

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.013

基于FFT与小波变换的机车谐波电能计量

张宝, 易吉良, 姜建伟, 江元元, 刘丹, 尹路

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对电力机车复杂运行环境带来的大量非稳态谐波难以精确计量的问题, 提出一种基于快速傅里叶变换与小波变换相结合的机车电能计量方法。首先通过小波变换找到信号突变点, 判断计算设定周期内的信号是稳态信号或非稳态信号; 其次, 对稳态信号用FFT进行分析, 而非稳态信号用小波方法进行分析; 最后, 在相应算法下计算出信号中各频率成分的电能值。仿真证明该算法对谐波电能计量的精确性。

关键词: 快速傅里叶变换; 小波变换; 谐波计量

中图分类号: TM714.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)05-0058-05

Locomotive Harmonic Energy Measurement Based on FFT and Wavelet Transformation

Zhang Bao, Yi Jiliang, Jiang Jianwei, Jiang Yuanyuan, Liu Dan, Yin Lu

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A locomotive power measurement method based on the combination of fast Fourier transform and wavelet transform is presented for electric locomotives complex operating environment in which lots of non-steady-state harmonics are difficult to be measured accurately. First, wavelet transform is applied to find out the signal point mutation and to determine whether the given calculation cycle signal is steady or non-steady. Next, the steady signal is analyzed by FFT, while the non-steady signal is analyzed by wavelet method. Finally, the energy value of each frequency component in signal is calculated by phasor algorithm. Simulation results show that the algorithm can accurately measure the harmonic power.

Keywords: fast fourier transform; wavelet transform; harmonic measurement

0 引言

随着电气化铁路的快速发展, 大量非线性电气设备使用产生的谐波和间谐波流入电网, 致使电压、电流的正弦波形严重畸变, 不仅损坏用电设备, 危及电网的安全稳定运行^[1], 而且影响了电能计量的合理性和公正性。我国技术监督局颁发的GB/T 14549-93

《电能质量公用电网谐波》, 对各级公用电网的谐波电压和用户注入电网的谐波电流均做出了明确的规定, 坚持对谐波污染执行“谁污染, 谁治理”的原则, 及时处理污染源。

电气化铁路牵引负荷有单相不对称、波动剧烈的特点, 产生的谐波有别于其他电力用户产生的谐

收稿日期: 2013-08-15

基金项目: 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目(CX1302), 湖南省自然科学株洲联合基金资助项目(12JJ9042), 湖南工业大学自然科学基金资助项目(2011HZX07)

作者简介: 张宝(1987-), 男, 安徽宿州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为自动化集成技术与应用,

E-mail: zhangbao361@126.com

波,且非线性负载运行时产生的谐波电能为负值。而电能表的实际显示值为基波电能值与谐波电能值之和,因此产生谐波的用户交付的费用小于其实际使用的电量费用,同时也致使非谐波用户多交电费^[2],给铁路牵引用户的电能精确合理计量带来困难。电气化铁路谐波测量方法的经典算法有傅里叶变换法、带通滤波法、小波分析法、瞬时功率理论法、神经网络法等^[3],我国主要采用傅里叶分析方法。傅里叶分析方法的基本思想是用傅里叶级数表示非正弦连续时间周期信号,从而达到对信号进行谐波分析的目的,但只限于稳态谐波分析。而小波分析方法在计量非稳态信号或时变信号电能时具有较大的优势,且在时域和频域都有表征信号局部信息的能力^[4]。

本文结合快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对稳态谐波分析的优势与小波分析法在波动谐波和快速变化谐波分析上的优势,提出一种利用小波变换和傅里叶变换相结合的方法来计量电铁谐波。首先,通过小波变换找到信号的突变点;其次,分别对稳态和非稳态部分信号进行分析;最后,分别计算出各部分的电能值和总的电能消耗。仿真分析证明该方法不仅能准确计量基波电能,而且对各次谐波电能的计量也有很高的精确度。

1 谐波影响下的电能计量

当前测量电能的方法主要是使用电子式电能表,而计量有功功率使用数字乘法器来实现^[5]。数字式电能表测量电能的基本方法是将电压、电流相乘,然后在时间上累加起来,即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t - \theta) \cdot I_m \sin(\omega t - \phi) dt, \quad (1)$$

式中: P 为一个周期内的平均有功功率; T 为交流电压、电流的周期; U_m 、 I_m 分别表示电压、电流的有效值。

电子式电能表在一个周期内计量有功功率电能的表达式为

$$W = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (2)$$

由式(2)可计算消耗的有功电能,但只能计算基波与各次谐波电能的总代数和,不能区分基波及各次谐波电能,因此影响电能计费的公正性、合理性。

1.1 基于FFT的谐波电能计量

电气化铁路在调节过程中(启动、爬坡、制动等)会引起电网电压畸变产生大量谐波,污染电网^[6]。而当前谐波测量方法主要采用傅里叶分析法,主要原理是在电力系统中,非正弦波形一般都满足傅里叶级数的条件,可以用基波和无限个高次谐波之和表

示。即一个周期为 T 的函数可以分解成无限个三角级数之和的形式^[7]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t). \quad (3)$$

式中: a_0 为直流分量; ω_1 为基波的角频率; A_n 和 φ_n 为 n 次谐波的幅值和初相位; a_n 和 b_n 分别为 n 次谐波的余弦项系数和正弦项系数。

如果各次谐波率已知,利用三角函数的正交性,可以得到:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) d(\omega t); \quad (4)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega \cdot t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cdot \cos(n\omega \cdot t) d(\omega t); \quad (5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega \cdot t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cdot \sin(n\omega \cdot t) d(\omega t). \quad (6)$$

由数学关系知 $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $\varphi_n = \arctg a_n / b_n$ 。

为了分析电力机车实际的谐波电能波形,要从理论上的傅里叶级数分析过渡到利用傅里叶级数的指数形式,得到各次谐波的幅值与相位。

由欧拉公式将式(3)推导为傅里叶级数的指数形式:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\omega t} \right) = \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} \right)_{n=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\omega t} \right) = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} = \sum_{-\infty}^{\infty} \dot{F}_n e^{jn\omega t}, \quad (7)$$

其中: $a_0 = (a_n/2)_{n=0} = \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} \right)_{n=0}$;

$$\dot{F}_n = \frac{1}{2} (a_n - jb_n) = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} e^{j\theta_n} = \frac{1}{2} A_n e^{j(\theta_n - 90^\circ)};$$

幅角 $\theta_n = \arctg(-b_n/a_n) = \varphi_n - 90^\circ$ 。当 $n=0$ 时, $\dot{F}_n = a_0$,为直流分量。

因此,可以得到各次谐波电压、电流的幅值及相位。从而计算出各次谐波的功率、电能值。实现谐波电能计量的要求。

1.2 基于小波分析的谐波电能计量

快速傅里叶分析方法虽然在处理谐波上具有快速准确计量的优势,但无法满足电力机车复杂环境中产生的谐波测量要求。而小波分析方法能很好地对时变和突变的非平稳信号进行分析。

小波变换是将时间频域划分成小部分,再对小间隔进行伸缩平移运算即多尺度细化构成小波函数系。在电气化铁路运行时产生的稳态和非稳态谐波,可利用小波变换的奇异性对谐波进行分离再计量电能。

利用小波包的分解与重构对信号进行处理,对信号 $f(t)$ 正交小波分解可以表示为

$$P_{j-1}f(t) = P_j f(t) + D_j f(t), \quad (8)$$

式中: $P_j f(t) = \sum_k x_k^{(j)} \phi_{j,k}(t)$; $D_j f(t) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_{j,k}(t)$ 。 (9)

其中系数 $x_k^{(j)}$ 和 $d_k^{(j)}$ 的递推公式分别为

$$x_k^{(j)} = \sum_n h_{0(n-2k)} x_n^{(j-1)}; d_k^{(j)} = \sum_n h_{1(n-2k)} d_n^{(j-1)}. \quad (10)$$

小波包系数的重构可表示为

$$d_i^{(j,n)} = \sum_k [h_{0(i-2k)} d_k^{(j+1,2n)} + h_{1(i-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}] = \sum_k g_{0(i-2k)} d_k^{(j+1,2n)} + \sum_k g_{1(i-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}, \quad (11)$$

式中: $g_{0(i-2k)}$ 和 $g_{1(i-2k)}$ 分别为小波包重构的低通滤波器和高通滤波器组。

小波分析计量电能的原理是在采样时间 T 内(为便于计算取 $n=2N$),电压和电流信号可以表示如下:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(2i)}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(o)}(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t), \quad (12)$$

$$i(t) = \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(2i)}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(o)}(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t), \quad (13)$$

以上各式中: j 表示分解的层数; $d_{ij}^{(o)}(k)$, $d_{ij}^{(i)}(k)$ 表示重构电压、电流信号中尺度函数的系数; $d_{ij}^{(o)}(k)$, $d_{ij}^{(i)}(k)$ 表示重构电压、电流信号中的小波包变换系数。

代入有功功率的计算式(1)中,由三角函数的正交性,可以得到有功功率的表达式为

$$P = \frac{1}{T} \int u(t)i(t)dt = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(i)}(k) d_{ij}^{(i)}(k) = \sum_{i=0}^{2^j-1} P_j^{(i)}, \quad (14)$$

式中: $P_j^{(i)} = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_{ij}^{(i)}(k) d_{ij}^{(i)}(k)]$, $P_j^{(i)}$ 表示分解尺度为 j 时第 i 个节点上频带内信号功率,即谐波的有功功率。

有功电能可以用采样时间表示为

$$W = PT = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} P_j^{(i)} T = \sum_{i=0}^{2^j-1} W_j^{(i)}, \quad (15)$$

其中: $W_j^{(i)} = P_j^{(i)} T$, $W_j^{(i)}$ 表示分解尺度为 j 时第 i 个

节点上频带内信号电能,即谐波的有功电能。

2 基于FFT与小波分析的谐波电能计量

傅里叶分析方法为全局变换,具有在频域局部化分析的优点,但在时域上完全无局部化的缺点。而小波分析能很好地克服以上缺点,但是小波分析法在稳态分析上不如傅里叶变换法。

本研究采用傅里叶分析与小波分析相结合的方式计量电能。电力机车稳定运行时可以精确检测出稳态波形中各次谐波的幅值和相位。如果机车的运行环境发生变化,则电磁信号发生奇异,先通过小波分析法确定波形突变的时刻,再通过傅里叶分析法或小波包法对谐波进行分析计算。即可以监测到信号突变的位置,且不会影响其它频谱中的信号,提高了频域分析的精确度,同时满足了测量各次谐波含有率标准的要求。

原始信号处理流程为:对原始信号的每4个周期计算一次电能,首先采用小波变换法对信号进行检测,区分出稳态信号或非稳态和时变信号。再分别用快速傅里叶分析法处理稳态谐波分量,小波分析法计量非稳态和时变部分电能值,计量起点从突变点的上一周期开始。流程图如图1所示。

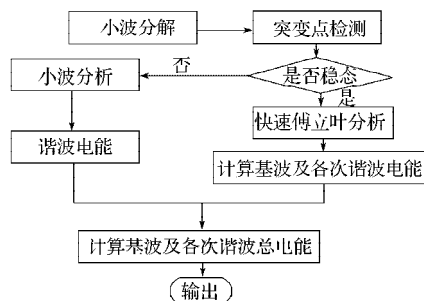


图1 谐波电能信号处理流程图

Fig. 1 Flowchart of harmonic electric power signal processing

谐波的研究要求有较高的采样设备,而针对机车谐波电能的检测与计量一般很难获取足够的现实信号样本,常通过仿真验证来完成。本文采用 Matlab 对谐波进行分析,通过运用 Matlab 的信号处理和小波分析工具对函数进行仿真。

3 仿真验证

根据实际电气化铁路电网中谐波的特点和仿真的需要,构建出电能信号模型。一般稳定情况下总谐波电流的畸变率为5%左右,但在调节过程中(启动、爬坡、制动等)就会产生更大的谐波。谐波包括各次谐波、间谐波和非稳态谐波等。为了分析方便,设系

统的采样频率 $f_s=1\ 600\ \text{Hz}$,电压和电流的基波频率均为 $f_0=50\ \text{Hz}$,考虑含有基波、三次谐波、间谐波及非稳态谐波的情况。由于Daubechies小波有很好的时域紧支性、正交性、近似对称性等,本文选取分析小波db40、5层小波变换对谐波电能进行计量仿真。

根据韶山系列电力机车谐波电流含有率统计知^[6],机车谐波主要含有3次谐波。设电压、电流信号如下:

$$u(t) = 100\sin(2\pi \times 50t) + 20\sin(2\pi \times 150t) + 5\sin(2\pi \times 325t);$$

$$i(t) = 100\sin(2\pi \times 50t) + 12.5\sin(2\pi \times 150t) + 4\sin(2\pi \times 325t).$$

电压和电流信号在 $4T \leq t \leq 8T$ 时间内分别加入非稳态信号:

$$10e^{-40t}\sin(2\pi \times 550t), 12e^{-40t}\sin(2\pi \times 550t),$$

其中 T 为基波周期。

信号源电压的各次信号波形如图2所示。由于电压与电流信号相似,因此只列出电压的综合信号,各次谐波、间谐波、非稳态谐波的波形,采用快速

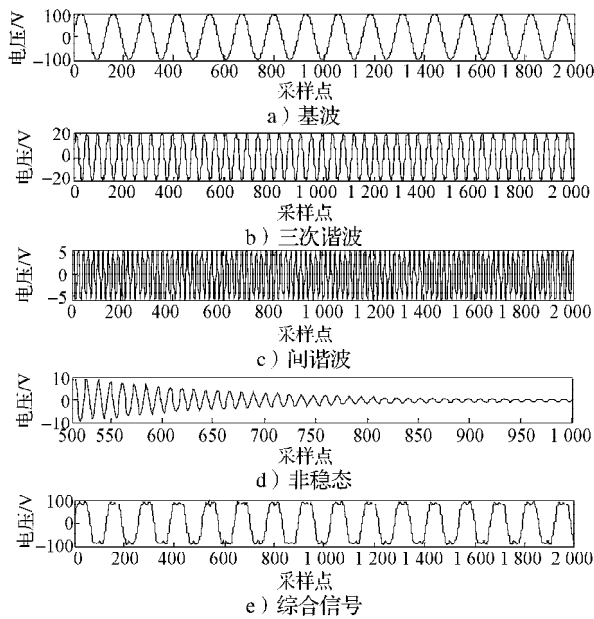


图2 原始电压各次信号

Fig. 2 Original voltage signals

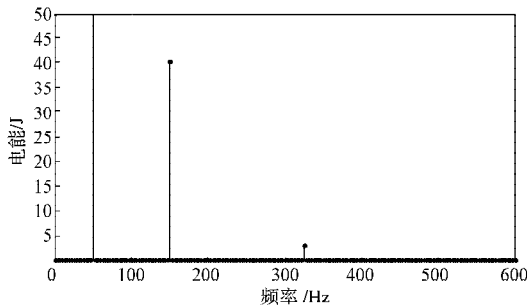


图3 FFT电能计量频谱图

Fig. 3 Spectrum chart for FFT power metering

傅里叶分析方法计算上述信号的电能值如图3所示。

结合FFT与WT算法计算上述信号的电能。采用小波分析法辨别出信号的突变点,稳态部分采用FFT分析计算各次电能;奇异信号采用小波分析法计算各次电能。小波分析法各次信号重构波形如图4~5所示。

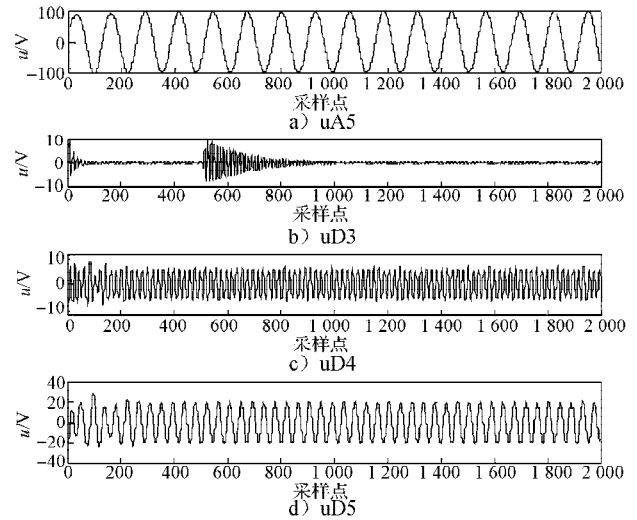


图4 电压的各次重构分量

Fig. 4 Every refractoring component of voltage

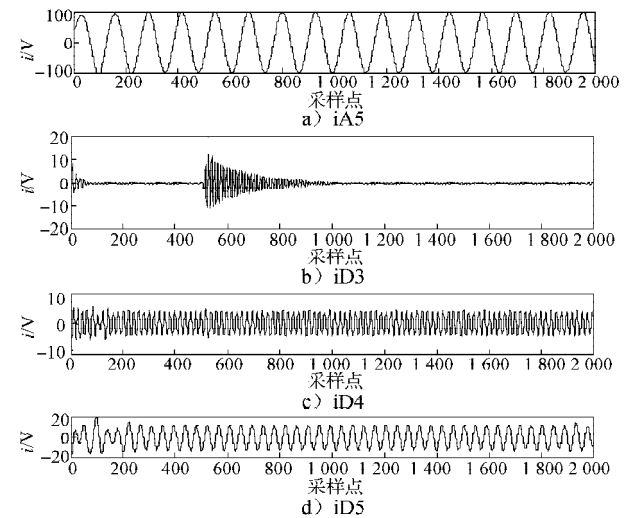


图5 电流的各次重构分量

Fig. 5 Every refractoring component of current

通过快速傅里叶分析法、小波分析法和两种结合算法对相同的电压电流信号进行仿真,本文计量16个基波周期的各次电能计量仿真结果数据、及误差分析,结果如表1所示。

由表1可知,快速傅里叶算法对稳态谐波测量较准确,而小波分析法弥补了其对非稳态谐波和间谐波电能测量不准确的缺点,结合2种算法能较准确地计量电力机车产生的各种谐波电能信号,有效地解决了傅里叶分析法对非稳态谐波电能计量的缺点。

表1 电能仿真实验数据

Table 1 The simulation experiment data of electric energy

频率 /Hz	理论值	小波法		FFT		结合算法	
		实际值	相对误差 /%	实际值	相对误差 /%	实际值	相对误差 /%
50	1 600	1 600.400 0	0.025 0	1 600.001 4	0.002 2	1 600.151 7	0.009 5
150	40	40.010 7	0.026 8	40.008 0	0.020 0	40.013 1	0.032 8
325	3.2	3.198 5	0.046 9	3.204 0	0.125 0	3.201 8	0.056 3
550	0.748 65	0.744 8	0.514 3	0.720 2	3.801 5	0.736 0	1.689 7

表1结果表明经过快速傅里叶变换算法可以很准确地计算出稳态信号电能值,但对频率分辨率不能自适用的调整,很难分辨出间谐波的频率,造成频谱泄露导致对间谐波及非稳态谐波等电能计量存在误差。

4 结论

针对电气化铁路牵引负荷单相不对称、波动剧烈的特点,结合快速傅里叶分析法对稳态谐波分析和小波分析法对奇异信号处理的各自优势,能实现电力机车稳态和非稳态的基波电能及各次谐波电能的精确计量,可以作为电能合理公正计量计费的重要依据。

将原始信号进行频率成份精确预判断,以确定FFT的频率分辨率或小波分解层数,可以做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张 蓓. 谐波电能计量方法的研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
Zhang Bei. The Study of Metering Harmonic Energy in Electric Power System[D]. xi'an: Northwest University, 2007.
- [2] 李 聪. 利用电能质量监测装置实现谐波电能计量的一种方法[J]. 大众科技, 2008(12): 127-128.
Li Cong. A Method of Harmonic Power Measurement by Power Quality Monitoring Instrument[J]. Popular Science & Technology, 2008(12): 127-128.
- [3] 于晶荣, 滕召胜, 吴英军, 等. 电气化铁路的谐波电能

- 计量技术研究[J]. 计量学报, 2009, 30(3): 240-244.
Yu Jingrong, Teng Zhaosheng, Wu Yingjun, et al. Electrified Railway Harmonic Energy Metering Technology Research [J]. Acta Metrologica Sinica, 2009, 30(3): 240-244.
- [4] 芮国胜, 康 健. 小波与傅里叶分析基础[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 39-57.
Rui Guosheng, Kang Jian. Fundamental of Wavelet and Fourier Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 39-57.
- [5] 刘文松, 刘韶华, 王芸波. 谐波电能计量技术[J]. 中国电力教育, 2010(35): 255-257.
Liu Wensong, Liu Shaohua, Wang Yunbo. Harmonic Energy Measurement Technology[J]. China Electric Power Education, 2010(35): 255-257.
- [6] 于坤山, 周胜军, 王同勋, 等. 电气化铁路供电与电能计量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 154-166.
Yu Kunshan, Zhou Shengjun, Wang Tongxun, et al. Electrified Railway Power Supply and Electric Energy Measurement[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 154-166.
- [7] 曹惠敏. 电力系统谐波对电能计量影响的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
Cao Huimin. Harmonics Affection on Power Measurement Installation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [8] 梁玉娟, 李群湛, 赵丽平. 基于小波分析的电力系统谐波分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 67-70.
Liang Yujuan, Li Qunzhan, Zhao Liping. Power System Harmonic Analysis Based on Wavelet Analysis[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2003, 15(6): 67-70.

(责任编辑: 申 剑)