一种提高智能变电站 PMU 相量测量精度的改进采样值调整算法

蔡　超,陆于平
(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:提出了一种适用于智能变电站应用环境下提高同步相量测量单元(PMU)测量精度的采样值调整算法。算法基于三次样条插值和时标变换,实现了过程总线采样数据与 PMU 算法的无缝连接。该算法减小了过程层定采样频率下系统频率偏移带来的离散傅里叶变换(DFT)算法频谱泄漏误差,同时可有效减小过程总线采样值传输丢包对相量算法精度的影响。在智能变电站应用环境下利用 MATLAB 对所提算法进行仿真,结果验证了其不受频率偏移和采样值丢包的影响,能保证 PMU 相量测量的高精度。

关键词:智能变电站;相量测量单元;采样值调整;三次样条插值;时标变换;频谱分析;采样频率;测量

中图分类号:TM 73　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.025

0　引言

基于 GPS 的同步相量测量单元(PMU)自 20 世纪 90 年代问世以来,推进了广域测量系统(WAMS)的快速发展[1-2],在电力系统中的应用也越来越广泛,目前已有大量 PMU 应用于大型电力网络的动态状态估计、故障定位、广域保护、在线参数估计等研究中[1-5],智能变电站 PMU 的测量精度将直接影响上述应用的性能。传统 PMU 内建 A/D 采样模块,对来自电磁式互感器的模拟信号根据 GPS 授时进行分频采样。目前智能变电站刚刚兴起,PMU 属于间隔层设备,可以以独立的智能电子设备(IED)形式或集成在保护 IED 中实现,其数据的采样环节下放到过程层,过程层采样值传输可以网络方式或点对点方式接入。国内前期建设的智能变电站应用点对点的过程层采样值传输方式较多,但过程层统一组网是智能变电站未来的发展趋势,也符合 IEC61850 系列标准推广应用的初衷。智能变电站环境下 PMU 的数据采集和传输环节都发生了变化,有必要研究在新的应用环境下保证 PMU 的测量精度的方法。

相量特征量的计算算法有很多,如全波傅氏算法[6]、最小二乘法[7]、卡尔曼滤波算法[8]、小波变换法[9]等。全波傅氏算法基于非正弦交流信号模型,实现非常简单,具有良好的滤波性能,能够完全滤除恒定直流分量和整数次谐波分量,是目前应用于 PMU 最普遍的算法。智能变电站过程层的采样时钟按全站统一同步时钟基准来定义,当系统运行频率偏离 50 Hz 时,PMU 装置接收到的采样数据不满足整周期采样条件,且无法通过频率跟踪来调整过程层采样时钟,相量测量结果会产生频谱泄漏误差。

根据 UCA 颁布的 IEC61850-9-2LE[10]定义,智能变电站过程层对保护数据的采样频率为每周期采样 80 点,对测量数据的采样频率为每周期采样 256 点,PMU 装置无法根据自身所采用的相量测量算法来定义过程层采样频率,其面临采样数据的采样频率可能与自身成熟算法不匹配的问题。而当过程总线通过全站统一组网方式进行采样值传输时[11],受网络带宽、网络突发性数据、传输路径等影响,存在采样值传输的延时不确定性和丢包问题,影响相量测量算法的正常运行以及测量的精度。

针对相量测量的频谱泄漏误差问题,通常有 2 种解决思路:根据系统频率自适应调整采样频率以满足整周期采样的条件[12],但如前文所述,在智能变电站应用环境下间隔层 IED 无法控制过程层的采样,该思路无法实现;通过对相量测量算法进行改进从而对频谱泄漏进行补偿。文献[6]提出了一种基于递推算法的相量测量方法,减小了频谱泄漏误差;文献[13]对传统的傅氏算法进行改进,使得静态的相量误差在频率偏差 ±10% 时小于 1%。除了以上 2 种主要的思路外,学者还提出了一些其他的方法:文献[14]提出了一种基于采样值调整的频率矫正算法,对有频率偏移的采样值重新进行计算,使调整后的采样值对应的频率为基频;文献[15]针对智能变电站报文的传输丢失和延迟问题,采用拉格朗日插值算法,提出了一种自适应丢包的报文估计算法。

但以上方法只关注频率偏移的频谱泄漏或采样值传输延迟、丢包等单一问题。本文综合考虑了上述问题后,基于文献[14]提出一种改进的采样值调整算法,该算法通过三次样条插值和时标变换,使得调

收稿日期:2013-04-03;**修回日期**:2014-01-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977012,51377022)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977012,51377022)

整后的采样值适用于现有离散傅里叶变换(DFT)成熟算法,无需动态调整采样时钟与PMU算法时钟,实现过程层数据与PMU算法的无缝连接,提高了PMU测量精度。

1 基于三次样条插值和时标变换的改进采样值调整算法

1.1 算法基本思想

以2个幅值相同、频率不同的基波信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为例,$x(t)$ 的频率为 $f_0=50$ Hz,与电力系统基波额定频率相等,$y(t)$ 的频率为 f。假设当前时刻为 t_0,且 t_0 时刻2个信号的瞬时相位同为 φ_0,则采样信号 $x(i)$ 与 $y(j)$ 可分别表示为:

$$\begin{aligned} x(i)&=\sin\{2\pi f_0[t_x(i)-t_0]+\varphi_0\}\\ y(j)&=\sin\{2\pi f[t_y(j)-t_0]+\varphi_0\}\end{aligned} \tag{1}$$

其中,i、j 为采样序号;$i=\cdots,-2,-1,0$;$j=\cdots,-2,-1,0$;t_x、t_y 分别为采样信号 $x(i)$、$y(j)$ 的采样时刻。由于在 t_0 时刻 $x(i)$ 与 $y(j)$ 包含相同的幅值和瞬时相位信息,且 $x(i)$ 满足整周期采样,不会出现频谱泄漏误差,因此PMU可利用采样值调整得到的 $x(i)$ 来计算原始采样信号 $y(j)$ 的幅值和瞬时相位。算法步骤如下。

a. 利用 $y(j)$ 通过三次样条插值得到 $z(i)$,插值时标 $t_z(i)$ 满足以下关系:

$$\begin{aligned} t_z(0)&=t_x(0)=t_0\\ t_z(i)&=t_0-[t_0-t_x(i)]/\delta\\ \delta&=f/f_0\end{aligned} \tag{2}$$

则 $z(i)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} z(i)&=\sin\{2\pi f[t_z(i)-t_0]+\varphi_0\}=\\ &\sin\{2\pi f\{t_0-[t_0-t_x(i)]/\delta-t_0\}+\varphi_0\}=\\ &\sin\{2\pi f\{t_x(i)-t_0\}/\delta+\varphi_0\}=\\ &\sin\{2\pi f_0[t_x(i)-t_0]+\varphi_0\}=x(i)\end{aligned} \tag{3}$$

$z(i)$ 是实际信号中 $y(t)$ 上的某些采样点,其与 $x(i)$ 相同采样序号对应的点的瞬时值相等,但时标不同。

b. 时标变换。令 $t_z(i)=t_x(i)$,从而完成了 $y(t)$ 上 $t_z(i)$ 时刻所对应的采样值与PMU算法的采样值的对应,得到 $x(i)$ 采样点。3组采样序列 $x(i)$、$y(j)$、$z(i)$ 的对应关系如图1所示。

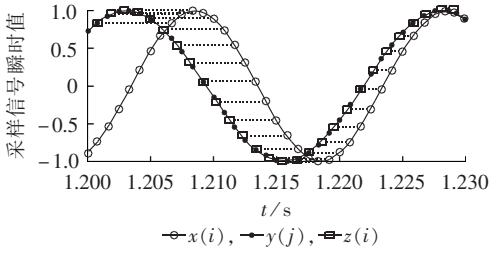


图1 3组采样序列对应关系

Fig.1 Corresponding relationship among $x(i)$, $y(j)$ and $z(i)$

1.2 三次样条插值算法的实现

在本文的智能变电站PMU应用的研究背景下,过程层采样信号和满足PMU算法要求的信号分别对应 $y(j)$ 和 $x(i)$。

三次样条插值边界条件由两端点处的二阶导数确定:

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}^2y(0)}{\mathrm{d}t^2}&\approx\frac{y(0)-2y(-1)+y(-2)}{\Delta t^2}\\ \frac{\mathrm{d}^2y(-n)}{\mathrm{d}t^2}&\approx\frac{y(-n)-2y(-n+1)+y(-n+2)}{\Delta t^2}\end{aligned} \tag{4}$$

其中,Δt 为过程总线采样时间间隔;n 为采样值调整得到一个PMU算法数据窗内数据所需采样点个数。若PMU算法数据窗为 N,则有:

$$n=N\frac{f_s}{\delta f_{\mathrm{pmu}}} \tag{5}$$

其中,f_s 为过程层采样频率;f_{pmu} 为PMU算法的采样频率。

设过程层各采样点处的二阶导数值为 M_j,采用待定系数法得各区间 $[j,j+1]$ 上的三次样条函数为:

$$\begin{aligned} z(k)=y(j)+&\left\{y[j,j+1]-\left(\frac{1}{3}M_j+\frac{1}{6}M_{j+1}\right)h_j\right\}(k-j)+\\ &\frac{1}{2}M_j(k-j)^2+\frac{1}{6}(M_{j+1}-M_j)(k-j)^3\end{aligned} \tag{6}$$

其中,$y[j,j+1]=\dfrac{y(j+1)-y(j)}{j+1-j}$;$k\in[j,j+1]$。

式(6)中 M_j 为待定系数,利用边界条件以及在插值点处存在二阶连续导数,通过解方程组式(7)得到。

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_1 & & & & \\ \mu_2 & 2 & \lambda_2 & & & \\ & \mu_3 & 2 & \lambda_3 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \mu_{j-2} & 2 & \lambda_{j-2}\\ & & & & \mu_{j-1} & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_1\\ M_2\\ M_3\\ \vdots\\ M_{j-2}\\ M_{j-1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} d_1-\mu_1M_0\\ d_2\\ d_3\\ \vdots\\ d_{j-2}\\ d_{j-1}-\lambda_{j-1}M_j\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mu_j=\frac{h_{j-1}}{h_{j-1}+h_j},\ \lambda_j=\frac{h_j}{h_{j-1}+h_j}=1-\mu_j$$

$$d_j=6y[j-1,j,j+1]=6\frac{y[j,j+1]-y[j-1,j]}{j+1-(j-1)}$$

$$M_0=\frac{\mathrm{d}^2y(0)}{\mathrm{d}t^2},\ M_j=\frac{\mathrm{d}^2y(-j)}{\mathrm{d}t^2}$$

通过以上分析,本文算法通过确定式(2)插值时刻 $t_z(i)$ 所对应的 k 值,然后将其代入式(6)即可得到调整后的采样值。算法实现的关键是 k 值的确定,以下分2种情况讨论。

a. $f_s=f_{\mathrm{pmu}}$。

当过程层采样频率与PMU算法一致时,PMU算法所需采样值采样序号与过程层采样值采样序号相同,即 $i=j$。插值时将当前时刻 t_0 对应的插值序号定为 $k=0$,根据式(2),当前采样时刻之前的第 i 个采样点对应的插值序号为 $k=i/\delta$。

b. $f_s \neq f_{pmu}$。

当过程层采样频率与 PMU 算法不一致时,PMU 算法当前时刻时钟 t_0 与过程层最新的采样点时钟在大部分情况下并不对应。此时最新接收到的采样数据时刻 $t_0'<t_0$,即式(2)中 $t_z(0) \neq t_x(0)=t_0$,见图 2。

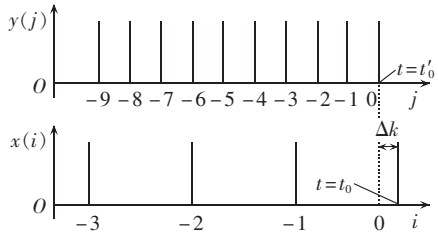


图 2 采样不匹配时的最新采样点时间差

Fig.2 Time offset of last sampling point when sampling rate is unmatched

此时第 i 个采样点对应的插值序号 k 为:

$$k=\Delta k+i\frac{f_s}{\delta f_{pmu}}$$

$$\Delta k=50(t_0-t_0')f_s$$

1.3　采样值传输丢包的处理方法

当过程总线采样值传输出现丢包时,本文对式(4)计算边界时所用的采样点及采样间隔采用查找算法做出相应调整。具体查找方法如下。

以首端点为例,先确定计算边界二阶导数的 2 个端点最新采样点序号 l,向前查找正常到达的次新采样值,并获取其序号 $l-m$,继续查找序号为 $l-2m$ 的采样点是否存在,若存在,则采用第 l、$l-m$、$l-2m$ 个点计算边界条件,同时式(4)中的 Δt 应调整为 $m\Delta t$。若第 $l-2m$ 个采样点不存在,则相应地寻找第 $l-(m+1)$ 和 $l-2(m+1)$ 个采样点是否存在。末端点的查找算法与首端点查找算法相同,限于篇幅不再详细说明。图 3 显示了此查找算法的具体示例。图中,$y(-1)$和 $y(-4)$丢失,通过查找法可确定 $l=0$、$m=3$,可知计算边界二阶导数所需的采样点信号为 $y(0)$、$y(-3)$、$y(-6)$,同时式(4)中的 Δt 也相应调整为 $3\Delta t$。

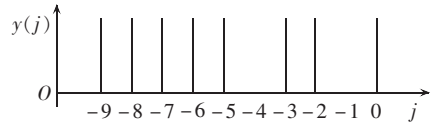


图 3 采样值传输丢包处理实例

Fig.3 An example of transmission packet loss processing

综上所述,本文提出的改进的采样值调整算法的流程如图 4 所示。

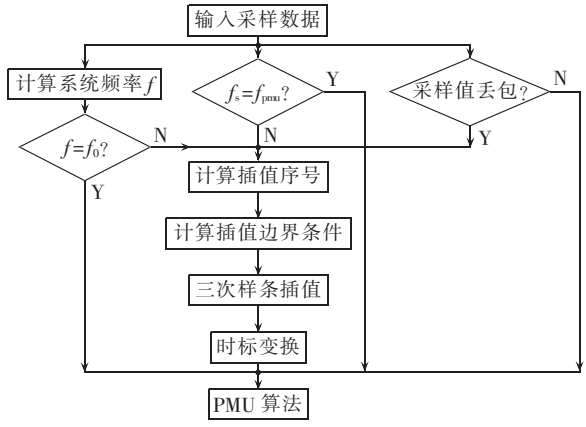


图 4 采样值调整算法流程图

Fig.4 Flowchart of proposed algorithm

2　算法性能仿真及分析

本节利用 MATLAB 仿真验证本文提出的改进采样值调整算法的性能,并将本文算法与文献[14]算法性能进行比较。在智能变电站应用环境下仿真本文算法在不同误差源及综合误差源时 PMU 相量测量的性能。

2.1　本文改进的采样值调整算法与现有采样值调整算法性能仿真比较

如前文所述,本文改进的采样值调整算法与文献[14]有相似之处,但是调整方法不同。文献[14]是基于泰勒展开近似,根据有频率偏移的原始采样数据中的 3 个相邻点来推算出相应的一个理想采样值,但是这种方法随着时间的推移以及谐波次数的增大,其误差会越来越大甚至出现振荡。而本文所提出的方法是基于三次样条插值和时标变换,能够克服文献[14]的缺点。

假设原始信号的表达式为:

$$y(t)=\sin(2\pi ft)+0.3\sin(4\pi ft)+0.1\sin(4\pi ft)+0.1(10\pi ft) \quad (8)$$

为了说明本文方法的优越性,对式(8)信号分别用文献[14]中的方法和本文所提方法对采样值进行调整,分别将原始信号在频率为 f=45 Hz 和 f=55 Hz 情况下变换到 50 Hz 下的采样值,得到 2 种方法下该采样值与理想基频下的采样相对误差如图 5 所示。

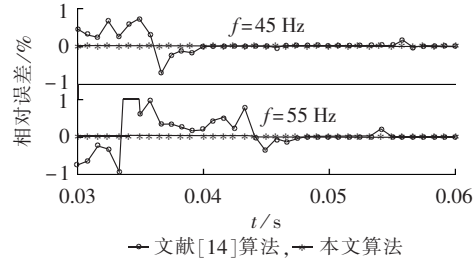


图 5 文献[14]与本文算法误差比较

Fig.5 Comparison of errors between proposed algorithm and algorithm in reference[14]

从图 5 中可看出,从当前时刻 0.06 s 往前推移,文献[14]所提方法的采样值调整误差逐渐增大并呈现振荡,在最近的一个周期 0.04 ~ 0.06 s 的后半部

分,已经出现了较大的误差,而这一个周期的数据是用来计算当前时刻的相量信息的,这种误差的存在无疑会对结果造成一定的影响,而本文所提出的方法误差都很小,且没有振荡的现象,其精度优势明显。当原始信号不含有谐波成分时,文献[14]所提方法的计算结果与图5相似。

2.2 单误差源存在时本文算法性能

考虑智能变电站应用环境下系统频率偏移、采样频率与算法不一致以及采样值传输丢包等情况都可能引起相量的测量误差,首先考虑单种误差源存在情况下本文算法性能,原始采样数据经过采样值调整后进行相量测量,并与传统的DFT算法测量结果进行对比分析。IEEE C37.118.1标准对稳态情况下PMU测量综合矢量误差(TVE)的定义如式(9)所示,参数定义详见文献[1]。下文将对比分析不同情况下得到的TVE。

$$\mathrm{TVE}=\sqrt{\frac{[\hat{X}_r(q)-X_r(q)]^2+[\hat{X}_i(q)-X_i(q)]^2}{X_r^2(q)+X_i^2(q)}} \tag{9}$$

2.2.1 频率偏移时PMU相量测量仿真

2.1节中的仿真给出了文献[14]和本文算法在采样值调整处理上的误差特性,本节针对2.1节的仿真环境,在系统频率发生偏移时采用本文算法和文献[14]算法对采样值进行调整,得到最近一个周期0.04~0.06 s的采样值调整后,进行相量计算,结果如表1所示,表中e_A、e_P分别为相量的幅值和相位误差。

表1 本文算法与文献[14]算法的误差比较

Tab.1 Comparison of errors between proposed algorithm and algorithm in reference[14]

f/Hz	e_A/%		e_P/%		TVE/%	
	文献[14]	本文	文献[14]	本文	文献[14]	本文
45	0.11	0	0.1860	0.063	0.1157	0.0055
55	0.49	0	0.1831	0.027	0.5811	0.0112

同样考虑式(8)信号f=45 Hz的情况,对比经本文算法进行采样值调整后的DTF算法与传统DTF算法的性能,并将其结果与实际数据进行比较,仿真结果如图6所示。

系统运行频率高于50 Hz时及采样信号只含基波成分的情况下仿真结果与图6类似,限于篇幅未给出。

表1、图6表明,系统发生频率偏移时,经本文算法与文献[14]的算法对采样值进行调整后得到的相量误差都很小,满足IEEE C37.118对误差的要求,但本文算法能保证更高的相量测量精度。如果不对频率进行校正,由于频谱泄漏,DFT算法得到的相量幅值会出现振荡,而得到的相角会偏离实际值,且频率偏移到45 Hz时,TVE能达到30%左右。经本文算法进行采样值调整后,无论信号是纯正弦信号还是含有谐波,测量得到的相量值基本和实际值重合,TVE也在1%以下。

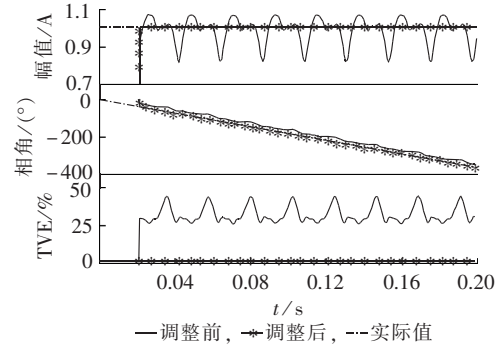


图6 采样值调整前后DFT结果对比(f=45 Hz)

Fig.6 Comparison between DFT results with and without sampled value adjustment(f=45 Hz)

2.2.2 采样频率转换时PMU相量测量仿真

考虑智能变电站过程层采样频率为4 000 Hz,而PMU相量测量算法为每周期采样24点。本节仿真只考虑采样值调整算法解决采样频率转换问题时的性能,假设电力系统的频率为50 Hz。仿真信号采用式(8)信号,仿真结果如图7所示。

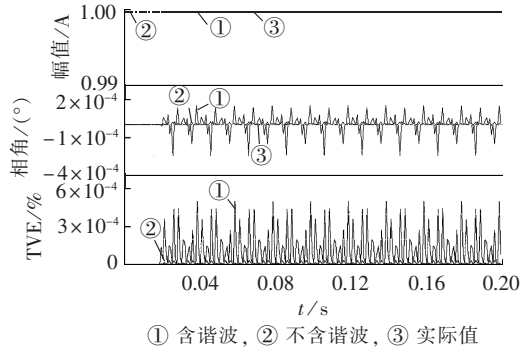


图7 采样频率转换后相量测量结果

Fig.7 Phasor measurements after sampling rate conversion

从结果可看出,当过程层采样频率与PMU算法不一致时,经采样值调整可实现采样频率向PMU算法的转换,利用调整后的采样值进行相量测量的TVE非常小,无论信号为纯正弦信号还是含有谐波,算法都能保证相量测量的高精度。

2.2.3 过程总线采样值传输丢包时PMU相量测量仿真

由于传统PMU算法并没有针对采样值传输丢包进行信号处理,因此当采样值传输数据丢失时,傅氏算法将对丢失的数据进行置零处理。考虑过程总线采样值的采样频率为每周期采样24个点,仿真1个周期(0.02~0.04 s)内在采样值传输过程中丢包个数为1~4的情况,丢包的位置和连续丢包的个数不确定,在仿真中都是随机产生。仿真结果如图8所示。

传统的PMU算法在智能变电站应用环境下遇

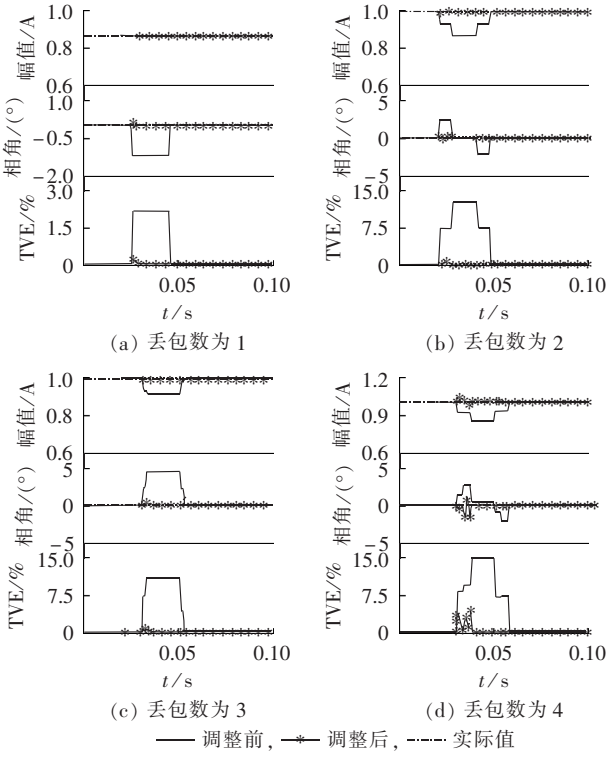


图 8 采样值传输丢包时本文算法和传统 DFT 算法的相量测量结果对比

Fig.8 Comparison of phasor measurements with transmission packet loss between proposed algorithm and traditional DFT algorithm

到采样值传输丢包问题时会产生很大的误差,原因在于丢包后传统算法无法对所丢失的数据进行补偿,而在采样值调整算法下此问题得到了很好的解决。当过程总线采样频率为 1200 Hz 时,采样值传输每周期丢包数在 3 个以内,即丢包率在 12.5% 时本文算法的误差很小,TVE 能控制在 1% 以内,而丢包率增大时,本文算法的误差虽增大,但仍明显低于传统的 DFT 算法带来的误差。

2.3　智能变电站综合误差源采样值调整算法仿真

本节将综合考虑系统频率偏移、采样频率与 PMU 算法不匹配、采样值传输丢包以及信号含有谐波情况下采样值调整算法的性能。

假设式(8)信号的频率为 f=45 Hz,采样频率为 4000 Hz,而 PMU 算法为每周期采样 24 点,在 0.08~0.10 s 内过程总线采样值传输的丢包率为 10%,仿真时对比传统 PMU 算法的性能。传统算法采用 80 点 DFT 算法,对频率偏移、采样值传输丢包问题未做处理,仿真结果如图 9 所示。

通过仿真结果可见,在智能变电站环境下 PMU 接收到的过程总线数据存在复杂的误差源时,本文提出的采样值调整算法能有效去除误差因素的影响,保证 PMU 装置相量测量的高精度,而传统的 DFT 算法受频率偏移及采样值传输丢包影响较大。

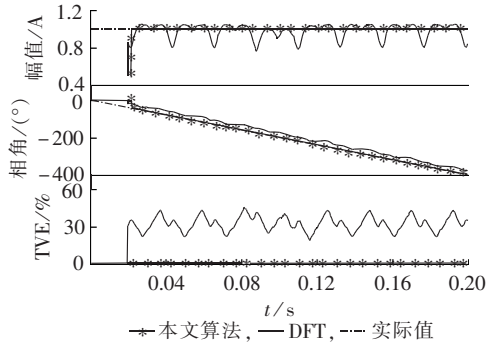


图 9 频率偏移且采样值丢包情况下所提算法和传统 DFT 算法的相量测量结果对比

Fig.9 Comparison of phasor measurements with transmission packet loss and frequency deviation between proposed algorithm and traditional DFT algorithm

3　结论

随着智能电网的提出和发展,PMU 的相量测量精度直接影响到保护、稳定、控制等其他电力系统应用的可靠性。针对智能变电站应用环境下 PMU 相量测量遇到的新问题,本文提出了一种改进的过程层互感器采样数据调整算法,使传统的 DFT 相量测量算法无需改动就可应用于智能变电站环境,从而实现过程层数据与间隔层 PMU 装置相量测量算法无缝连接。本文算法基于三次样条插值和时标变换,其原理简单,实现方便,精度高,可解决定采样频率下系统频率偏移时不满足整周期采样而引起的 DFT 算法频谱泄漏问题,当采样频率与 DFT 算法不匹配时能够实现采样频率的转换,当采样值通过过程总线传输出现丢包时,可实现丢失采样数据的恢复。仿真结果验证了在上述情况下本文提出的采样值调整算法可有效地减小相量测量误差,保证了算法的高精度。

本文算法在实现时需要用到三次样条插值,与已有文献(如文献[15]及文献[3])提出的方法相比,计算量较大。但在智能变电站应用环境下,数据采集环节在过程层实现,非常规互感器、合并单元等在实现时通常也存在一定的数据处理环节,不同厂家处理算法的不同,都可能给 PMU 相量测量引入误差,而本文提出采用三次样条插值算法可尽量减小本处理环节可能引入的误差,对于保证 PMU 相量测量的精度有实际意义。将本文算法的思想应用于基于递推的 PMU 相量测量算法,使之适用于智能变电站的应用环境,降低智能变电站同步相量测量的整体计算量,是下一步将要进行的工作。

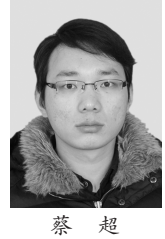
参考文献:

[1] IEEE. IEEE StdC37.118.1-2011 IEEE standard for synchrophasors for power systems[S]. [S.l.]:IEEE,2011.

[2] PHADKE A G,THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York,USA:Springer Science,

2008:135-170.
[3] 王增平,张晋芳,钱诚. 基于同步测量信息的电网拓扑错误辨识方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):1-8.
WANG Zengping,ZHANG Jinfang,QIAN Cheng. Topology error identification based on synchronized measurements for power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):1-8.
[4] 孟凡超,董晓亮,高志强,等. 一种基于WAMS/PMU的PSS在线评估方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):146-149.
MENG Fanchao,DONG Xiaoliang,GAO Zhiqiang,et al. Online PSS evaluation based on WAMS/PMU technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):146-149.
[5] 刘道伟,谢小荣,穆钢,等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):13-17.
LIU Daowei,XIE Xiaorong,MU Gang,et al. An online voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1):13-17.
[6] 耿池勇,高厚磊,刘炳旭,等. 适用于同步相量测量的DFT算法研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):84-87.
GENG Chiyong,GAO Houlei,LIU Bingxu,et al. Study of DFT algorithm in synchronized phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):84-87.
[7] JAFARIAN P,SANAYE-PASAND M. Weighted least error squares based variable window phasor estimator for distance relaying application[J]. IEE Proceeding-Generation,Transmission & Distribution,2011,5(3):298-306.
[8] GHAHREMANI E,KAMWA I. Dynamic state estimation in power system by applying the extended Kalman filter with unknown inputs to phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(4):2556-2566.
[9] 张姝,何正友,何文. 基于递归小波的相量测量算法[J]. 电网技术,2011,35(4):194-200.
ZHANG Shu,HE Zhengyou,HE Wen. A recursive wavelet-based algorithm for phasor measurement[J]. Power System Technology,2011,35(4):194-200.
[10] IEC. IEC61850-9-2 LE:implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC61850 9-2[S]. [S.l.]: UCA International Users Group,2004.
[11] 童晓阳,廖晨松,周立龙,等. 基于IEC61850-9-2的变电站通信网络仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):68-74.
TONG Xiaoyang,LIAO Chensong,ZHOU Lilong,et al. The simulation of substation communication network based on IEC61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):68-74.
[12] 陈明凯,郑翔骥,汪晓强,等. 减少频谱泄漏的一种新的等角度间隔采样递推算法[J]. 电工技术学报,2005,20(8):94-98.
CHEN Mingkai,ZHENG Xiangji,WANG Xiaoqiang,et al. A novel algorithm for reducing spectrum leakage based on equal angle-interval sampling principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(8):94-98.
[13] PREMERLANI W,KASZTENNY B,ADAMIAK M. Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(1):109-123.
[14] AKKE M,THORP J S. Sample value adjustment improves phasor estimation at off-nominal frequencies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2255-2263.
[15] 张志丹,黄小庆,何杰,等. 基于自适应丢包的采样值报文估计算法及其误差分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):85-91.
ZHANG Zhidan,HUANG Xiaoqing,HE Jie,et al. Self-adaption packet-loss-based sampled value estimation algorithm and its error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(4):85-91.
[16] 孙志忠,袁慰平,闻震初. 数值分析[M]. 南京:东南大学出版社,2002:153-161.

作者简介:


蔡 超

蔡 超(1985-),男,山东泰安人,博士研究生,研究方向为智能变电站应用、电力系统数字保护(**E-mail**:caichao@outlook.com);

陆于平(1962-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统数字保护、智能电网分布式发电保护与控制等。

Improved sampled value adjustment algorithm increasing measurement precision of smart substation PMU

CAI Chao,LU Yuping

(School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: An improved adjustment algorithm of sampled value is proposed to increase the measurement precision of smart substation PMU,which applies the cubic spline interpolation and time scale transformation to realize the seamless join of the values sampled by process bus with the PMU algorithms. The spectrum leakage error of DFT algorithm due to system frequency deviation with fixed frequency sampling at process level is thus reduced and the influence of transmission data loss on the precision of PMU algorithm is also weakened. The proposed algorithm is simulated with MATLAB in smart substation environment and the results demonstrate that it is immune to the frequency deviation and transmission data loss and can guarantee precision of PMU measurement.

Key words: smart substation; PMU; sampled value adjustment; cubic spline interpolation; time scale transformation; spectrum analysis; sampling frequency; measurements