

## 一种加三项余弦窗的加窗插值 FFT 算法

许珉<sup>1</sup>, 杨阳<sup>1</sup>, 章梦哲<sup>1</sup>, 董青峰<sup>2</sup>, 白春涛<sup>3</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 澠池县电业局, 河南 澠池 472400;  
3. 开封供电公司, 河南 开封 475001)

**摘要:** 提出了一种基于三项余弦窗 exact Blackman 窗的插值 FFT 算法。讨论了 exact Blackman 窗的频率响应, 详细推导了基于 exact Blackman 窗的插值 FFT 算法的计算公式, 并采用三次样条插值函数计算频率修正系数和复振幅的修正系数。仿真计算结果表明, 利用三次样条函数计算的谐波幅值误差小于 0.1%, 频率误差小于 0.01 Hz, 相位误差小于 5%。新的插值 FFT 算法能够有效地提高电力系统谐波的测量精度, 与其他四项余弦窗加窗插值 FFT 算法相比, 具有较小的运算量和较好的实时性。

**关键词:** 电力系统谐波; exact Blackman 窗; 插值 FFT 算法; 频谱泄漏; 三次样条函数

### An interpolated FFT algorithm based on three-item cosine window

XU Min<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, ZHANG Meng-zhe<sup>1</sup>, DONG Qin-feng<sup>2</sup>, BAI Chun-tao<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Mianchi Electric Power Bureau, Mianchi 472400, China; 3. Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** An interpolated FFT algorithm based on the trinomial cosine exact Blackman window is proposed. This paper first discusses the frequency response of the exact Blackman window, then derives the formulas of interpolated FFT algorithm based on the exact Blackman window in detail. The cubic spline function is used to calculate correction factors for frequency and complex amplitude. Simulation results demonstrate that by using the cubic spline function, the amplitude error is less than 0.1%, the frequency error is less than 0.01Hz, and the phase error is less than 5%. The new interpolated FFT algorithm proposed in this paper can effectively enhance the measuring accuracy of power system harmonics. It has a good real-time performance with less calculations compared with other interpolated FFT algorithms based on quadrinomial cosine window.

**Key words:** power system harmonics; exact Blackman window; interpolated FFT algorithm; spectrum leakage; cubic spline function

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0011-05

## 0 引言

用 FFT 进行电力系统谐波计算时, 必须将无限长的周期电压和电流信号截断, 这必然产生频谱泄漏现象。当采样频率不等于电网基波频率的整倍数时, 截取的信号长度不是整周期的, 信号离散频谱点上对应的是泄漏的频谱<sup>[1-3]</sup>, 使得计算的谐波幅值、相位有误差, 尤其是相位误差很大, 无法满足准确的谐波测量要求。为了消除电网频率变化对谐波测量的影响, 可以采用硬件锁相环电路或测频调整采样定时器时间常数实现同步采样, 也可以采用插值 FFT 算法<sup>[4-9]</sup>和其他改进算法<sup>[9-11]</sup>。加窗插值 FFT 算法, 是一种异步采样方法, 它是以固定不变的采样频率对信号进行采样, 利用窗函数截断信号时产生的泄漏频谱来得到信号的实际频谱值, 可以减小异步采样引起的误差。但是, 截断信号时使用的窗

函数不同, 其频谱泄漏对计算结果的影响也不同。泄漏的频谱主瓣主要影响主谱附近谐波分量的计算精度, 旁瓣可能影响基波和所有高次谐波分量的计算精度。文献中常见的加窗插值 FFT 算法有加汉宁窗插值 FFT 算法和加 Blackman-harris 窗插值 FFT 算法。汉宁窗主瓣窄 ( $4\pi/N$ ), 但旁瓣峰值较大, 为 -31dB, Blackman-harris 窗<sup>[12]</sup>虽主瓣宽 ( $8\pi/N$ ), 但旁瓣峰值很小, 只有 -92 dB。加两项余弦窗汉宁窗截断的正弦信号的频谱泄漏主瓣的宽度为 4 个谱线间隔, 相邻两频谱主谱线间隔 2 个谱线间隔, 要分辨出相邻的谐波 (消除主瓣的影响), 加汉宁窗插值 FFT 算法至少需 2 个周期的采样点, 考虑到频率的变化, 要获得较高的计算精度, 至少需 3 个周期的采样点; 加四项余弦窗 Blackman-harris 窗截断的正弦信号的频谱泄漏主瓣的宽度为 8 个谱线间隔, 相邻两频谱主谱线间隔 4 个谱线间隔, 要分辨出相邻的谐波 (消除

主瓣的影响), 加 Blackman-harris 窗插值 FFT 算法至少需 4 个周期的采样点, 考虑到频率的变化, 要获得较高的计算精度, 至少需 5 个周期的采样点; 本文提出了一种加三项余弦窗<sup>[13]</sup> (exact Blackman) 的插值 FFT 算法, 窗函数主瓣宽  $6\pi / N$ , 旁瓣峰值约 -70 dB, 要分辨出相邻的谐波并获得较高的计算精度, 只需 4 个周期的采样点, 计算精度比加汉宁窗插值 FFT 算法高, 截取的采样周期数比加 Blackman-harris 窗少, 可以提高谐波分析的计算精度和计算速度。

### 1 exact Blackman 窗的特性

本文采用的 exact Blackman 窗函数实际上是一种三项余弦窗, 余弦窗的一般表达式如下:

$$w_i(n) = \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \cos\left(\frac{2\pi}{N} in\right) \quad n=0, 1, \dots, N-1$$

式中:  $K$  为余弦窗的项数,  $K=1$ , 即  $a_0=0.5$ ,  $a_1=0.5$  时为汉宁窗;  $K=3$ , 即  $a_0=0.35875$ ,  $a_1=0.48829$ ,  $a_2=0.14128$ ,  $a_3=0.01168$  时为 Blackman-harris 窗, 其频谱如图 1 所示;  $K=2$ , 即  $a_0=7938/18608$ ;  $a_1=9240/18608$ ;  $a_2=1430/18608$  时为三项余弦窗 exact Blackman 窗, 其频谱如图 1 所示。

三项余弦窗 exact Blackman 窗的能量更集中, 其旁瓣峰值约 -70 dB, 虽比 Blackman-harris 窗的旁瓣峰值大, 但比 Hanning 窗的旁瓣峰值小, 采用三项余弦窗窗截断信号, 可以获得较高的计算精度。由于加 exact Blackman 窗截断信号的频谱泄漏主瓣的宽度为 6 个谱线间隔, 为了消除主瓣影响, 需要多于 3 个周期的采样点。考虑到频率的变化和计算精度及速度, 加 exact Blackman 窗插值 FFT 算法采用 4 个周期的采样点便可满足要求。

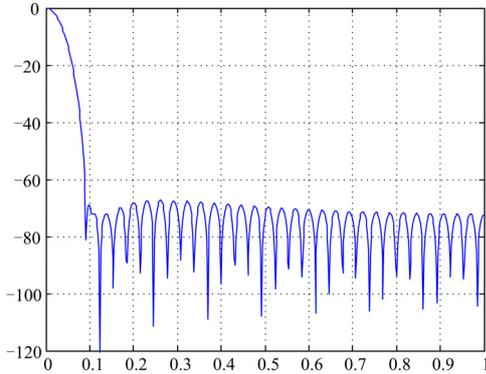


图 1 exact Blackman 窗的频谱

Fig.1 Frequency response of the exact Blackman window

### 2 加 exact Blackman 窗的插值 FFT 算法

下面以单频率信号为例进行分析, 设

$$x(t) = A_m e^{j2\pi f_t t}$$

复振幅  $A_m$  一般为复数, 反映了初相角; 实际频率  $f_t = (l+r)F$ , 它在频率  $l \times F$  和  $(l+1) \times F$  之间;  $l$  为整数; 其中频率分辨率  $F = 1 / (NT_s)$ ;  $T_s$  为采样时间间隔;  $r$  为频率偏移量,  $0 < r < 1$ 。  $x(t)$  的离散形式为

$$x(n) = A_m e^{j2\pi f_t n T_s} R_N(n) = A_m e^{j2\pi(l+r)n/N} R_N(n)$$

其 DFT 为

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_m e^{-j\frac{2\pi}{N}(k-l-r)n} =$$

$$A_m \frac{\sin[(k-l-r)\pi]}{N \sin[\frac{(k-l-r)\pi}{N}]} e^{-j(k-l-r)\pi \frac{N-1}{N}}$$

离散信号加余弦窗的 DFT 为

$$X_i(k) = \text{DFT}[x(n)w_i[n]] =$$

$$\text{DFT}\{x(n) \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \cos\left(\frac{2\pi}{N} in\right)\} \approx$$

$$\text{DFT}\left\{\frac{A_m}{2} \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \left[e^{j\frac{2\pi}{N}(l+r+i)n} +$$

$$e^{-j\frac{2\pi}{N}(l-r+i)n}\right]\} =$$

$$\frac{A_m}{2} \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \left\{ \frac{\sin[(k-l-r+i)\pi]}{N \sin[\frac{(k-l-r+i)\pi}{N}]} \cdot$$

$$e^{-j(k-l-r+i)\pi \frac{N-1}{N}} + \frac{\sin[(k-l-r-i)\pi]}{N \sin[\frac{(k-l-r-i)\pi}{N}]} \cdot$$

$$e^{-j(k-l-r-i)\pi \frac{N-1}{N}} \right\}$$

当  $k=l$  时有

$$X_i(l) = \frac{A_m}{2} \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \left\{ \frac{\sin[(-r+i)\pi]}{N \sin[\frac{(-r+i)\pi}{N}]} \cdot$$

$$e^{-j(-r+i)\pi \frac{N-1}{N}} + \frac{\sin[(-r-i)\pi]}{N \sin[\frac{(-r-i)\pi}{N}]} \cdot e^{-j(-r-i)\pi \frac{N-1}{N}} \right\}$$

当  $N \gg 1$  时, 以下近似关系成立

$$\frac{N-1}{N} \approx 1 \quad \text{和} \quad \sin \frac{\theta}{N} \approx \frac{\theta}{N}$$

并考虑到  $e^{\pm j\pi} = -1$ ,  $e^{\pm j2\pi} = 1$ , 当  $K=2$  时, 可以得到加余弦窗 DFT 的通用形式:

$$X_i(l) = 0.5A_m \left\{ 2a_0 \frac{\sin(r\pi)}{r\pi} e^{jr\pi} - a_1 \left[ \frac{\sin(r\pi)}{(1-r)\pi} e^{-j(1-r)\pi} - \frac{\sin(r\pi)}{(1+r)\pi} e^{j(1+r)\pi} \right] + a_2 \left[ -\frac{\sin(r\pi)}{(2-r)\pi} e^{-j(2-r)\pi} + \frac{\sin(r\pi)}{(2+r)\pi} e^{j(2+r)\pi} \right] \right\}$$

将 $a_0=7\ 938 / 18\ 608$ ;  $a_1=9\ 240 / 18\ 608$ ;  $a_2=1\ 430 / 18\ 608$ 代入化简可得加exact Blackman 窗截断后信号的频谱:

$$X_H(l) = A_m \frac{\sin(r\pi)}{\pi} e^{jr\pi} \times \frac{1}{r(r^2-1)(r^2-4)} \times (0.00687876182287r^4 - 0.22355975924334r^2 + 1.70636285468616) \quad (1)$$

同理, 当 $k=l+1$ 时有

$$X_H(l+1) = A_m \frac{\sin(r\pi)}{\pi} e^{jr\pi} \frac{1}{r(1-r^2)(2-r)(3-r)} \times (-0.00687876182287r^4 + 0.02751504729149r^3 + 0.18228718830610r^2 - 0.41960447119518r - 1.48968185726569)$$

设定幅值比为:

$$\alpha = \frac{|X_H(l+1)|}{|X_H(l)|} = (-0.00687876182287r^4 + 0.02751504729149r^3 + 0.18228718830610r^2 - 0.41960447119518r - 1.48968185726569)(r+2) / [(r-3)(0.00687876182287r^4 - 0.22355975924334r^2 + 1.70636285468616)] \quad (2)$$

由于频率偏移量 $r$ 的变化范围为:  $0 \sim 1$ , 故幅值

比 $\alpha$ 的变化范围为:  $0.582 \sim 1.718$ 。

由式(2)可解出 $r$ , 将 $r$ 代入式(1)即可得到修正的复振幅 $A_m$ 。第 $l$ 次谐波的相位按下式计算

$$\varphi_m = \text{angle}[X_H(l)] - r\pi$$

利用FFT插值算法还可以计算频率, 由 $r$ 可以得到第 $l$ 次谐波的频率为

$$f_r = (l+r)F$$

### 3 模拟分析结果

本文提出的插值算法的幅值比 $\alpha$ 是频率偏移量 $r$ 的四次多项式, 根据幅值比 $\alpha$ 求 $r$ , 需要解高次方程, 计算量虽比加Blackman-harris窗插值FFT算法小, 但计算量仍然较大。由于该方程只有一个实根位于 $[0, 1]$ 区间, 为了减小计算量, 本文利用Matlab的三次样条插值函数spline计算频率偏移量 $r$ , 不需要解高次方程, 减小了计算量, 降低了计算的复杂程度。另外, 单调变化的复振幅 $A_m$ 的计算也可以采用三次样条插值函数计算<sup>[14-15]</sup>, 这样就进一步提高了加三项余弦窗插值FFT算法的计算速度, 可以满足实际测量的需要。

如果以固定不变的采样频率1 600 Hz对含有高次谐波的电压信号进行采样, 每周期采样点数为32点, 电压的离散采样值为:

$$u(k) = 380\cos(2\pi \cdot f / 1600k + 5\pi / 180) + 20 \cdot \cos(2\pi \cdot 2f / 1600k + 10\pi / 180) + 60\cos(2\pi \cdot 3f / 1600k - 15\pi / 180) + 15\cos(2\pi \cdot 4f / 1600k + 20\pi / 180) + 15\cos(2\pi \cdot 5f / 1600k + 25\pi / 180)$$

表 1 幅值计算结果

Tab. 1 The calculated result of amplitudes

谐波	频率	50.2 Hz	50.1 Hz	49.9 Hz	49.8 Hz
	计算值	50.198 051 743 446 81	50.099 000 575 654 20	49.899 123 376 159 60	49.798 381 106 936 48
基波	幅值	380.021 841 099 301	380.011 353 929 835 9	379.989 277 766 692 3	379.980 529 075 029 9
	误差/%	-0.005 747 657 710 79	-0.002 987 876 272 60	0.002 821 640 344 12	0.005 123 927 623 71
2次谐波	幅值	20.017 904 760 779 13	20.009 650 776 713 84	19.990 429 287 400 15	19.982 341 470 461 34
	误差/%	-0.089 523 803 895 66	-0.048 253 883 569 18	0.047 853 562 999 23	0.088 292 647 693 29
3次谐波	幅值	60.007 695 633 424 87	60.004 176 135 908 45	59.996 579 442 233 94	59.994 974 365 483 29
	误差/%	-0.012 826 055 708 12	-0.006 960 226 514 07	0.005 700 929 610 09	0.008 376 057 527 85
4次谐波	幅值	15.005 355 222 343 63	15.003 269 170 526 50	14.996 863 702 069 76	14.995 105 212 756 35
	误差/%	-0.035 701 482 290 86	-0.021 794 470 176 66	0.020 908 652 868 27	0.032 631 914 957 67
5次谐波	幅值	15.003 832 067 358 27	15.002 386 601 454 63	14.998 069 217 874 60	14.997 697 523 386 58
	误差/%	-0.025 547 115 721 79	-0.015 910 676 364 20	0.012 871 880 836 02	0.015 349 844 089 46

如果用三项余弦窗截断 4 个周期，采样点数为 128 点，采用插值 FFT 算法计算基波及谐波的幅值和相位，计算结果见表 1 和表 2。

分析表 1 和表 2 的结果可以看出：在异步采样 4 个周期的情况下，加三项余弦窗插值 FFT 算法具

有较高的计算精度，幅值相对误差小于 0.1%，相位相对误差小于 5%，较同样截断周期数的加汉宁窗插值 FFT 算法和加 Blackman-harris 窗插值 FFT 算法精度高，适合于电力系统谐波的高精度测量。

表 2 相位计算结果

Tab.2 The calculated result of phases

谐波	频率	50.2 Hz	50.1 Hz	49.9 Hz	49.8 Hz
	计算值	50.198 051 743 446 81	50.099 000 575 654 20	49.899 123 376 159 60	49.798 381 106 936 48
基波	相位	5.027 532 991 159 87	5.014 176 310 014 23	5.012 407 529 394 52	5.023 028 293 966 15
	误差/%	-0.550 659 823 197 36	-0.283 526 200 284 57	-0.248 150 587 890 45	-0.460 565 879 322 98
2 次谐波	相位	10.502 287 130 441 93	10.268 783 166 392 14	10.013 991 636 062 77	10.012 400 026 255 93
	误差/%	-3.022 871 304 419 32	-2.687 831 663 921 40	-0.139 916 360 627 69	-0.124 000 262 559 32
3 次谐波	相位	-14.925 628 877 388 6	-14.960 281 076 905 7	-14.974 837 605 199 1	59.994 974 365 483 29
	误差/%	0.495 807 484 075 83	0.264 792 820 628 29	0.167 749 298 672 31	0.008 376 057 527 85
4 次谐波	相位	20.225 886 304 900 63	20.133 571 836 779 76	20.015 906 386 219 74	20.004 765 065 044 92
	误差/%	-1.129 431 524 503 15	-0.667 859 183 898 77	-0.079 531 931 098 70	-0.023 825 325 224 61
5 次谐波	相位	25.117 325 140 957 97	25.069 259 191 018 46	25.024 983 584 449 90	25.015 695 035 181 18
	误差/%	-0.469 300 563 831 88	-0.277 036 764 073 84	-0.099 934 337 799 60	-0.062 780 140 724 73

### 4 结论

本文提出的基于三项余弦窗 exact Blackman 窗的插值 FFT 算法应用于电力系统谐波测量时具有精度高，所用采样周期少的优点，与其他四项余弦窗加窗插值 FFT 算法相比，具有较小的运算量和较好的实时性。

### 参考文献

[1] Jain Vijay K, Collins Willim L. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT[J]. IEEE Trans IM, 1979, 28 (2) : 113-122.

[2] Grandke Tomas. Interpolation algorithms for discrete Fourier transform of weighed signals[J]. IEEE Trans IM, 1983, 32 (2): 350-355.

[3] 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 CSEE, 1999, 19 (3): 63-66.

[4] 潘文, 钱俞寿, 周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论 (I) 窗函数研究[J]. 电工技术学报, 1994, 9 (1) : 50-54.

PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT (I) study of windows[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 1994, 9 (1) : 50-54.

[5] 潘文, 钱俞寿, 周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论 (II) 双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报, 1994, 9 (2) : 53-56.

PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT (II) dualinterpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9 (2) : 53-56.

[6] 祁才君, 陈隆道, 王小海. 应用插值 FFT 算法精确估计电网谐波参数[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2003, 37 (1) : 112-116.

QI Cai-jun , CHEN Long-dao , WANG Xiao-hai. High-accuracy estimation of electrical harmonic parameters by using the interpolated FFT algorithm[J]. Journal of Zhejiang University : Engineering Science, 2003, 37 (1) : 112-116.

[7] 薛蕙, 杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (12) : 106-110.

XUE Hui, YANG Ren-gang. Precise algorithms for harmonic analysis based on FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (12) : 106-110.

[8] 柴旭峥, 文习山, 关根志, 等. 一种高精度的电力系统谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (9) : 67-70.

CHAI Xu-zheng, WEN Xi-shan, GUAN Gen-zhi, et al. An algorithm with high accuracy for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9) : 67-70.

[9] 张介秋, 梁昌洪, 陈砚圃. 基于卷积窗的电力系统谐

- 波理论分析与算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11): 48-52.  
ZHANG Jie-qi, LIANG Chang-hong, CHEN Yan-pu. Power system harmonic theory analysis and algorithm based on convolution window[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (11): 48-52.
- [10] 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 Ya-qun. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 26-31.
- [11] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 50-54.  
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 50-54.
- [12] 赵文春, 马伟明, 胡安. 电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12): 83-87.  
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (12): 83-87.
- [13] Andria G, Savino M, Trotta A. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy[J]. IEEE Trans IM, 1989, 38 (4): 856-863.
- [14] 孙同明, 许珉, 杨育霞. 应用三次样条函数快速计算插值FFT算法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6): 60-62.  
SUN Tong-ming, XU Min, YANG Yu-xia. Fast calculation of interpolated FFT algorithm using cubic spline function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6): 60-62.
- [15] Kincaid D, Cheney W. 数值分析[M]. 王国荣, 俞耀明, 徐兆亮, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Kincaid D, Cheney W. Numerical analysis[M]. WANG Guo-rong, YU Yao-ming, XU Zhao-liang, Trans. Beijing: China Machine Press, 2005.

---

收稿日期: 2009-09-22

作者简介:

许珉 (1956-), 男, 教授, 从事电气设备故障诊断及信号处理在电气工程中的应用研究. E-mail: xumin@zzu.edu.cn

---

(上接第 10 页 continued from page 10)

- [9] 张晓东, 王加璇, 高波. 关于汽轮发电机组热经济学边际成本的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 140-144.  
ZHANG Xiao-dong, WANG Jia-xuan, GAO Bo. A study on the thermoeconomic marginal costs of steam turbo-generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 140-144.
- [10] Yu C W, David A K. Pricing transmission services in the context of industry deregulation[R]. 96WM 321-0 PWRS6.
- [11] Caramanis M C, Roukos N, Schweppe F C. WRATES: a tool for evaluating the marginal cost of wheeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (2): 594-605.
- [12] Rudnick H, Plama R, Fernandez J E. Marginal pricing and supplement cost allocation in transmission open access [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (2): 1125-1142.
- [13] 言茂松, 辛洁晴. 在电力市场环境下网嵌入的边际成本输电定价新方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (2): 111-116.  
YAN Mao-song, XIN Jie-qing. Grid embedded marginal-cost transmission pricing (GEMP) in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (2): 111-116.
- [14] 平狄克, 鲁宾费尔德. 微观经济学[M]. 四版. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.  
Pindyck R S, Rubinfeld D L. Microeconomics[M]. Fourth edition. Beijing: China Renmin University Press, 2000.
- [15] 杜松怀, 温步瀛, 蒋传文. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
DU Song-huai, WEN Bu-ying, JIANG Chuan-wen. Electricity market[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] 张扬, 武亚光, 张志刚, 等. 电力市场中考虑安全校核的发电计划生成策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 6-8.  
ZHANG Yang, WU Ya-guang, ZHANG Zhi-gang, et al. Strategy of the security constrained generation scheduling for electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 6-8.

---

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

钱程 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: spirit04081005@163.com

鲍海 (1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力系统运行、分析与控制的研究工作。