将 $h(n)$ 循环左移 $(N-1)/2$ 个采样点, 新的脉冲响应序列 $h_1(n)$ 的 DFT 变换为:

$$H_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_1(n) W_U^{-nk} \quad (6)$$

$$H_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h\left(n + \frac{N-1}{2}\right) W_U^{-nk} \quad (7)$$

令 $n' = n + (N-1)/2$, 则:

$$H_1(k) = W_U^{k[(N-1)/2]} \sum_{n=0}^{N-1} h(n') W_U^{-n'k} = W_U^{k[(N-1)/2]} H(k) = e^{j(2\pi/U)k[(N-1)/2]} H(k) \quad (8)$$

$h_1(n)$ 的相频响应为:

$$\Phi_1 = \begin{cases} \frac{\pi k}{U} (N-1) = \pi f(N-1) & N \text{ 为奇数} \\ \frac{\pi k}{U} (N) = \pi f N & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (9)$$

通过上述分析可知, $h(n)$ 的相频响应为:

$$\Phi_1 = \begin{cases} -2\pi f \frac{N-1}{2} & N \text{ 为奇数} \\ -2\pi f \frac{N-1}{2} & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)和(10)可得, N 为奇数时, $H_1(k)$ 的相位为 $\pi f(N-1) - \pi f(N-1) = 0$; N 为偶数时, 相位为 $\pi f N - \pi f(N-1) = \pi f$ 。因此当 N 为奇数时, 利用 DFT 变换获得了零相位滤波器, 实现零群延迟的滤波算法。

但是该方法在实现时需要缓存 M 个采样周期的数据, 其缓存延时 t_d 由信号序列长度 M 与信号采样频率 f_s 决定, 序列长度 M 越小, 缓存延时越短。同时从图 3 观察到所设计数字滤波器的阶跃响应至少需要 5 个点才能稳定, 因此对于进入数字滤波器的信号序列, 其长度 M 越大, 受到滤波器边缘效应的影响越小, 滤波后输出的最终值越稳定。

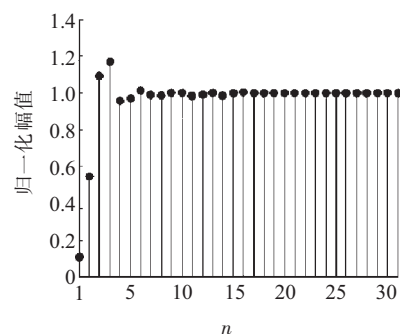


图 3 滤波器的阶跃响应

在充分考虑 M 对延时与稳定性的影响后, 选取 $M=5$, 在采样频率最低为 1 kHz 时, 缓存延时为 5 ms。

4 仿真实验

为了验证文中所提算法的可行性和有效性, 利用 Matlab/Simulink 对 500 kV 两圈变压器进行仿真分析, 系统模型如图 4 所示, 变压器采用 Yn/D-11 接线, 转角方式为减零序的相电流差动方式, 由软件算法实现。

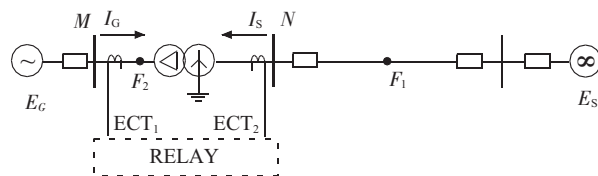


图 4 500 kV 系统仿真模型

ECT₁ 和 ECT₂ 为分别装设在变压器首端和末端的电子式电流互感器, 其分别为变压器差动保护装置提供采样数据。设 ECT₁ 输出数据采样频率为 4 kHz, ECT₂ 输出数据采样频率为 1 kHz。以高采样频率的采样数据向低采样频率转化为例进行仿真, 首先确定插值因子 $U=1$, 抽取因子 $D=4$, 关于 FIR 滤波器系数的设计, 采用基于切比雪夫逼近原理的等波纹设计方法设计低通滤波器的系数, 通过多次仿真优化取滤波器阶

数 $N=47$, 幅频响应如图 5 所示。

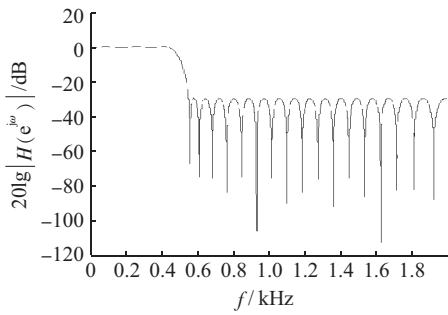


图 5 幅频特性

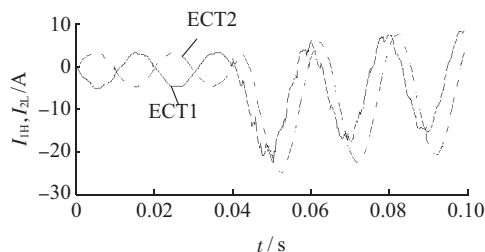
方法 1: $U=1$ 倍插值、直接线性卷积滤波和 $D=4$ 倍抽取三者级联的传统采样频率转换方法;

方法 2: $U=1$ 倍插值、零相位滤波算法和 $D=4$ 倍抽取三者级联的采样频率转换方法。

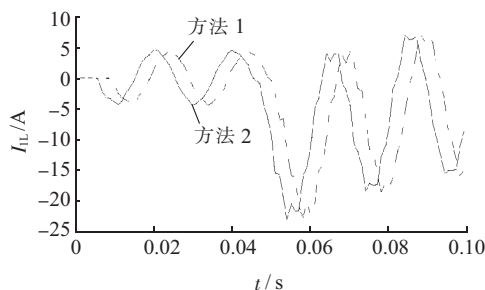
4.1 变压器内部故障

设 A 相绕组在 $t=0.04$ s 时发生区内三相短路故障, ECT1, ECT2 在采样前经低通滤波器进行抗混叠滤波, 同时将 ECT2 的采样数据向一次侧进行归算。图 6(a) 给出了 ECT1 和 ECT2 的 A 相采样电流数据 I_{1H} , I_{2L} 。图 6(b) 给出了 A 相高采样率的 ECT1 采样数据波形分别采用方法 1 和方法 2 进行采样率转换后的采样电流输出值 I_{1L} 。可见 2 种方法都会造成一定的数据响应延迟, 但方法 1 的转换方法输出滞后于方法 2 的输出, 延迟约为 4.65 ms。因此, 采用线性卷积的滤波输出滞后于零相位滤波, 制约了保护动作的快速性, 而零相位滤波算法在完成滤波时不带来附加的输出延迟。

为了更加清晰地了解零相位滤波算法的优越性, 选用采样值差动保护判据的变压器保护方案^[10], 即双折线采样值差动判据, 1 为跳闸断开动作, 0 为闭合导通。由于转换后采样频率为 1 kHz, 因此选取数据窗长 $R=8$, 判别点数 $S=6$, 即连续 8 次判别中有 6 次及以上



(a) ECT 采样数据



(b) 转换后电流采样数据

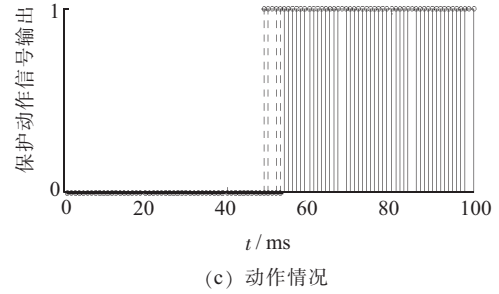


图 6 变压器内部故障时采样频率转换

输出动作信号 1, 否则输出 0, 其动作信号如图 6(c) 所示。方法 1 必须等到正确的滤波输出后方能进入差动保护算法, 其动作时间明显大于方法 2 的动作时间。滤波器阶数越高, 其动作延迟时间也越大。

4.2 高压端区外三相短路故障

在 $t=0.04$ s 时高压侧母线 N 区外 F_1 点发生三相短路故障。以 A 相为例进行分析, 图 7 为 ECT1 和 ECT2 的 A 相采样数据 I_{1H} , I_{2L} 。同样, 对采样频率为 4 kHz 的 ECT1 的采样数据转角后分别采用方法 1 和方法 2 转换后采样数据输出 I_{1L} 如图 8(a) 所示, 图 8(b) 为采样频率转换后计算的差电流 I_{dL} , $I_{dL}=I_{1L}-I_{2L}$, 其最大瞬值为 0.65 A, 通过合理的整定, 能够在区外故障时差动保护的正确判别。电子式互感器很好地克服了互感器的饱和问题, 因此互感器饱和对变压器差动保护的影响不在此讨论范畴。

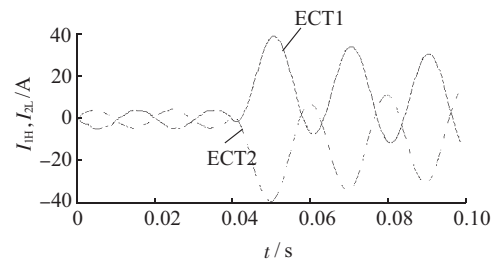
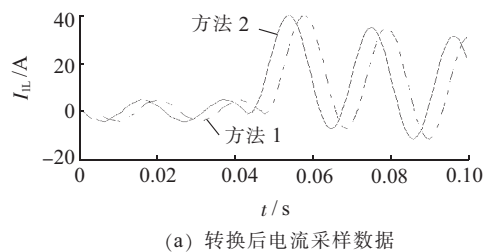
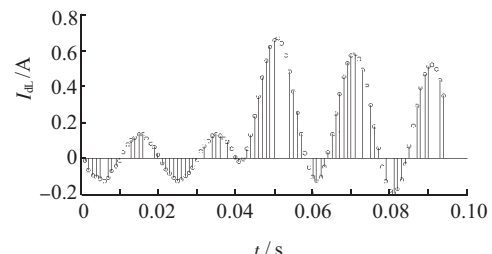


图 7 高压端区外三相故障两端电流采样数据



(a) 转换后电流采样数据



(b) 差电流

图 8 区外故障时采样频率转换及差电流

5 结束语

较传统的采样频率频率转换方法而言,零相位滤波算法有地解决了高阶 FIR 滤波器带来的群延迟较大的问题,极大地提高了保护动作的快速性,同时在区外故障时转换后的误差电流能够满足保护精度的要求,不会造成区外故障时的误动作,有效地实现了测量环节和智能保护装置之间频率的快速统一,理论分析和仿真实验证明了文中所提算法的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
- [2] 周斌,张何. 基于电子式互感器的变电站智能设备采样接口技术[J]. 江苏电机工程,2007,26(2):37-39.
- [3] 刘文,杨慧霞,祝斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):120-126.

- [4] 陆玉军,徐勇,薛军,等. 智能变电站中低压母线保护设计[J]. 江苏电机工程,2014,33(3):21-25.
- [5] 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.
- [6] 刘静,邵能灵,李坤. T型线路电流差动保护研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):58-63.
- [7] 宗孔德. 多采样率信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1996:105-110.
- [8] 徐光福,陆于平,吴崇昊,等. 多采样率信号处理在数字化变电站差动保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):44-48.
- [9] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003:74-82.
- [10] 丛伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30.

作者简介:

薛蓉(1987),女,江苏江都人,硕士,从事电力工程设计工作。

Research on the Impacts of Multi-Rate Conversion Algorithm on Differential Protection

XUE Rong

(Nanjing Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In the smart substation, data collected from any place is available for the entire substation' is required by data acquisition of merging unit. Therefore, the digital interface of merging units should possess the sampling rate conversion function and meet the demand of differential protection. This paper studies the mechanism of sampling rate conversion with cascade connection of decimation and interpolation. Also, the impacts of sampling rate conversion on differential current of differential protection is analyzed. To reduce group delay of high order Finite Impulse Response (FIR) in sampling rate conversion, a zero phase filtering algorithm is designed. Combining this algorithm with decimation and interpolation algorithm, the data from ECTs with different sampling rates can be converted to the same one. This achieves a unified sampling rate and improves the action speed of differential protection.

Key words: sampling rate conversion; differential current; group delay; zero phase filtering

(上接第 61 页)

陈福锋(1979),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作;

姚亮(1979),男,江苏南京人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作。

An Accurate Method for Recovery Voltage Calculation on Extra High Voltage Transmission Lines

XUE Mingjun, CHEN Fufeng, Yao Liang

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: Single phase adaptive reclosing technology improves the reliability and the stability of the power system. A successful reclosing is depended on quick and automatic extinction of the secondary arc. The factors affecting the secondary arc are recovery voltage and secondary arc current. The paper proposes a method to calculate the accurate recovery voltage of transmission line without series capacitor by using system and line parameters. Then the main factors affecting recovery voltage are detailed discussed. It shows that recovery voltage is related to transmission line voltage rate, transmitted power, conductor spatial arrangement and line parameters. Simulation results from Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) validates the proposed method.

Key words: extra high voltage; transmission line; recovery voltage; secondary arc current; transient fault