

# 基于 ESPRIT 的谐波和间谐波参数估计方法

牛卢璐

(鹤壁职业技术学院, 河南 鹤壁 466001)

**摘要:** 为了准确地获得信号中谐波、间谐波成分的频率和幅值等参数, 提出了一种新的检测算法, 即 ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)。此算法是一种基于子空间技术的高分辨率检测方法, 它把信号分解为信号子空间和噪声子空间, 能够精确地估计出被噪声污染的正弦信号的频率, 幅值等信息, 克服了传统 FFT 算法分辨率的限制。仿真结果表明此算法能够在较短的信号长度内准确检测出信号各个谐波和间谐波成分, 证明了此算法的正确性。

**关键词:** 谐波; 间谐波; 旋转不变技术参数估计; 奇异值分解; 快速傅立叶分解; 电能质量

## ESPRIT based method for harmonics and interharmonics parameters estimation

NIU Lu-lu

(Hebi College of Vocation and Technology, Hebi 466001, China)

**Abstract:** The ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) algorithm is adopted to estimate the parameters of harmonics and interharmonics in power systems accurately in this paper. The algorithm decomposes the signal into signal- and noise-subspaces and can estimate the frequencies and phases of the harmonics and interharmonics components of the signals corrupted by noises with high precision, and overcome the resolution limit of Fourier Transform. The individual harmonics and interharmonics components can be identified using ESPRIT exactly. Performance of this algorithm is presented and the results are compared with the FFT-based method. The results show the proposed method can exactly estimate the harmonics and interharmonics with much fewer sample data.

**Key words:** harmonics; interharmonics; estimation of signal parameters via rotational invariance techniques (ESPRIT); singular value decomposition; fast Fourier transform; power quality

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)09-0037-04

## 0 引言

电网中电力电子等非线性设备的大量使用, 使谐波对电网的污染越来越严重。谐波一般是指频率为工频(基波频率)整数倍次的信号成分, 而间谐波是指频率为基波频率非整数倍次的信号成分<sup>[1]</sup>。常见的间谐波源有电焊机, 电弧炉, 以及包含 AC/DC 或 DC/AC 变换器的各种电力电子设备, 如变频器、串级调速装置、直流输电装置等。谐波和间谐波控制不当会产生一系列的危害, 比如它们会使电动机噪声和振动增大, 增加损耗, 使仪器仪表不能正常工作, 降低滤波装置性能等等。因此有必要准确地检测谐波和间谐波的参数, 从而为谐波、间谐波的分析以及治理提供可靠依据。

为了准确检测谐波和间谐波, 人们做了大量的工作。FFT 算法及其改进算法<sup>[2]</sup>被广泛的应用于谐波分析。但是一般的基于 FFT 算法的频谱分辨率与信号的时间长度成正比, 为了增加频谱分辨率一般

需要增加采样数据窗长度。特别需要指出的是当有间谐波存在时很难实现同步采样, 由于非同步采样造成的频谱泄漏可能产生虚假的间谐波, 或者淹没真实的间谐波, 从而限制了其在精确检测间谐波方面的应用。小波变换<sup>[3]</sup>, 基于 SVD, Pisarenko 谐波分解, MUSIC, Prony 等现代谱估计方法<sup>[4~7]</sup>也被广泛地应用于谐波和间谐波的检测。

本文提出了一种基于子空间分解的高分辨率谐波和间谐波检测新方法, 即旋转不变技术参数估计<sup>[8,9]</sup> ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)。此方法可以高精度地辨识电力系统中任意组合的衰减/非衰减正弦信号的频率, 相位及其幅值等信息。它不需要对信号进行同步采样。此方法把信号空间分解为信号子空间和噪声子空间, 能够在较短的信号长度内准确检测出信号中各个谐波和间谐波成分。随着高速 DSP 的发展, 它在谐波检测方面有着良好的应用前景, 仿真结果验证了算法的有效性。

### 1 基于 ESPRIT 的谐波与间谐波检测原理

ESPRIT 被广泛应用于阵列信号, 语音信号处理<sup>[8~11]</sup>, 电力系统暂态信号分解等场合<sup>[12]</sup>。ESPRIT 避免了最大似然法、最大熵法和 MUSIC 方法等固有的、在整个频域上的搜索, 提高了计算效率。

采样电压/电流信号序列  $x(n)$  可以表示为  $K$  个复正弦分量与白噪声的和。在采样时刻  $n$ ,

$$x(n) = \sum_{k=1}^K a_k e^{j\phi_k} e^{(-\alpha_k + j2\pi f_k)nT_s} + w(n) \quad (1)$$

式中:  $k$  为求和变量;  $K$  为采样信号中复正弦分量的个数, 由于采样信号为实信号, 通常  $K$  为信号实际含有的实正弦分量个数的两倍;  $T_s$  为采样周期;

$a_k$ 、 $\phi_k$ 、 $\alpha_k$ 、 $f_k$  分别为第  $k$  次正弦分量的幅值、初始相位、衰减系数和频率, 当  $\alpha_k$  等于零时为无衰减的正弦信号, 否则为衰减的正弦信号;  $w$  为均值为零, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声;

$$\text{令 } s_k = a_k e^{j\phi_k}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$z_k = e^{(-\alpha_k + j2\pi f_k)T_s}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

式 (1) 可以简写为

$$x(n) = \sum_{k=1}^K s_k z_k^n + w(n) \quad (4)$$

定义矢量:

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n+1), \dots, x(n+M-1)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_M(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T, \quad M > K \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_M(z) = [\mathbf{v}_M(z_1), \mathbf{v}_M(z_2), \dots, \mathbf{v}_M(z_K)] \quad (7)$$

把式 (4), (6), (7) 代入式 (5) 有

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{k=1}^K s_k \mathbf{v}_M(z_k) z_k^n + w(n) = \mathbf{v}_M \Phi^n \mathbf{s} + w(n) \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_M \Phi^n \mathbf{s} + w(n) = \mathbf{S}(n) + w(n)$$

其中:  $\mathbf{w}(n) = [w(n), w(n+1), \dots, w(n+M-1)]^T$ ,

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T, \quad \mathbf{S}(n) = \mathbf{V}_M \Phi^n \mathbf{s}$$

$$\Phi = \text{diag}(z_1, \dots, z_K)$$

$$\text{记 } \mathbf{S}(n) = \begin{bmatrix} s_1 \\ \text{-----} \\ \text{最后一行} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{第一行} \\ \text{-----} \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{则 } \mathbf{S}_1 = \mathbf{V}_{M-1} \Phi^n \mathbf{s} = \mathbf{V}_1 \mathbf{s} \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{V}_{M-1} \Phi^{n+1} \mathbf{s} = \mathbf{V}_2 \mathbf{s} \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_M \Phi^n = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \text{-----} \\ \text{最后一行} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{第一行} \\ \text{-----} \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 \Phi \quad (13)$$

因为正弦分量的频率  $f_k$  和衰减系数  $\alpha_k$  完全决定了旋转矩阵  $\Phi$ , 谐波恢复的关键在于从采样序列中估计出旋转矩阵  $\Phi$ , 从而估计出信号中各个分量的频率  $f_k$  和衰减系数  $\alpha_k$ , 再进一步估计出幅值和相位等信息。下面分析如何根据采样序列来估计信号中各个分量的频率和衰减系数。

考察由采样序列  $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$  构成的数据矩阵  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(M+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(N-1) \end{pmatrix}$$

其中:  $M > K, L > P, M+L-1=N$

对数据矩阵  $\mathbf{X}$  进行奇异值分解 (SVD) 则有

$$\mathbf{X} = \mathbf{L} \Sigma \mathbf{U}^H \quad (14)$$

其中: 上标  $H$  表示共轭转置,  $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{U}$  分别是  $L \times L, M \times M$  维酉矩阵;  $\Sigma$  为  $L \times M$  的对角阵, 其主对角元素是矩阵  $\mathbf{X}$  的奇异值的降序排列;  $\mathbf{U}$  的列向量是数据矩阵  $\mathbf{X}$  的右特征向量。它可以分解为信号子空间  $\mathbf{U}_s$  和噪声子空间  $\mathbf{U}_n$ , 即  $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s | \mathbf{U}_n]$ 。  $\mathbf{U}_s$  的列向量为矩阵  $\mathbf{X}$  最大的  $K$  个奇异值对应的特征向量; 由于  $\mathbf{U}_s$  和  $\mathbf{V}_M$  张成相同的信号子空间, 所以存在可逆变换  $\mathbf{T}$ , 使得

$$\mathbf{V} = \mathbf{U}_s \mathbf{T} \quad (15)$$

令  $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$  分别为  $\mathbf{U}_s$  去掉最后一行, 去掉第 1 行得到的矩阵, 由 (15) 知亦有

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{U}_1 \mathbf{T}, \quad \mathbf{V}_2 = \mathbf{U}_2 \mathbf{T} \quad (16)$$

与式 (13) 类似, 存在  $\Psi$ , 使得

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_1 \Psi \quad (17)$$

比较式 (13)、(16)、(17) 知可以由  $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$  来估计  $\Psi$ , 进而估计  $\Phi$ 。由于  $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$  可以由数据矩阵分解得到, 故为已知量。我们可以构造矩阵的

$$\Psi = (\mathbf{U}_1^H \mathbf{U}_1)^{-1} (\mathbf{U}_2^H \mathbf{U}_2)$$

求得  $\Psi$  的特征值  $\lambda_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ), 从而可以估计出信号中正弦分量的频率与衰减系数

$$\hat{f}_k = \frac{\text{angle}(\lambda_k)}{2\pi T_s}, \hat{\alpha}_k = -\frac{\ln|\lambda_k|}{T_s}$$

在求得信号中各个正弦分量的频率和衰减系数后, 可以通过最小二乘法求得其他参数如幅值和初始相角。考察  $N$  个采样信号。令

$$\lambda = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_k^{N-1} \end{pmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix}$$

$$A = [A_1 \ A_2 \ \cdots \ A_k]$$

$$\text{有 } X = \lambda A$$

根据最小二乘法可得

$$A = (\lambda^H \lambda)^{-1} \lambda^H X \quad (18)$$

可以根据式 (18) 计算信号中各个分量的幅值和相位

$$a_k = 2|A_k|, \phi_k = \text{angle}(A_k)$$

## 2 仿真结果及分析

为了验证上述算法的准确性, 特设计了一系列的试验。

算例 1: 假设仿真信号 (不含噪声) 的表达式为

$$x(t) = 0.1\cos(2\pi \cdot 45t) + \cos(2\pi \cdot 50t) + 0.2\cos(2\pi \cdot 70t)$$

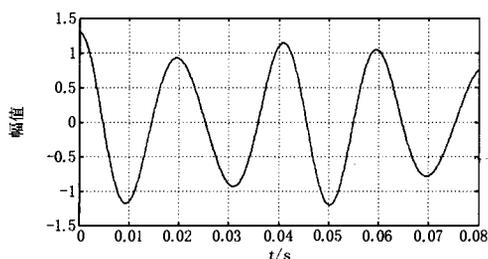


图 1 仿真信号波形

Fig.1 Waveform of the simulated signal

信号如图 1 所示, 信号除基波分量外还包括 45 Hz 和 70 Hz 两个间谐波分量。采样频率  $f_s = 10\ 000$  Hz

(下同)。图 2, 3 分别是信号长度为 0.02 s 时, 采用 FFT 算法和 ESPRIT 算法的估计结果。为了准确辨识 45 Hz 间谐波分量, 如果采用 FFT 算法, 理论上需要至少 10 个周期 (0.2 s) 的采样数据。从图 2 中我们可以发现, 由于数据窗宽度较短, FFT 算法不能有效的辨识出信号中的 45 Hz 和 75 Hz 间谐波分量。然而在相同的采样频率和信号长度条件下,

ESPRIT 算法只需要一个工频周期的数据 (0.02 s) 仍然能准确辨识出信号中的频率分量为 45 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 同时能准确估计出其幅值分别为 0.1, 1.0 和 0.2。算例表明 ESPRIT 算法能够使用较短的数据估计出信号中的谐波和间谐波成分, 比 FFT 算法具有更高的精度和频率分辨率。

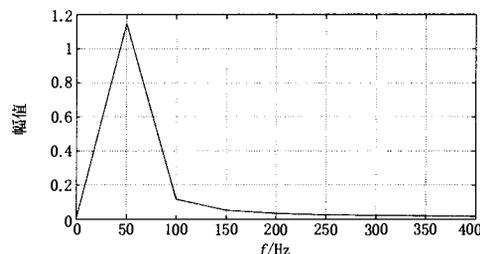


图 2 FFT 分析结果 ( $N=200$  采样点)

Fig.2 Analysis result using FFT method ( $N=200$  samples)

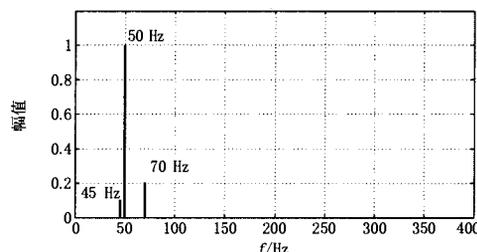


图 3 ESPRIT 分析结果 ( $N=200$  采样点)

Fig.3 Analysis result of ESPRIT method ( $N=200$  Samples)

算例 2: 为了验证算法在信号基波频率发生偏移, 含有多个谐波和间谐波分量且被噪声污染时的检测性能, 设仿真信号可以表示为

$$x = \cos(2\pi \cdot 49t) + 0.3\cos(2\pi \cdot 98t + 10^\circ) + 0.2\cos(2\pi \cdot 200t + 20^\circ) + 0.1\cos(2\pi \cdot 250t + 30^\circ) + 0.08\cos(2\pi \cdot 350t + 40^\circ) + w$$

其中:  $w$  为均值为 0, 方差为 0.01 的白噪声, 波形如图 4 所示。

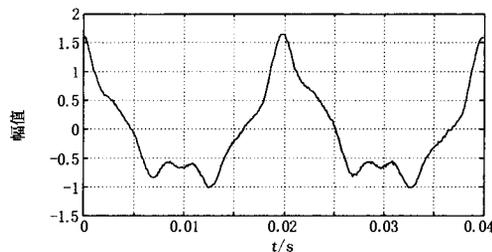


图 4 仿真信号波形

Fig.4 Waveform of the simulated signal

此信号的基波频率偏移到 49 Hz。当取信号长度为两个工频周期 (0.04 s) 时, FFT 算法和 ESPRIT 算法仿真结果如图 5, 6 所示。ESPRIT 算法估计的

频率和幅值如表 1。从图 5 可以看出,当系统频率发生偏移时,FFT 算法估计的信号基波分量为 50 Hz,不能准确辨识系统基波频率,也不能准确估计出其他各个谐波分量。从图 6 和表 1 可以发现在噪声条件下 ESPRIT 只需要比较少的采样数据,就能够比较准确地估计出信号中各个正弦分量的频率、幅值和相位。值得指出的是 ESPRIT 算法还能够准确的估计出系统的基波频率 49 Hz,为我们测量电力系统实际频率提供了一种新的方法。

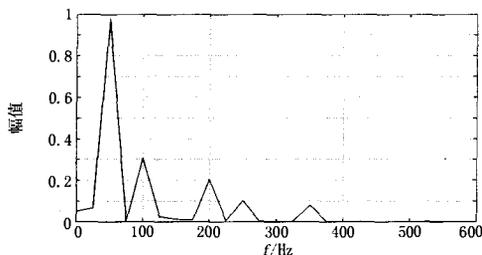


图 5 FFT 分析结果(N=400 采样点)

Fig.5 Analysis result using FFT method (N=400 采样点)

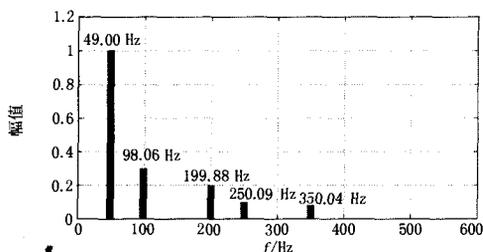


图 6 ESPRIT 分析结果(N=400)

Fig.6 Analysis result of ESPRIT method (N=400)

表 1 ESPRIT 方法与原始信号的比较

Tab.1 Comparison between ESPRIT method and original signals

信号成分编号	频率/Hz		幅值		相位/(°)	
	原始信号	ESPRIT 估计	原始信号	ESPRIT 估计	原始信号	ESPRIT 估计
1	49	49.00	1.0	1.001	0	0.104
2	98	98.06	0.3	0.299	10	10.000
3	200	199.88	0.2	0.199	20	20.123
4	250	250.09	0.1	0.098	30	30.245
5	350	350.04	0.08	0.080	40	40.692

### 3 结论

谐波和间谐波参数的准确估计对谐波补偿装置的设计,谐波的治理有重要的作用。本文提出了基于 ESPRIT 的谐波和间谐波检测算法,此算法能够在较短的数据长度内准确估计信号中各个谐波和间谐波分量的频率,幅值等信息,能够比较准确的估计出系统的基波频率,有较强的抗噪声的能力。仿真表明在相同的采样频率和信号长度条件下

ESPRIT 算法比 FFT 算法有更高的频率分辨率,能够比较准确辨识出信号中的谐波分量和间谐波分量。随着 DSP 运算性能的提高,ESPRIT 在高精度谐波和间谐波检测,系统频率检测方面有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001, 18(3):6-9.  
LIN Hai-xue. Interharmonics in Electrical Power System [J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(3):6-9.
- [2] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.  
ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CESS,1999,19(3):63-66.
- [3] 任震,黄群古,黄雯莹,等. 基于多频带小波变换的电力系统谐波分析新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 38-41,46.  
REN Zhen, HUANG Qun-gu, HUANG Wen-ying, et al. New Method s of Power System Harmonic Analysis Based on Wavelet Transform with Multi-frequency Band [J]. Proceedings of the CESS, 2000, 20(12): 38-41, 46.
- [4] 王志群,朱守真,周双喜. 基于 Pisarenko 谐波分解的间谐波估计算法[J]. 电网技术,2004,28(15):72-77.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Inter-harmonics Estimation by Pisarenko Harmonic Decomposition Method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 72-77.
- [5] 石敏,吴正国,尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. 电网技术, 2005, 29(15):81-84.  
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-harmonic Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. Power System Technology, 2005, 29(15):81-84.
- [6] 马秉伟,周莉,刁均伟. 基于现代谱估计方法的间谐波检测[J]. 继电器, 2005, 33(3):25-27.  
MA Bing-wei, ZHOU Li, DIAO Jun-wei. Interharmonics Measurement Using Modern Spectral Estimation Method[J]. Relay, 2005, 33(3):25-27.
- [7] Lobos T, Leonowicz Z, Rezmer J, et al. High-resolution Spectrum-estimation Methods for Signal Analysis in Power Systems [J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 2006, 55(1): 219-225.
- [8] Roy R, Paulraj A, Kailath T. ESPRIT--A Subspace Rotation Approach to Estimation of Parameters of Cisoids in Noise[J]. IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Process, 1986, 34(5) :1340-1342.

(下转第 51 页 continued on page 51)

大, 离散程度就越大。这是符合客观规律的。

## 5 结论

本文开发了一个基于 DSP 和智能功率模块的变频恒流信号源, 该装置实际用于应用注入法检测配网的对地电容。论述了该信号源的设计原理、要求

与控制方法, 并对该装置可能引起的误差进行了理论分析。经过对各种工作状况下的仿真与实验研究, 结果表明所设计的变频恒流信号源具有较高的精度, 完全符合设计要求, 为将来应用注入法检测配网对地电容奠定了坚实的基础。

表 1 各个频率点上采样数据的处理结果

Tab.1 Data of the sampled frequency

设定频率值	实际频率平均值	偏差	反应离散程度	均方差	标准偏差
10	9.990 938	-0.009 1	0.034 952 591	0.019 547	0.036 099
30	29.995 63	-0.004 4	0.109 770 713	0.192 794	0.113 371
40	40.050 63	0.0506 3	0.124 923 414	0.249 694	0.129 02

## 参考文献

- [1] 要焕年, 等. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
YAO Huan-nian, et al. Resonant Grounding in the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 曾祥君, 等. 基于注入变频信号法的消弧线圈接地系统控制与保护新方法[I]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 31-36.  
ZENG Xiang-jun, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequent Current[I]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 31-36.
- [3] 王崇林. 中性点接地方式与消弧线圈[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.  
WANG Chong-lin. Neutral Grounding and Arc Suppression Coil[I]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [4] 蔡旭, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 53-56.  
CAI Xu, LIU Jie. Dynamic Resonance Adjusting Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 53-56.
- [5] 李景禄, 等. 配电网自动跟踪补偿消弧装置[J]. 变压器, 2000, 37(10): 33-37.  
LI Jing-lu, et al. Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus Used for Distribution Networks[J]. Transformer, 2000, 37(10): 33-37.
- [6] 李玲玲, 等. 消弧电抗器自动跟踪的调谐技术[J]. 低压电器, 2003.  
LI Ling-ling, et al. Technology of Automatic Tuning for Arc-Extinguishing Reactor[J]. Low Voltage Electric, 2003.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.  
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation(2nd Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [8] 徐明远, 邵玉斌. MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.  
XU Ming-yuan, SHAO Yu-bin. Application of MATLAB Simulation on Communication and Electronics Engineer[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.

收稿日期: 2006-11-18; 修回日期: 2006-12-21

作者简介:

李毅敏(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线检测与配网自动化; E-mail: carrot2004@sjtu.edu.cn

蔡旭(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 配网安全与电力电子、电能质量控制与用户电力、配网自动化与保护。

(上接第 40 页 continued from page 40)

- [9] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques [J]. IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Process, 1989, 37(7):984-995.
- [10] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
ZHANG Xian-da. Modern Signal Processing, Second Edition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [11] Manolakis D G, Ingle V K, Kogon S M. Statistical and Adaptive Signal Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [12] Bollen M H J, Styvaktakis E, Gu I Y H. Categorization and Analysis of Power System Transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3):2298-2306.

收稿日期: 2006-10-22; 修回日期: 2006-12-23

作者简介:

牛卢璐(1981-), 女, 讲师, 主要从事电能质量, 信号处理, 机电一体化方面的教学和研究工作。E-mail: niululunl@gmail.com