

基于小波变换的电气化铁路谐波检测

张俊辉

(中国铁建电气化局集团北方工程有限公司, 山西 太原 030053)

摘要: 为了提高电气化铁路谐波检测准确度, 提出一种基于小波变换的电气化铁路谐波检测方法。首先分析电气化铁路谐波检测原理, 并采集电气化铁路谐波信号; 然后采用小波变换对电气化铁路谐波信号进行分解和去噪, 得到无噪的电气化铁路谐波信号; 最后采用递推最小二乘法对电气化铁路谐波进行检测, 并在Matlab 2017平台上进行电气化铁路谐波检测仿真模拟实验。结果表明, 该方法的电气化铁路谐波检测准确度高, 不仅减少了电气化铁路谐波检测误差, 而且电气化铁路谐波检测的实时性好, 谐波检测的整体结果要优于当前其他电气化铁路谐波检测方法, 具有广泛的应用前景。

关键词: 小波变换; 电气化铁路; 谐波检测; 检测准确度

Harmonic detection of electrified railway based on wavelet transform

ZHANG Junhui

(North Engineering Co., Ltd., of the Electrification Bureau Group, CRCC, Tianyuan 030053, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of harmonic detection in electrified railway, a harmonic detection method for electrified railway based on wavelet transform is proposed. Firstly, the principle of harmonic detection of electrified railway is analyzed, and the harmonic signal of electrified railway is collected. Then the harmonic signal of electrified railway is decomposed and denoised by wavelet transform, and the noise-free harmonic signal of electrified railway is obtained. Finally, the recursive least square method is used to detect the harmonic of electrified railway, and the harmonic detection of electrified railway is simulated on the platform of Matlab 2017. The results of real simulation experiments show that this method has high accuracy in harmonic detection of electrified railways, reduces the error of harmonic detection of electrified railways, and has good real-time performance. The overall results of harmonic detection of electrified railways are better than those of other current harmonic detection methods of electrified railways, and it has broad application prospects.

Key words: wavelet transform; electrified railway; harmonic detection; detection accuracy

0 引言

随着我国铁路事业的迅速发展, 电气化铁路的线路越来越长^[1]。在电气化铁路的实际应用中, 由于电气化铁路的电力机车功率大、速度变化频繁, 再加上受外界其他因素的综合影响, 会产生大量的谐波, 电压和电流波形发生畸变, 对牵引供电系统的供电电能质量产生一定干扰, 严重时可能使电气化铁路发生事故^[2]。对电气化铁路谐波

进行检测研究, 可以减少谐波对电气化铁路电力系统的影响, 因此对谐波进行检测成为电气化铁路中亟需解决的难题^[3-4]。

近些年, 国内外研究机构对电气化铁路谐波检测问题进行了深入研究, 涌现出了大量的电气化铁路谐波技术^[5-7]。当前电气化铁路谐波检测主要有傅里叶变换、独立分量分析和Hilbert-Huang变换等^[8-10], 其中对于变化比较稳定的电气化铁路

谐波, 傅里叶变换可以得到较好的检测效果, 但是对于变化不稳定的电气化铁路谐波, 其谐波检测效果极差。独立分量分析虽然可以对变化不稳定的电气化铁路谐波进行检测, 但是不能得到变化不稳定的电气化铁路谐波的频谱, 检测结果的可解释性比较差。Hilbert-Huang变换具有一定的自适应能力, 但是无法描述电气化铁路谐波的不连续性信号, 因此通用性比较差^[11-12]。

为了提高电气化铁路谐波检测准确度, 提出一种基于小波变换的电气化铁路谐波检测方法。首先采用小波变换对电气化铁路谐波信号进行分解和去噪, 得到无噪的电气化铁路谐波信号; 然后采用递推最小二乘法(RLS)对电气化铁路谐波进行检测; 最后在Matlab 2017平台上进行电气化铁路谐波检测仿真模拟实验, 分析本文方法的有效性和优越性。

1 电气化铁路谐波检测原理

电气化铁路包括牵引供电系统和电力机车两部分。其中, 牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成, 牵引变电所是核心部分, 主要保证供电的可靠性。在电气化铁路接线中, 由于不断有非线性用电设备接入, 谐波日益严重, 对电气化铁路的供电系统安全产生威胁。当前电气化铁路网谐波通常采用无源或者有源滤波器进行补偿, 有源滤波器在电气化铁路网中应用较为广泛, 但是有源滤波器谐波补偿效果好坏直接与谐波检测方法相关。补偿电流的控制方法影响整个系统的动态特性。电气化铁路供电系统中非线性负载电流采用傅里叶进行分解, 可以得到

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1) \\ &= i_1(t) + i_h(t) \end{aligned}$$

对式(1)进行分析可以发现, 非线性负载电流包括基波电流和谐波电流两部分, 高准确度的谐波检测是有源滤波器正常工作的基础。当前主要采用递归最小二乘法进行自适应谐波检测, 但

是由于采集的谐波具有一定的噪声, 且噪声会对谐波检测结果产生不利影响, 而当前应用的传统递归最小二乘法没有考虑噪声的影响, 使得谐波检测错误率大, 为此本文引入小波变换对电气化铁路谐波信号进行分解和去噪, 得到无噪的电气化铁路谐波信号。

2 小波变换的电气化铁路谐波检测

2.1 小波变换的电气化铁路谐波消噪处理

设采集的电气化铁路谐波信号为 $y(n)$, 其由无噪谐波信号 $s(n)$ 和噪声 $n(n)$ 组成, 因此有

$$y(n) = s(n) + n(n) \quad (2)$$

小波变换的电气化铁路谐波消噪处理就是对谐波信号 $y(n)$ 进行分解, 从而有效地消除噪声 $n(n)$, 然后得到无噪谐波信号 $s(n)$ 。设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 相应的傅里叶变换为 $\psi'(\omega)$, 如果 $\psi'(\omega)$ 满足式(3)的条件, 那么 $\psi(n) \in L^2(R)$ 表示一个母小波。

$$C_\psi = \int_R |\psi'(\omega)|^2 / |\omega| d\omega < \infty \quad (3)$$

对母小波 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移操作, 可以产生许多小波序列, 具体如下

$$\psi_{a,b}(t) = 1/[\sqrt{|a|}] \psi(\frac{t-b}{a}) \quad (4)$$

对于 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换可以表示为

$$\begin{aligned} W_f(a,b) &= \langle f, \psi_{a,b} \rangle \\ &= |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi(\frac{t-b}{a}) dt \end{aligned} \quad (5)$$

电气化铁路谐波信号是一种数字化信号, 因此需要对连续小波变换进行离散化处理, $a=a_0^j$, $b=ka_0^j b_0$, 那么离散小波可以变换为

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}) \quad (6)$$

小波系数的计算公式为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle \quad (7)$$

由于无噪谐波信号 $s(n)$ 和噪声 $n(n)$ 的小波系数不同, 因此采用一定的阈值可以去掉噪声 $n(n)$ 的小波系数, 保留无噪谐波信号 $s(n)$, 然后对它们进行小波变换重构, 得到无噪谐波信号, 当前有硬阈

值法和软阈值法两种，分别表示如下

$$T_h(\omega_{j,k}, \delta) = \begin{cases} \omega_{j,k} & |\omega_{j,k}| \geq \delta \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \delta \end{cases} \quad (8)$$

$$T_h(\omega_{j,k}, \delta) = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - \delta) & |\omega_{j,k}| \geq \delta \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \delta \end{cases} \quad (9)$$

相对于硬阈值方法，软阈值方法更加灵活，通用性更强，因此本文选择软阈值方法对分解后的谐波信号小波系数进行处理，获得高质量的谐波信号。

2.2 递归最小二乘法的电气化铁路谐波检测

图中，设负载电流采样值为 $i_L(n)$ ； $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ 为电气化铁路供电系基波电压、 90° 相移后的信号； $W_1(n)$ 、 $W_2(n)$ 为 $X_1(n)$ 和 $X_2(n)$ 的权重值； $e(n)$ 为误差反馈信号。

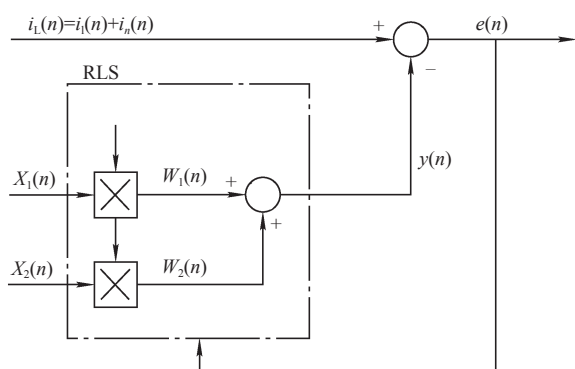


图1 基于递归最小二乘法的电气化铁路谐波检测原理

Fig.1 Harmonic detection principle of electrified railway based on recursive least square method

采用基于递归最小二乘法的电气化铁路谐波检测方法的迭代公式为

$$e(n) = i_L(n) - x^T(n)w(n-1) \quad (10)$$

$$w(n) = w(n-1) + k(n)e(n) \quad (11)$$

$$k(n) = \frac{p(n-1)x(n)}{\lambda + x^T(n)p(n-1)x(n)} \quad (12)$$

$$p(n) = \frac{1}{\lambda} [p(n-1) - k(n)x^T(n)p(n-1)] \quad (13)$$

在检测谐波电流时，有 $e(n)$ 等价递归最小二乘法后验误差，那么 $e(n)$ 表示检测出的谐波电流， $k(n)$ 表示卡尔曼增益矢量， $p(n)$ 表示输入信号逆

矩阵。

在电气化铁路谐波检测过程中，基波分量 $i_L(n)$ 可以看作期望信号， $i_h(n)$ 可以看作干扰信号， $e(n)$ 根据递归最小二乘法对 $w(n)$ 的最优值 w^* 进行不断逼近， $y(n)$ 跟踪基波分量 $i_L(n)$ 的变化，从 $y(n)$ 中减去 $i_L(n)$ ，那么干扰信号产生的谐波检测结果为 $i_h(n)$ 。

3 电气化铁路谐波检测方法的实例分析

3.1 仿真实验的环境及参数设置

为了分析基于小波变换的电气化铁路谐波检测效果，在Matlab 2017平台上进行了电气化铁路谐波检测仿真模拟实验，仿真参数设置如下表所示。为了使基于小波变换的电气化铁路谐波检测效果更具说服力，选择基于独立分量分析的电气化铁路谐波检测效果方法进行对比测试。

表 电气化铁路谐波检测仿真参数设置

Tab. Setting of simulation parameters for harmonic detection of electrified railway

参数编号	参数名	参数值
1	牵引变压器	110/27.5 kV
2	采样频率	1 000 Hz
3	数据采样次数	50 次
4	谐波次数	10 ~ 50 次

3.2 仿真实验结果与分析

采用本文方法和对比方法对电气化铁路谐波进行检测，基波电流波形输出结果如图2所示。从图2可以看出，本文方法的基波电流波形在两个基波周期以内就趋于稳定，而对比方法的基波电流波形在两个基波周期以上才慢慢趋于稳定。结果表明，本文方法具有很强的收敛性，可以加快谐波检测速度。

统计电气化铁路谐波检测准确度，结果如图3所示。从图3可以看出，本文方法的电气化铁路谐波检测准确度要明显高于对比方法，有效降低了电气化铁路谐波检测错误率，可以对电气化铁路谐波进行有效补偿，从而有效保证了电气化铁路供电系统的稳定和安全。

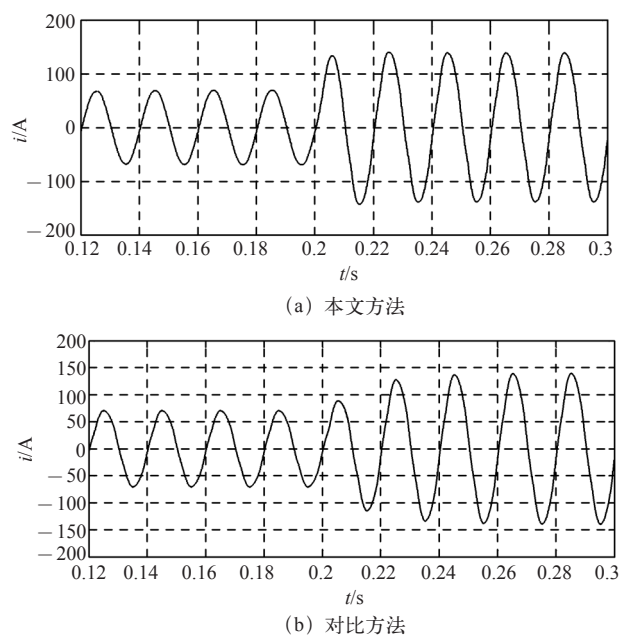


图2 检测到的基波电流波形

Fig.2 Fundamental current waveform detected

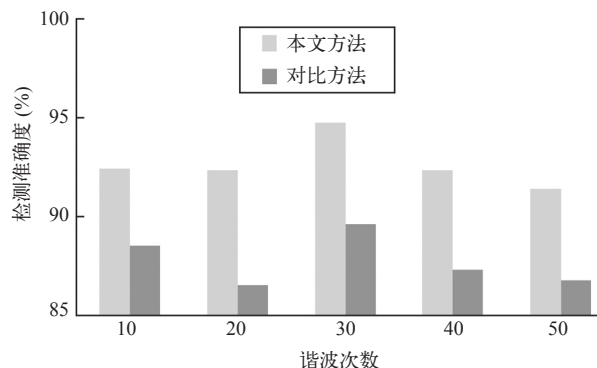


图3 电气化铁路谐波检测准确度对比

Fig.3 Accuracy comparison of harmonic detection for electrified railway

4 结束语

为了提高电气化铁路谐波检测准确度, 提出基于小波变换的电气化铁路谐波检测方法, 并在 Matlab 2017 平台上进行了电气化铁路谐波检测仿真模拟实验, 结果表明, 本文方法的电气化铁路谐波检测准确度高, 检测速度快, 具有十分广泛的应用前景。

参考文献

[1] 王艳姣, 陈保平, 袁瑞雪, 等. 基于自适应理论谐波检测的电气化铁路有源滤波器仿真研究[J].

石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 114-120.

WANG Yanjiao, CHEN Baoping, YUAN Ruixue, et al. Simulation of active power filter for electrified railway based on adaptive harmonic detection[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2018, 36(1): 114-120.

[2] 邹舒, 张程柯, 付永生, 等. 电气化铁路谐波叠加问题研究[J]. 电气应用, 2013, 32(21): 68-73.

ZOU Shu, ZHANG Chengke, FU Yongsheng, et al. Research on harmonic superposition of electrified railway[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(21): 68-73.

[3] 马加明. 电气化铁路谐波概述[J]. 黑龙江交通科技, 2013, 36(2): 173-175.

MA Jiaming. Overview of harmonics in electrified railway[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 36(2): 173-175.

[4] 何国军, 朱云芳, 戴朝华, 等. 基于差分进化的时频原子分解方法在电气化铁路谐波检测中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 211-216.

HE Guojun, ZHU Yunfang, DAI Chaohua, et al. Application of time-frequency atomic decomposition based on differential evolution in harmonic detection of electrified railway [J]. Power Grid Technology, 2012, 36 (12): 211-216.

[5] 李强. 基于TLS-ESPRIT算法的电气化铁路谐波检测[J]. 电气化铁道, 2012, 23(3): 27-30.

LI Qiang. Harmonic detection of electrified railway based on TLS-ESPRIT algorithm [J]. Electrified Railway, 2012, 23 (3): 27-30.

[6] 董祥, 李群湛, 黄军, 等. 适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 32-35.

DONG Xiang, LI Qunzhan, HUANG Jun, et al. Research on reactive and harmonic current detection methods for electrified railways [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (6): 32-35.

- [7] 苏玉香, 刘志刚, 李科亮, 等. Hilbert-Huang变换在电气化铁路谐波检测中的应用[J]. 电网技术, 2008(18): 30-35.
SU Yuxiang, LIU Zhigang, LI Kelian, et al. Application of Hilbert-Huang transform in harmonic detection of electrified railway [J]. Power Grid Technology, 2008 (18): 30-35.
- [8] 吴丽然, 吴命利. 适用于电气化铁路的级联H桥型有源电力滤波器[J]. 铁道学报, 2017, 39(5): 33-39.
WU Liran, WU Mingli. Cascaded H-bridge active power filter for electrified railway [J]. Journal of Railway, 2017, 39 (5): 33-39.
- [9] 王果, 周末, 常文寰. 适于电气化铁路的三相四开关型有源滤波器选择性谐波补偿的控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3554-3561.
WANG Guo, ZHOU Mo, CHANG Wenhuan. Control strategy for selective harmonic compensation of three-phase four-switch active power filter for electrified railway [J]. High Voltage Technology, 2016, 42 (11): 3554-3561.
- [10] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Research on three-phase and two-arm hybrid active compensation for electrified railway [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43 (13): 100-104.
- [11] 滕志军, 张晓旭, 李国强, 等. 基于ZigBee的电气化铁路谐波监测系统研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(12): 65-70.
TENG Zhijun, ZHANG Xiaoxu, LI Guoqiang, et al. Research on harmonic monitoring system of electrified railway based on ZigBee [J]. New Technology of Electrical Power, 2014, 33 (12): 65-70.
- [12] 耿超, 王丰华, 黄荣辉, 等. 基于改进Hilbert-Huang变换算法的电气化铁路谐波检测[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(9): 1225-1230, 1238.
GENG Chao, WANG Fenghua, HUANG Ronghui, et al. Harmonic detection of electrified railway based on improved Hilbert-Huang transform algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48 (9): 1225-1230, 1238.

作者简介

张俊辉

张俊辉(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为铁路电气化。

(收稿日期: 2018-12-10) **EA**