

电力系统故障录波数据实用压缩方法

黄 纯¹, 杨帅雄^{1,2}, 梁勇超², 刘 琨², 文 超^{1,2}, 郭振华¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南省电力公司检修公司, 湖南 长沙 410002)

摘要: 针对电力系统大量故障录波数据的传输问题, 以故障录波数据在整体录波文件占据较小比例为依据, 提出一种立足于录波数据整体的分通道分时段数据压缩新方案。对于周期信号的压缩, 快速傅里叶变换 (FFT) 算法具有压缩比高的特点, 因此先对分段数据进行 FFT 计算, 若误差较大则改用小波变换压缩。在电力系统频率偏移额定值的情况下, 采用加窗傅里叶变换校正算法, 保证压缩率和压缩精度。仿真研究和实际录波文件的压缩应用表明, 算法能获得较高的压缩性能和较小的误差, 验证了该方案的可行性和有效性。

关键词: 电力系统; 故障录波; 数据压缩; 快速傅里叶变换; 加窗离散傅里叶变换算法; 小波变换

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.028

0 引言

电力网络发生故障时, 故障录波装置会动态记录系统电流、电压及其导出量等, 以检测继电保护与安全自动装置的动作行为, 分析系统暂(动)态过程中各电气量的变化规律, 校核电力系统计算程序及模型参数的正确性。

由于故障暂态信号是一种非平稳信号, 覆盖的频谱较宽, 因此要求录波装置的采样率较高, 通常为 kHz 级, 从而得到了海量的故障录波数据, 使得故障信号的存储和实时传输面临困难^[1]。录波数据压缩技术可以解决这一问题。

小波变换是目前数据压缩的最常用方法。文献 [2-5] 分别利用多小波、双正交小波、小波包及自适应小波变换压缩故障录波文件; 文献 [6] 提出了小波最优分解层数的确定公式; 文献 [7] 讨论和比较了小波变换的不同预处理方法对数据压缩的影响。此外, LZW 编码、图像处理等技术也被应用于电力记录数据的压缩^[8-9]。

本文立足于整体录波文件, 根据故障录波数据的特点, 提出了分通道分时段压缩方案, 即针对某一通道某一时段的录波数据, 以快速傅里叶变换 (FFT) 重构误差为依据, 判定使用 FFT 压缩或者小波压缩。通过 MATLAB 仿真和华中电网实际故障录波数据, 验证了本方案的可行性及优越性。

1 故障录波数据特点

根据 IEEE 的 COMTRADE 标准, 一个完整的录波文件通常由 3 个文件构成, 即头文件、配置文件

和数据文件。其中数据文件包含实际录波数据, 该文件按采样时间点顺序进行记录。采样时间点取决于记录时间的长短, 每一采样时间点采集的数据个数取决于录波装置。每个数据采样记录格式如图 1 所示, 其中 n 为采样编号 (4 字节); timestamp 为采样时标 (4 字节); A_1, \dots, A_k 为模拟通道采样数据, 每个通道数据大小为 2 字节; D_1, \dots, D_m 为状态通道采样数据, 以每 16 通道 2 字节 (16 位) 为单位, 即 16 个状态通道为一组连续显示。

$n, \text{timestamp}, A_1, \dots, A_k, D_1, \dots, D_m$

图 1 数据采样记录格式

Fig.1 Format of data sampling record

按照我国 DL/T553—94《220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则》^[10] 要求, 模拟量信号需按故障发展的顺序分 A、B、C、D、E 5 个时段进行采样, 其中, A 时段为系统大扰动开始 ($t=0$) 之前的状态数据, 输出原始记录波形及分析值; B 时段为系统在大扰动初期的状态数据; C 时段为系统在大扰动中期的状态数据; D 时段为系统动态过程数据; E 时段为系统长过程的动态数据, 直到故障或振荡结束。

故障录波是从系统某处故障前一段特定时间开始的, 而其他线路是正常运行的, 因此大多数模拟通道数据不受故障影响或影响较小, 在整个记录时段内, 近似呈稳态周期性变化, 信号以基波分量为主, 可能还包含高次谐波; 大多数开关量 (状态通道数据) 在录波过程中不会发生变化, 因而包含大量的冗余信息。

2 数据压缩方案

根据录波数据的上述特点, 对于模拟通道数据, 用 FFT 算法和小波变换分别对正常数据和故障数据进行压缩; 对于状态通道数据, 若其在录波时段发生变化, 则记录其变化起始点和结束点的时标以

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2014-05-16
基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2012-AA050215); 湖南省电力科技重点项目 (KZ09K15003)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012-AA050215) and Hunan Province Electric Power Technology Project (KZ09K15003)

及各变化段的状态值,否则只需记录原始状态值。

2.1 FFT 压缩方法

对模拟通道数据进行 FFT 计算,在某个给定的错误容限下,把小于相应阈值的 FFT 系数置零,减少需要传输的系数,从而实现压缩。对于离散的周期信号,FFT 压缩效果非常好。

2.2 小波变换压缩方法

小波变换压缩的基本目标是使信号在时间-频率域的分解系数所占的存储空间尽可能小,同时还要保证压缩后的系数能精确地反映原始信号所携带的信息。在实现的过程中,信号可以用近似系数加部分的细节系数来表示,以达到用更少的空间来存储小波系数并尽量保证重建质量的目的。压缩过程可以分为如下 3 个步骤:

- 对原信号进行小波分解,得到分解系数;
- 对小波域中的系数进行处理,去除信号中的冗余(可以指定压缩的一些参数来获得需要的压缩比、误差等性能指标);
- 利用处理后的系数,重建压缩后的信号。

2.3 录波数据压缩方案

以输电线路故障录波为例,其录波数据的压缩流程示意图如图 2 所示。录波通道数据为某一线路的电气量,包含 5 段不同采样率的采样数据,从 A 段开始逐一进行 FFT 压缩,以重构信号与原信号的误差作为压缩成功与否的判断准则;若重构误差大于阈值,则进行小波变换压缩,然后读取下一段的数据;否则直接进入下一段数据的读取。如果本通道数据已经压缩完毕,则重新开始下一通道数据的压缩流程。

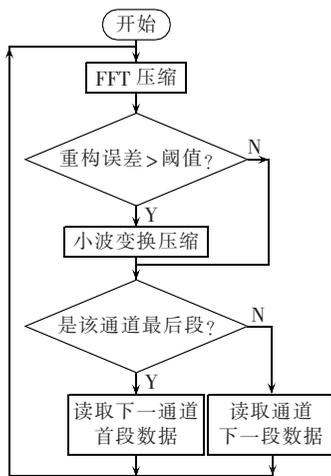


图 2 数据压缩流程图

Fig.2 Flowchart of data compression

对于正常通道数据采用 FFT 压缩。对于故障通道数据,由于 A 时段处在故障发生前,此时系统是正常运行的,采用 FFT 压缩;而 B、C、D、E 时段包含了故障暂态信息,具有显著局部特性,FFT 已不适

用,考虑采用具有时域局部化特性的小波变换压缩。

3 压缩方案实现中的关键技术

3.1 DFT 频率校正及压缩方法

录波数据采样频率一般是工频的整数倍,当电网处于额定工频时,对于稳态周期信号,FFT 算法具有良好的性能,压缩比高,误差小;但当电网基频偏离额定频率时,频谱泄漏效应会导致 FFT 压缩算法压缩比大幅降低,同时压缩误差明显增大。现采用 DFT 校正技术来解决这一问题,可在有较大频率偏移时保证稳态信号压缩的高精度、高压缩率。

3.1.1 DFT 校正方法^[11]

以采样周期 T_s 对模拟量信号 $u(t)$ 等间隔采样,得离散序列 $\{u(n)\}$,再用长度为 N 的窗序列 $\{w(n)\}$ 对 $\{u(n)\}$ 加权截断,得到序列 $u_w(n) = u(n)w(n) (n = 0, 1, 2, \dots, N-1)$ 。设信号 $u(t)$ 为一个单频率为 f_1 的不含谐波的信号,且离散窗序列 $w(n)$ 的频谱 $W(f)$ 具有线性相位,则在 $f=f_1$ 附近近似有:

$$U_w(f) = \frac{U_m}{2} W_0(f-f_1) e^{-j[\pi NT_s(f-f_1)-\theta]} \quad (1)$$

其中, $W_0(f)$ 为一实函数。 $U_w(f)$ 的相位谱为:

$$\Phi(f) = \theta - \pi NT_s(f-f_1) \quad (2)$$

以 $f_0 = 1/(NT_s)$ 为采样频率对 $U_w(f)$ 进行抽样,可得序列 $\{u_w(n)\}$ 的 DFT $U_w(k)$ 及其相位 $\Phi(k)$, 设 $f_1 = (k_0 + \alpha)f_0 (-0.5 \leq \alpha \leq 0.5)$, 即信号频率 f_1 接近 $k_0 f_0$, 若能求得 α , 即可求得 $u(t)$ 的频率、幅值和相位为:

$$\begin{cases} f_1 = (k_0 + \alpha)f_0 \\ U_m = 2|U_w(k_0)| / |W_0(-\alpha f_0)| \\ \theta = \Phi(k_0) - \alpha \pi \end{cases} \quad (3)$$

其中, $|U_w(k_0)|$ 、 $\Phi(k_0)$ 可由 $u_w(n)$ 的 N 点 DFT 求得。

α 用相位差校正法求取。将 $u(t)$ 在时域平移 mT_s (m 为整数,且 $1 \leq m \leq N$) 得 $u_1(t)$, 对 $u_1(t)$ 重复上述推导可得 $\Phi_1(k_0)$, 同理, $\Phi_1(k_0)$ 亦可由 $u_{1w}(n)$ 的 N 点 DFT 求得。由于 $\Delta\Phi = \Phi_1(k_0) - \Phi(k_0) = 2\pi f_1 m T_s$, 于是有:

$$f_1 = \frac{\Delta\Phi}{2\pi m T_s} = \frac{\Phi_1(k_0) - \Phi(k_0)}{2\pi m T_s} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{f_1 - k f_0}{f_0} = \frac{N\Delta\Phi}{2\pi m} - k_0 \quad (5)$$

3.1.2 频率校正后压缩方法

对录波通道数据进行上述算法处理求得 α 后,采用式(3)计算得到基波及各次谐波的频率、幅值和相位,设置相关阈值滤除能量成分不高的谐波,并以正弦波形式重构近似周期信号,再进行 FFT 压缩。后续仿真结果表明,对频率偏移的信号进行频率校正后的 FFT 压缩,其压缩比大幅提升,误差减小。

3.2 小波分解结构及最佳分解层次

在 MATLAB 中,根据给定的小波变换函数,求

解原始信号的多尺度分解,分解层数为 N_d ,函数返回分解向量 C 和长度向量 L 。图 3 是 $N_d=3$ 的多尺度分解结构图^[9],信号 x 经过 3 层分解后在 C 序列中存储 4 个系数,分别是近似系数 c_{A3} (表征信号本身特征的低频系数)和细节系数 c_{D3} 、 c_{D2} 、 c_{D1} (表征信号细微差别的高频系数),序列 L 中存储各个系数的长度。

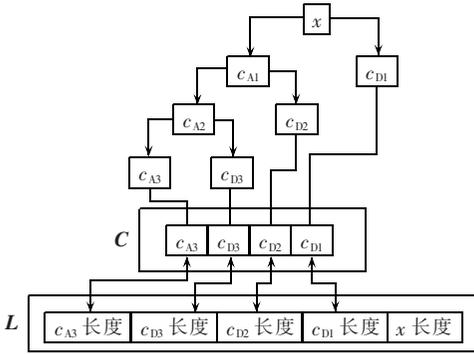


图 3 小波变换分层结构图(3层)

Fig.3 Hierarchical structure of wavelet transform(3 layers)

为了保证重构信号与原始信号的近似度,应使最底层近似系数包含工频成分,因此本文以式(6)确定最大分解层数^[1]:

$$N_d = \text{int} \left(\log_2 \frac{f_s}{50} - 1 \right) \quad (6)$$

其中, int 表示取整; f_s 为采样频率,电力系统工频为 50 Hz。

3.3 小波作用阈值的确定

输电线路故障时,暂态信息主要隐藏在信号的畸变点上,通过设置阈值来舍弃幅度较小的无关小波系数。其基本原理是,设置某一尺度 j 下的阈值^[5]为:

$$\eta_j = \lambda \max \{d_j(n)\} \quad n=1, 2, \dots, M/2^j \quad (7)$$

其中, M 为原始信号的数据长度; $d_j(n)$ 为小波分解后的细节系数; λ 为比例系数,且 $0 \leq \lambda \leq 1$, $\lambda=0.1$ 表示阈值设置为小波细节系数最大值的 10%。

信号经过 J 级压缩处理后,重构信号的小波细节系数为:

$$\bar{d}_j(n) = \begin{cases} d_j(n) & d_j(n) \geq \eta_j \\ 0 & d_j(n) < \eta_j \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, J \quad (8)$$

所以只需存储和传输信号较少的数据,即小波分解得到的低频系数和高频系数,这样就实现了对原始数据的压缩。当需要原始数据时,可以根据小波的重构公式计算存储的数据恢复信号。

4 仿真及压缩实例

4.1 FFT 和小波压缩的选择判断

本文采用华中电网某 220 kV 变电站 110 kV 线路真实故障 B 时段录波数据作为仿真验证样本,采样频率为 2 kHz。图 4、图 5 分别是 FFT 压缩和小

波压缩的效果图。其中 FFT 压缩阈值设置为 $\text{fft}(u)$ 最大值的 0.3%,小波压缩采用 coif5 小波基,分解层数为 4,比例系数 $\lambda=0.001$ 。

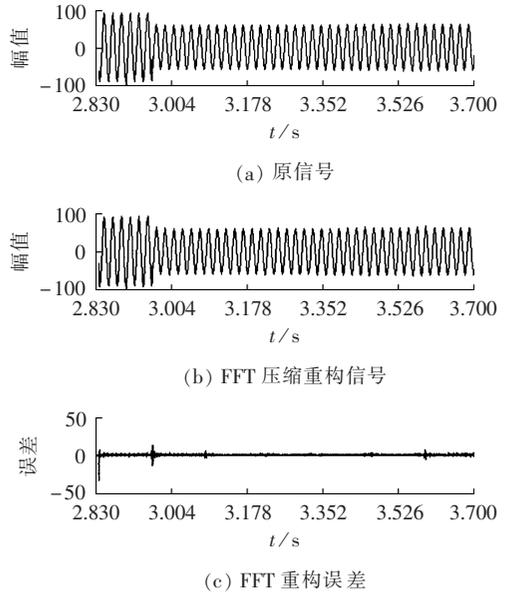


图 4 实际故障信号 FFT 压缩重构图

Fig.4 FFT compression and reconstruction of actual fault signal

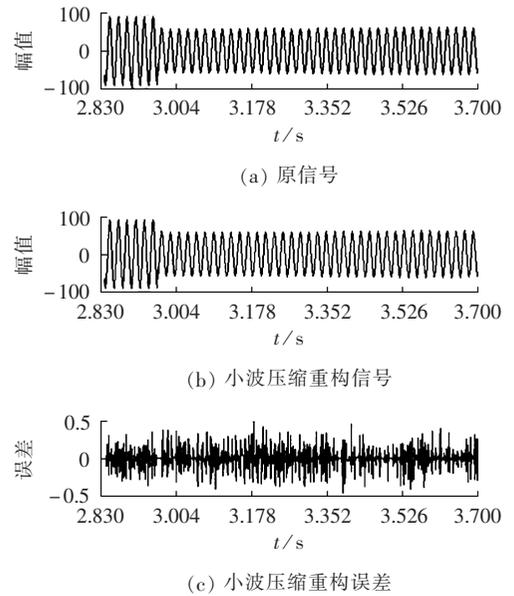


图 5 实际故障数据小波压缩重构图

Fig.5 Wavelet compression and reconstruction of actual fault signal

从图 4 和图 5 可以看出,FFT 在压缩故障信号时,重构信号对故障信息反映不够精细,且有较明显的边界效应,误差很大。而小波压缩能精确重构故障信号,确保故障信息不丢失,且误差相对很小。以此为判据,在对信号进行 FFT 压缩后,如果误差很大,则改用小波压缩。

4.2 频率偏移对 FFT 压缩的影响

压缩包含基波及 3、5 次谐波成分的周期信号

u , 采样频率为 2 kHz。阈值分别为 $\text{fft}(u)$ 最大值的 0.3%、0.5%、0.7%。图 6 为 FFT 压缩后不同阈值下剩余数据百分比与频率的关系曲线, 剩余数据百分比 = $(1 - \text{零系数个数} / \text{系数总数}) \times 100\%$ 。

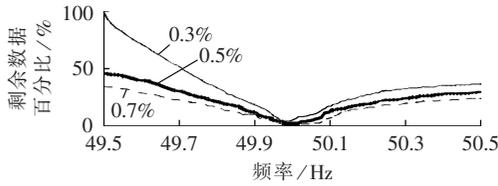


图 6 不同阈值下压缩剩余数据百分比与频率关系曲线图

Fig.6 Curves of relation between residual data percentage and frequency for different thresholds

图中 3 条曲线表明阈值越小, 压缩后的剩余数据越多; 另外, 频率偏移越大, 剩余数据百分比也越大, 在工频 50 Hz 处, 可以获得剩余数据百分比最小值 1.5%。

图 7 是不同阈值下的最大误差百分比与频率的关系曲线, 其中最大误差百分比为重构信号与原信号之间误差最大值和原信号最大值的百分比。从图中可以看出, 在信号频率偏移工频 50 Hz 时, 最大误差百分比明显增大, 最大可达 29% 左右, 只有在工频处, 误差才会降到零。阈值设置得越小, 保留的细节部分越多, 误差也会更小, 这也是图中 0.3% 曲线误差小于 0.5% 和 0.7% 曲线误差的原因。

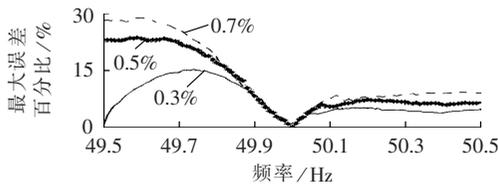


图 7 不同阈值下最大误差百分比与频率关系曲线图

Fig.7 Curves of relation between maximum error percentage and frequency for different thresholds

从图 6、图 7 可以看出: 频率偏移 50 Hz 时, 剩余数据百分比大, 误差也较大, 重构数据不能精确地反映原信号特征, 压缩性能不能达到最优, 因此需要对信号进行频率校正再进行压缩; 剩余数据百分比和最大误差百分比是一对成反比关系的性能指标, 要获得较小的剩余数据百分比, 阈值设置需要较大, 而这时的误差也会相应地增加, 因此, 在实际中应根据指标要求设置阈值。

4.3 频率校正 FFT 压缩

在 MATLAB 中, 以包含基波及 3、5、7、11 次谐波 (电力信号一般很少含偶次谐波) 的余弦周期信号为原信号, 采样频率 2 kHz, 采用圆周对称的 bartlett 窗, 其频谱数学表达式为:

$$W(f) = \frac{2}{N} \frac{\sin(\pi NT_s f / 2)^2}{\sin(\pi T_s f)^2} e^{-j\pi NT_s f} \quad (10)$$

故障录波分析属于离线分析, 为了提高压缩性能, 减小误差, 本文窗长度取 400, 谐波测量最高次数为 10 次。

图 8 是信号频率等于 49.9 Hz, 采用 FFT 测量压缩算法的重构信号及误差图。通过原信号和重构信号的比较能够发现, 重构信号能精确恢复原始信号所携带的信息, 误差非常小, 零系数成分 (即压缩后零系数个数/系数总数的百分比) 达到 97%。

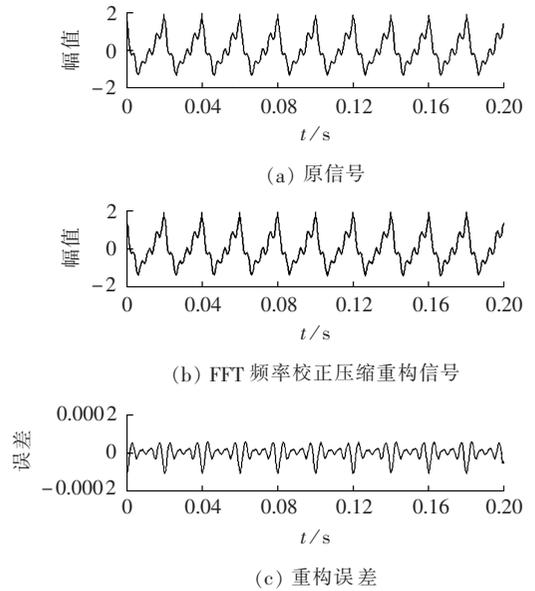


图 8 理想信号 FFT 频率校正压缩重构图

Fig.8 Compression and reconstruction of FFT with frequency calibration for ideal signal

图 9 中原信号数据采样频率为 2 kHz, 数据长度为 400, 谐波测量最高次数为 20 次, 误差控制在 $\pm 0.5\%$ 内, 零系数成分为 98.5%。

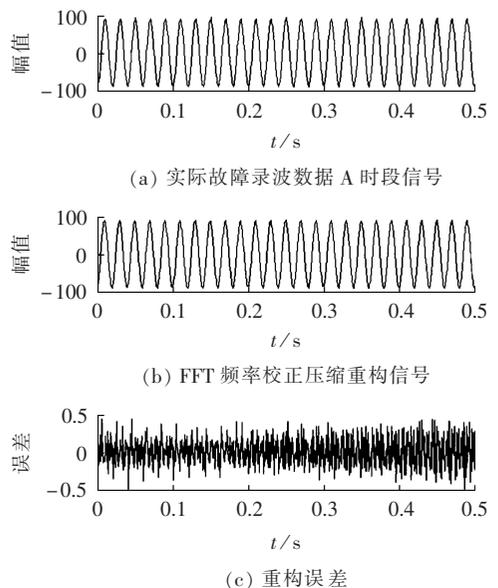


图 9 单相接地故障 A 时段录波数据压缩重构图

Fig.9 Compression and reconstruction of single-phase grounding fault records for segment A

4.4 录波数据整体的压缩性能

对电网实际故障录波数据分通道分时段压缩,零系数成分及压缩时间(取多次测试后最大值)结果分别如表 1、表 2 所示。表 1 中通道 1、2、3、4 分别为该线路的 A、B、C 三相电流和 3 倍零序电流。

表 1 实际录波数据整体压缩性能

Tab.1 Overall data compression performance of actual records

线路	通道	零系数成分/%				
		A 时段	B 时段	C 时段	D 时段	E 时段
1	1	95.5	97.9	97.0	99.6	98.7
	2	96.5	97.5	97.5	98.5	98.0
	3	97.5	58.5	60.1	57.8	98.2
	4	99.8	62.4	72.3	69.6	99.3
2	1	97.5	97.9	98.0	98.2	95.8
	2	96.6	95.4	98.5	98.5	99.2
	3	97.2	98.9	96.0	94.6	98.9
	4	96.9	94.9	97.3	95.5	99.0

表 2 实际录波数据压缩时间

Tab.2 Data compression time of actual records

通道	压缩时间/ms				
	A 时段	B 时段	C 时段	D 时段	E 时段
正常	2.013	3.621	3.154	2.178	9.004
故障	2.225	3.7+24.746	3.36+20.52	2.05+17.2	9.378

线路 1 发生了 C 相单相接地故障,即通道 3、4 的 B、C、D 时段是故障时段,在 FFT 压缩判断后改用小波变换进行压缩,由于数据携带故障信息丰富,且小波分解层数为 4 层,故零系数成分较少,压缩时间较长。

线路 1 的通道 1、2 全部时段和分别处于故障前和切除故障后的通道 3、4 的 A、E 时段以及线路 2 所有通道的各时段都是正常运行数据,采用 FFT 频率校正压缩,零系数成分比较高,一个正常通道所有时段的压缩时间总计 19.97 ms。

综上所述,如果本地存储压缩后的数据,采用本文算法可整体上节约 80% 以上的存储空间,极大地降低了存储成本。在实时传输方面,以一个通道数据为例,压缩前数据大小约为 10244×2 字节,FFT 压缩后由于只需记录非零值采样点采样编号及其 FFT 变换系数值,其大小为 618 字节。如果通过以太网发送(以太网数据帧最大长度 1500 字节),只需一次即可发送完毕,减少了网络流量,降低了 CPU 资源占用量。

5 结论

本文立足于整体录波数据,提出了一种分通道分时段数据压缩方案,即采用 FFT 算法分段压缩数据,若数据重构后误差较大,则改用小波变换压缩。当频率偏移较大时,常规 FFT 算法的压缩误差较大,

剩余数据百分比较高,这时可采用基于 DFT 校正算法的改进 FFT 压缩方法。通过理想数据和实际故障录波数据的仿真测算,验证了算法较高的压缩性能,以及重构信号良好的信息保留特性。该方案在电力系统故障录波数据压缩中的应用是可行的。

参考文献:

- [1] 桂勋. 面向 IEEE COMTRADE 格式的海量录波数据并行压缩/解压算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):136-142.
GUI Xun. Parallel compression and decompression algorithm for massive recording data in IEEE COMTRADE format[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):136-142.
- [2] 刘志刚,钱清泉. 基于多小波的电力系统故障暂态数据压缩算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):22-26.
LIU Zhigang,QIAN Qingquan. Compression of transient data in electric power system based on multiwavelet[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):22-26.
- [3] 张昊,刘沛. 基于双正交小波的电力系统故障录波数据压缩[J]. 电网技术,2000,24(11):41-43.
ZHANG Hao,LIU Pei. Bi-orthogonal wavelet based data compression algorithm for power system fault recorder[J]. Power System Technology,2000,24(11):41-43.
- [4] 鲁晓帆,刘志刚,吴峰. 多核系统的小波包并行算法及其在电力系统数据压缩中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):130-135.
LU Xiaofan,LIU Zhigang,WU Feng. Parallel wavelet packet algorithm based on multi-core system and its application in power data compression[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):130-135.
- [5] 康忠健,樊建川,徐丽,等. 自适应小波压缩算法在连续录波装置中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):116-119.
KANG Zhongjian,FAN Jianchuan,XU Li,et al. Application of adaptive wavelet data compression algorithm in continuous recorder[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):116-119.
- [6] 乐全明,费铭薇,张沛超,等. 超高压电网故障录波数据自适应压缩新方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(21):61-65.
YUE Quanming,FEI Mingwei,ZHANG Peichao,et al. A novel self-adaptive algorithm for compression fault recorded data from EHV power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(21):61-65.
- [7] LITTLER T B,MORROW D J. Wavelets for analysis and compression of power system disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(2):358-364.
- [8] 刘晓胜,王新库,黄南天,等. 基于模式相似度和 LZW 压缩编码的电能质量数据压缩方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):53-57.
LIU Xiaosheng,WANG Xinku,HUANG Nantian,et al. Power quality data compression based on pattern similarity and LZW compressed encoding[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):53-57.
- [9] 管春,周维维,卢伟国,等. 基于图像平滑算法的电能质量数据压缩方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):77-80.
GUAN Chun,ZHOU Luwei,LU Weiguo,et al. Power quality

data compression based on image smoothing algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):77-80.

[10] 中国电力科学研究院. DL/T553—94 220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则[S]. 北京:中国电力出版社,1994.

[11] 黄纯,江亚群. 谐波分析的加窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):26-31.

HUANG Chun,JIANG Yaqun. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(15):26-31.

作者简介:



黄 纯

黄 纯(1966-),男,湖南沅江人,教授,博士研究生导师,博士,通讯作者,研究方向为电力系统自动化、继电保护、电能质量分析与控制(E-mail:yellowpure@hotmail.com);

杨帅雄(1987-),男,湖南湘阴人,工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

梁勇超(1972-),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统自动化、继电保护。

Practical data compression method for power system fault records

HUANG Chun¹, YANG Shuaixiong^{1,2}, LIANG Yongchao², LIU Kun², WEN Chao^{1,2}, GUO Zhenhua¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Examine and Repair Company, Changsha 410002, China)

Abstract: Because the fault records occupy only a small proportion of the whole record file, a channel-specific and segment-specific data compression method is proposed for the mass data transmission of power system fault records. Because the FFT(Fast Fourier Transform) algorithm has higher data compression ratio for periodic signals, the segment data are treated by FFT algorithm first. If the error is bigger, the wavelet transform is then applied. If the frequency offset of power system is greater than the rated value, the windowed Fourier transform algorithm with frequency calibration is applied to ensure the compression ratio and compression precision. Simulation and actual compression of record file show that the proposed algorithm has better compression performance and smaller error, verifying its feasibility and validity.

Key words: electric power systems; fault records; data compression; fast Fourier transforms; windowed DFT algorithm; wavelet transforms

(上接第 145 页 continued from page 145)

[17] 柯燕燕. 我国征地补偿标准现状与改进研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.

KE Yanyan. A status quo of land expropriation compensation in our country and research on ameliorating the standard[D]. Chongqing:Chongqing University,2006.

作者简介:

姜小静(1988-),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研



姜小静

究方向为农业电气化与自动化(E-mail:247999032@qq.com);

苏海锋(1977-),男,河北保定人,讲师,博士,主要从事电网规划及电能质量监测方面的研究工作;

梁志瑞(1959-),男,河北保定人,教授,从事电力系统自动化、电力系统监测与故障诊断技术的教学与研究工作。

Distribution substation planning considering risk cost

JIANG Xiaojing, SU Haifeng, LIANG Zhirui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The rationality of uncertainty factor treatment will directly influence the optimal result of distribution substation planning. Based on the theory of LCC(Life Cycle Cost), an improved quantization method is proposed for the uncertainty factors in the model of substation locating and sizing, such as load, electricity price and land price, and a substation planning model is built with the minimum LCC as its objective function. Case analysis verifies the rationality of the proposed method, which has lower LCC than traditional planning method does.

Key words: electric power distribution; electric substations; planning; life cycle cost; substation locating and sizing; risks