

基于旋转因子变换的频点能量插值谐波检测算法

王 泽, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: IEC 标准采用 10 周波组或子组算法来测量谐波和间谐波, 其缺陷是无法精确测量各分量的频率、幅值和相位参数, 且在非同步采样时有较大误差。通过对 IEC 标准下非同步采样的信号进行频域旋转因子变换, 根据变换后的频点能量分布, 从能量角度提出了基于旋转因子变换的频点能量插值算法, 消除了非关注分量对计算分量的旁瓣干涉, 实现了谐波、间谐波准确辨识和精确测量。仿真结果验证所提算法的有效性, 并具有优良的抗噪性能, 能满足 IEC 标准和工程测量要求。

关键词: 旋转因子变换; 频点能量插值; IEC 标准; 非同步采样; 离散傅立叶变换

A frequency point energy interpolation harmonic detection algorithm based on twiddle factor transform

WANG Ze, YANG Honggeng

(School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: IEC standard adopts 10 cycles' group or sub-group algorithms to measure harmonics and inter-harmonics, but it cannot accurately measure the frequency, amplitude and phase parameters of each component, and exists large errors with non-synchronous sampling. Through transforming the twiddle factor of signal in frequency domain with IEC standard and non-synchronous sampling, according to frequency point energy distribution, this paper proposes the method of frequency point energy interpolation based on twiddle factor transform, which eliminates the side lobe interference of calculation component came from non-attention components and achieves harmonic and inter-harmonics accurate identification and precise measurement. Simulation results verify that the proposed algorithm is effective and has eminent anti-noise performance, meeting the requirements of IEC standard and engineering measurement.

Key words: twiddle factor transform; frequency point energy interpolation; IEC standard; non-synchronous sampling; discrete Fourier transform (DFT)

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0067-05

0 引言

间谐波一直是影响供电质量优劣的一项重要指标, 随着高铁、新能源、风电、光伏发电和电动汽车等冲击性负荷的接入, 可从谐波、间谐波检测的角度去评估其对电网的影响^[1]。IEC标准规定了以离散傅立叶变换(discrete Fourier transform, DFT)和快速傅立叶变换(fast Fourier transform, FFT)作为数学工具来进行谐波、间谐波参数测量, 分析数据长度为10个基频周波^[2-3], 在基频同步采样时采用矩形窗, 非同步采样时采用Hanning窗。IEC算法采用的是谐波和间谐波组(Group)或子组(Sub-group)算法, 缺陷是无法精确测量某一分量的具体参数, 而对谐

波、间谐波的准确辨识和精确测量, 对后续的治理、责任划分以及电网安全运行等均具有重要影响。

传统的加窗插值及其改进算法多采用旁瓣性能优良的窗函数, 对抑制频谱旁瓣干涉有一定改善作用^[4-12], 但旁瓣衰减越大的窗函数主瓣越宽, 必须增加采样数据才能降低主瓣干涉影响, 无法满足测量实时性的要求。如何利用IEC标准规定的低性能窗(矩形窗或Hanning窗)在不增加采样数据的前提下提高检测精度成为本文的研究问题。文献[13]在解决这个问题上提出了奇数频点插值算法, 利用10周波矩形窗频域上3个频点处的频谱值进行插值处理, 改善了低性能窗在IEC标准下的测量精度, 但在非同步采样时或频率较密集时仍有较大的误差。

本文以满足 IEC 标准为前提, 根据加 Hanning 窗频点处的能量分布规律, 首次从频点能量的角度提出了基于旋转因子变换的频点能量插值算法。通过对旋转因子进行变换, 相邻频点能量叠加来消除非关注分量对计算分量的旁瓣干涉, 抑制频谱泄漏; 通过频点能量插值进行谐波、间谐波辨识和参数测量, 实现了 IEC 标准下非同步采样时谐波、间谐波参数的精确计算。仿真结果表明, 在 IEC 标准下, 所提的算法可以实现谐波、间谐波准确辨识和精确测量, 同时具有较强的抑制频谱泄漏能力和抗干扰性能。

1 频点能量分布

设电网离散采样信号为

$$g(n\Delta t)_N = \sum_{i=1}^M A_i \cos(2\pi f_i n\Delta t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: Δt 为单位采样间隔; M 为频率分量个数; f_i 、 A_i 、 φ_i 为对应的频率、幅值和相位; f_s 为采样频率; $n=0,1,\dots,N-1$; N 为采样窗口长度。

其任意频点 k 处的 DFT 谱分布为

$$X(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M A_i [W(k - \beta_i) e^{j\varphi_i} + W(k + \beta_i) e^{-j\varphi_i}] \quad (2)$$

式中: $\beta_i = f_i/\Delta f$, 频率分辨率 $\Delta f = f_s/N$, $k=0,1,\dots,N-1$; $W(\theta)$ 为窗谱, 对于 Hanning 窗

$$W(\theta) = e^{-j\frac{N-1}{N}\pi\theta} \frac{\sin(\pi\theta)}{2\pi\theta(1-\theta^2)} \quad (3)$$

将式(2)表示为

$$X(k_i) = \frac{A_i}{2} e^{j[\frac{N-1}{N}\pi(\beta_i - k_i) + \varphi_i]} [W(-\delta_i) + \Delta(k_i)] \quad (4)$$

式中: $\beta_i = k_i + \delta_i$, k_i 、 δ_i 为峰谱线处频点序号和频偏值, $\delta_i \in (-0.5, 0.5)$; $\Delta(k_i) = \sum_{m=0, m \neq i}^M \Delta(k_m)$ 为非关注分量在频点 k_i 处的旁瓣总泄漏值。

根据 Parseval 定理, 信号在时域和频域具有相等的能量, 频域上的能量分布在各频点处, 因此式(2)中每个频点均具有频谱能量, 定义在频点 k_i 处的频谱能量为

$$E(k_i) = [X(k_i)]^2 \quad (5)$$

式中, $X(k_i)$ 对应频点 k_i 处的频谱值, 为矢量, 因此 $E(k_i)$ 也是矢量, 即频域上各频点处的频谱能量具有矢量性, 频点能量大小分布示意图如图 1 所示。

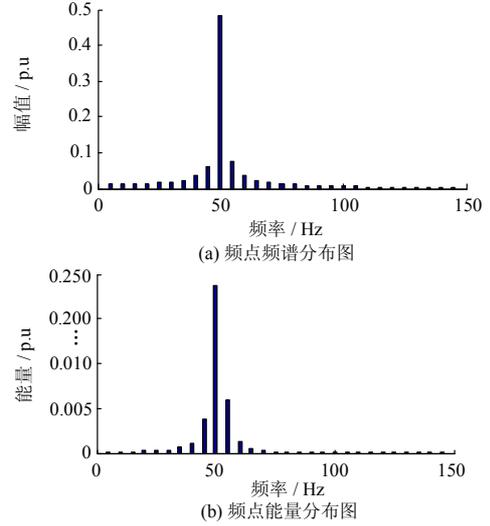


图 1 频点频谱和能量分布示意图

Fig. 1 Frequency point spectrum and energy distribution diagram

2 变换旋转因子消除旁瓣泄漏

式(4)中的旋转因子项 $e^{j[\frac{N-1}{N}\pi(\beta_i - k_i) + \varphi_i]}$ 只影响频点 k_i 处的相位值, 且随着频点 k_i 的位置不同而变化。为了消除不同频点处相位值的差异, 进行如式(6)旋转因子变换。

$$\bar{X}(k_i) = X(k_i) \cdot e^{j\frac{N-1}{N}\pi k_i} = \frac{A_i}{2} e^{j(\frac{N-1}{N}\pi\beta_i + \varphi_i)} [W(-\delta_i) + \bar{\Delta}(k_i)] \quad (6)$$

式(6)中主瓣内各频点相位相等, 旁瓣内相邻频点相位差为 180° ; $\bar{\Delta}(k_i) = \Delta(k_i) e^{j\frac{N-1}{N}\pi k_i}$ 为进行旋转因子变换后非关注分量在关注频点处的旁瓣泄漏叠加值, 各分量的旁瓣泄漏值具有幅值相近、相位相差 180° 等特性。

相邻频点处的频谱能量叠加值为

$$E(k_i) + E(k_i \pm 1) = \frac{A_i^2}{4} [|W(1 \pm \delta_i)|^2 + |W(\delta_i)|^2] e^{j2(\frac{N-1}{N}\pi\beta_i + \varphi_i)} + A_i \sum_{p=1}^1 [|W(\delta_i - p)| \bar{\Delta}(k_i + p)] e^{j(\frac{N-1}{N}\pi\beta_i + \varphi_i)} + [\bar{\Delta}(k_i \pm 1)]^2 + [\bar{\Delta}(k_i)]^2 \quad (7)$$

利用旋转因子变换后的旁瓣特性 $\bar{\Delta}(k_i) + \bar{\Delta}(k_i - 1) \ll \bar{\Delta}(k_i)$, 同时考虑到 $\bar{\Delta}(k_i)$ 较小, 有

$$\sum_{p=1}^1 [|W(\delta_i - p)| \bar{\Delta}(k_i + p)] \ll |W(\delta_i)| \bar{\Delta}(k_i) \quad (8)$$

$$[\bar{\Delta}(k_i)]^2 + [\bar{\Delta}(k_i \pm 1)]^2 \ll [\bar{\Delta}(k_i)]^2 \quad (9)$$

因此, 式(7)化简为

$$E(k_i) + E(k_i \pm 1) \approx \frac{A_i^2}{4} \sum_{p=-1}^1 \left[|W(p - \delta_i)|^2 \right] e^{j2(\frac{N-1}{N}\pi\beta_i + \varphi_i)} \quad (10)$$

式(10)表明, 可以利用关注频点及其左右相邻频点的频谱能量叠加来消除非关注分量在关注频点处的旁瓣泄漏。

3 频点能量插值

插值的目的是实现谐波、间谐波的准确辨识和参数精确测量, 考虑峰谱线对应的频点 k_i 及其左右频点 $k_i \pm 1$ 处的频谱值, 设比值系数为

$$r = \frac{|\bar{X}(k_i) + \bar{X}(k_i - 1)|}{|\bar{X}(k_i) + \bar{X}(k_i + 1)|} \approx \frac{|W(\delta_i)| + |W(1 + \delta_i)|}{|W(\delta_i)| + |W(1 - \delta_i)|} \quad (11)$$

根据 IEC 标准要求, 非同步采样时采用 10 周 Hanning 窗进行频谱分析, 将式(3)代入式(11)中解得频点 k_i 处的频率偏移值为

$$\delta_i = 2 \frac{|\bar{X}(k_i + 1)| - |\bar{X}(k_i - 1)|}{|\bar{X}(k_i - 1) + 2\bar{X}(k_i) + \bar{X}(k_i + 1)|} \quad (12)$$

则频率估计值为

$$f_i = \beta_i \Delta f = (k_i + \delta_i) \Delta f \quad (13)$$

根据式(10), 对于频点 k_i 、 $k_i \pm 1$ 处的频谱能量叠加值为

$$E(k_i - 1) + E(k_i) + E(k_i + 1) = \frac{A_i^2}{4} \left[|W(1 + \delta_i)|^2 + |W(\delta_i)|^2 + |W(1 - \delta_i)|^2 \right] e^{j2(\frac{N-1}{N}\pi\beta_i + \varphi_i)} \quad (14)$$

根据式(14), 对于非同步采样时加 Hanning 窗有

$$(A_i e^{j\varphi_i})^2 = K_i e^{-j\frac{N-1}{N}2\pi\beta_i} \cdot \sum_{d=-1}^1 \left[\bar{X}(k_i + d) \right]^2 \quad (15)$$

式中

$$K_i = \frac{16(1 - \delta_i^2)^2 (4 - \delta_i^2)^2}{3(2 + \delta_i^2)(4 + \delta_i^2) \sin^2 c^2(\delta_i)}, \quad \sin c(\delta_i) = \frac{\sin(\pi\delta_i)}{\pi\delta_i}.$$

因此, 幅值和相位估计值分别为

$$A_i = \sqrt{K_i \left| \sum_{d=-1}^1 \left[\bar{X}(k_i + d) \right]^2 \right|} \quad (16)$$

$$\varphi_i = \angle \left[\left(\sum_{d=-1}^1 \left[\bar{X}(k_i + d) \right]^2 \right) e^{-j\frac{N-1}{N}2\pi\beta_i} \right] \quad (17)$$

式中, 符号 \angle 表示返回角度值。

基于旋转因子变换的频点能量插值算法测量谐波、间谐波参数的公式为式(13)、式(16)、式(17), 适用于 IEC 标准下的 10 周波基频同步或非同步采样, 其检测流程图如图 2 所示。

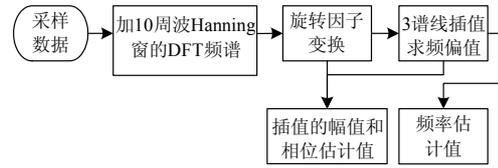


图 2 谐波间谐波测量流程图

Fig. 2 Flow chart of harmonics and inter-harmonics measurement

由上述理论分析可见, 基于旋转因子变换的频点能量插值算法通过旋转因子变换后相邻频点能量叠加的方式来消除非关注分量的旁瓣泄漏影响, 同时根据频点能量分布特性(图 1), 通过加 Hanning 窗来实现信号能量的聚集, 可以削弱噪声信号的干扰影响, 从而突显主要信号分量, 达到抗噪的目的。

4 数字仿真分析

设式(1)的电网离散采样信号包含表 1 所示的分量, 采样频率为 12.8 kHz, 分析窗口数为 10 周波, 对应频率分辨率为 5 Hz。

表 1 中的非同步采样信号包含基波、3 次谐波、5 次谐波以及 126.5 Hz、172.4 Hz 间谐波, 其中 3 次谐波不但受到非同步采样的影响, 同时也受其左右相邻间谐波(126.5 Hz 和 172.4 Hz)的频谱泄漏干扰, 10 周波加 Hanning 窗信号的频点能量分布如图 3 所示。

表 1 各分量参数

Table 1 Parameters of each component

	谐波参数			间谐波参数	
	频率/Hz	幅值/%	相位/ $^\circ$	126.5	172.4
频率/Hz	50.2	100.4	150.6	126.5	172.4
幅值/%	100	2	3	4	5
相位/ $^\circ$	10	20	30	40	50

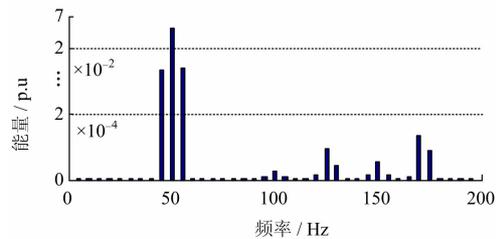


图 3 加 Hanning 窗信号频点能量分布图

Fig. 3 Signal frequency point energy distribution with Hanning window

将本文基于旋转因子变换的频点能量插值算法(方法 1)和奇数频点插值方法^[13](方法 2)、双谱线插值方法^[10](方法 3)及相位差插值算法^[12](方法 4)的检测结果进行对比, 各分量的频率、幅值和相位相对误差如表 2~表 4 所示。

表 2 频率检测相对误差

Table 2 Frequency detected relative errors

方法	谐波误差/%			间谐波误差/%	
1	-2.95e-07	1.23e-02	1.14e-02	3.23e-03	9.97e-04
2	-1.20e-04	-1.46e-01	-6.10e-02	-3.38e-02	-7.89e-03
3	1.21e-04	1.41e-02	-5.39e-02	7.06e-03	-1.43e-03
4	5.83e-05	5.21e-02	—	1.84e-02	1.45e+01

表 3 幅值检测相对误差

Table 3 Amplitude detected relative errors

方法	谐波误差/%			间谐波误差/%	
1	1.20e-05	3.67e-02	-1.54e-02	2.91e-02	1.21e-03
2	-6.74e-04	-2.50e-01	-4.78e-02	-3.91e-01	-1.33e-01
3	-5.31e-04	2.67e-02	1.90e-01	7.85e-02	8.59e-03
4	-5.03e-04	3.00	—	-1.15e-01	6.76e+01

表 4 相位检测相对误差

Table 4 Phase detected relative errors

方法	谐波误差/%			间谐波误差/%	
1	1.10e-06	-2.02e-02	-1.71e-02	-3.87e-03	-1.22e-03
2	9.00e-03	2.56e-01	1.06e-01	4.00e-02	9.47e-03
3	-5.79e-04	-3.71e-02	1.90e-02	-9.33e-03	-1.14e-03
4	-4.82e-04	-1.33e-01	—	-2.15e-02	6.64e-01

注：“—”表示不能检测。

分析表 2~表 4 的结果, 本文方法(方法 1)具有最均衡优良的性能, 不但能实现受干扰较大分量(如 3 次谐波)的准确辨识, 也能实现谐波、间谐波参数的精确测量, 测量精度比其他方法平均高 1~2 个数量级。方法 2 由于矩形窗的旁瓣衰减特性较差, 导致测量精度不高, 特别是在受干扰分量的幅值和相位测量上。方法 3 测量精度仅次于方法 1, 但在非同步采样时基波频率的测量上, 低于方法 1 约 3 个数量级精度。方法 4 通过两段时移信号谱线相位差来进行频域插值, 其模型的约束使 10 周波分析信号的频率分辨率 Δf 降到 10 Hz, 从而导致测量精度下降, 且无法辨识受干扰较大的分量(如 3 次谐波)。

为进一步验证算法的抗噪性能, 信号成分不变, 模拟噪声环境为叠加 10~100 dB 信噪比(signal noise ratio, SNR)的高斯白噪声信号, 进行 200 次蒙特卡洛实验, 得到不同噪声环境下各方法的测量误差变化趋势图。以受干扰最严重的 3 次谐波(150.6 Hz)为例, 其频率、幅值和相位误差变化如图 4 所示。

从图 4 看出, 在非同步采样条件下, 3 次谐波的频谱泄漏干扰主要来自非同步采样和邻近的间谐波分量, 本文的方法由于进行旋转因子变换, 并通过 3 个频点处的能量叠加消除了非关注分量的旁瓣泄漏影响, 相对其他方法具有较强的抑制频谱泄漏能力; 同时, 加 Hanning 窗的频点能量分布较聚集

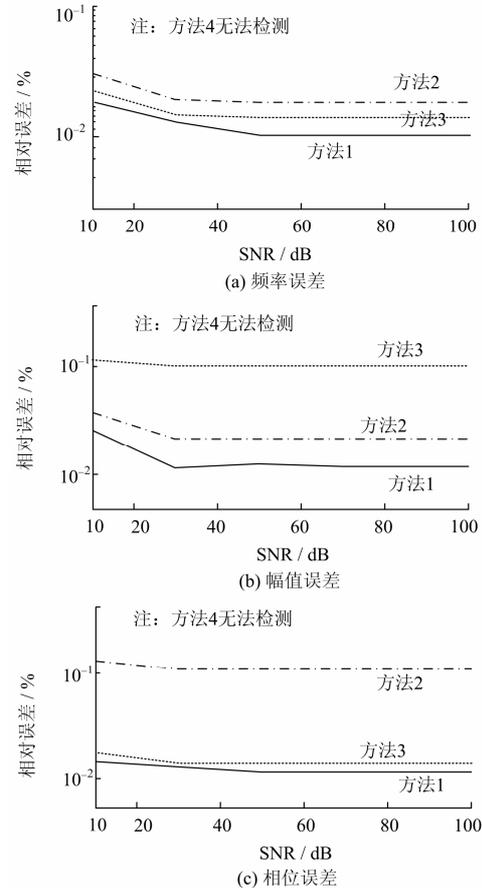


图 4 3 次谐波在噪声环境中的测量误差

Fig. 4 Measurement errors of 3rd harmonic in noise environment

(图 3 所示), 削弱了噪声能量, 从而提高了抗噪性能。

5 结论

本文对 IEC 标准测量环境中的谐波、间谐波准确辨识和精确测量问题进行了理论研究和仿真验证, 通过对 10 周波加 Hanning 窗的信号进行旋转因子变换, 3 个频点处的能量叠加插值以消除非关注分量的旁瓣泄漏影响, 从频点能量的角度提出了基于旋转因子变换的频点能量插值算法, 实现了 IEC 标准下非同步采样时谐波、间谐波准确辨识和参数的精确测量。仿真结果表明, 所提算法具有较强的抑制频谱泄漏能力和抗噪性能, 能满足 IEC 标准要求, 具有一定的工程运用价值。

参考文献

[1] 熊杰锋, 李群, 袁晓冬, 等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-133.

- XIONG Jiefeng, LI Qun, YUAN Xiaodong, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11):125-133.
- [2] International Electrotechnical Commission. IEC61000-4-7 general guide on harmonics and interharmonics measurements, for power supply systems and equipment connected thereto[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [3] Compatibility E part 4-30: testing and measurement techniques—power quality measurement methods[R]. IEC 61000-4-30 Std, 2003.
- [4] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.
HUANG Chun, ZHU Zhijun, CAO Yijia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.
- [5] 惠锦, 杨洪耕. 基于间谐波泄漏估算的谐波间谐波分离检测法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 183-190.
HUI Jin, YANG Honggeng. Harmonics and interharmonics separate-detection method based on estimation of leakage values caused by interharmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 183-190.
- [6] 罗蛟, 江亚群, 黄纯, 等. 基于 DRSC 窗递推 DFT 算法的电力谐波检测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 47-53.
LUO Jiao, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Power system harmonic parameters estimation based on recursive DFT algorithm with DRSC window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 47-53.
- [7] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.
WEN He, TENG Zhaosheng, WANG Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277.
- [8] 许珉, 杨阳, 章梦哲, 等. 一种加三项余弦窗的加窗插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 11-15.
XU Min, YANG Yang, ZHANG Mengzhe, et al. An interpolated FFT algorithm based on three-item cosine window[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 11-15.
- [9] HUANG S, FAN X, LIU S, et al. Research on optimized combined cosine windows with maximum side lobe decay for harmonic analysis[C] // Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009: 277-281.
- [10] 蒋春芳, 刘敏. 基于双插值 FFT 算法的间谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 11-14.
JIANG Chunfang, LIU Min. Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 11-14.
- [11] 任子晖, 付华科, 李伟冻, 等. 基于全相位傅里叶变换的煤矿电网电能质量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 103-107.
REN Zihui, FU Huake, LI Weiluo, et al. Analysis of power quality of coal mine gridbased on all-phase fast Fourier transform[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 103-107.
- [12] 贲树俊, 葛乃成, 沈晓钰. 基于相位差校正法的高精度电力谐波检测[J]. 电测与仪表, 2007, 44(494): 13-16.
BEN Shujun, GE Naicheng, SHEN Xiaowang. A high accuracy harmonic measurement in power system based on phase difference correcting methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(494): 13-16.
- [13] 惠锦, 杨洪耕. 用于谐波/间谐波分析的奇数频点插值修正法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 67-72.
HUI Jin, YANG Honggeng. An approach for harmonic/inter-harmonic analysis based on the odd point interpolation correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 67-72.

收稿日期: 2014-06-12; 修回日期: 2014-07-10

作者简介:

王泽(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电力谐波间谐波检测与评估方面的研究; Email: wangze2008scu@foxmail.com

杨洪耕(1949-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量及其控制技术的教学和研究工作。

(编辑 葛艳娜)