

一种适用于同步相量测量的新算法

钟山¹, 王晓茹¹, 胡绍谦²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 南瑞继保电气公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 在异步采样的情况下, 离散傅里叶变换 (DFT) 由于频谱泄漏及栅栏效应, 计算结果不够精确, 不能满足同步相量测量精度的要求。对现有的同步采样及误差消除方法进行了分析, 提出了一种新的相量测量算法。通过线性插值计算, 得到采样序列两相邻过零点进行频率跟踪, 由所测频率对采样序列进行同步修正得到满足同步采样的新序列, 采用 DFT 进行相量估计。仿真结果表明: 该算法具有高精度、计算量小等特点, 能够满足同步相量测量对精度及实时性的要求。

关键词: DFT; 同步相量测量; 同步采样; 频率偏移; 相量估计

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)01-0034-05

0 引言

2003年8月美加大停电以后, 北美电力可靠委员会 (NERC) 为避免再次出现大面积停电事故, 提出了一些建议。其中之一建议在电网中安装更多的同步相量测量装置 (PMU)。PMU 是一种广域相量测量设备, 它能够提供带高精度时间标签的电压、电流及功率等相量数据, 其同步采样控制及时间标签由全球定位系统 (GPS) 产生。目前, 国内外有大量科研人员从事 PMU 的研究工作, 同步相量测量技术已成为电力系统实时监控领域最活跃的方面之一^[1~4]。

PMU 的测量精度一直是国内外研究人员极为关注的问题。2003年, 维吉尼亚大学对市场上四种国际知名的商用 PMU 进行了测试。结果表明: 对于给定的工频信号 (美国为 60 Hz), 其测试结果均很精确, 十分接近; 但对于在工频基础上有一定频偏的信号, 其精度 (包括相位及幅度) 却不尽如意, 有较大差异^[4]。电力系统的信号是一个频率具有一定波动的信号, 有必要研究高精度的相量测量算法提高 PMU 在频率波动情况下的精度。

目前, 同步相量测量装置采用的最广泛的相量测量算法是离散傅里叶变换 (DFT), 它具有良好的谐波滤波特性, 采用递归 DFT 算法可以大大提高测量速度。但 DFT 在非同步采样的情况下, 其幅值、相位的计算结果是不准确的。文献 [5~9] 对该问题进行了深入的研究, 提出了一些相应的算法, 对它们的分析将在本文后继部分进行。

本文第 1 部分介绍同步采样的概念, 并对目前

采用的方法进行了分析; 在此基础上, 第 2 部分将提出一种高精度的、实用的相量测量算法; 第 3 部分分析了量化误差及电压闪变对算法的影响, 提出了相应的措施; 仿真实验及结果在第 4 部分给出, 最后得到结论。

1 同步采样及实现方法分析

在 $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{N-1}, t_N \dots$ 时刻分别对周期为 T 的信号 $x(t)$ 进行采样, N 为数据窗长度, 如果满足下列两个条件:

$$t_N - t_0 = T \quad (1)$$

$$t_i - t_{i-1} = T_s \quad (i=0, 1, 2, \dots, N, \dots) \quad (2)$$

则称为同步采样。其中 T_s 为采样间隔, 采样频率 $f_s = 1/T_s$ 。第一个条件要求采样频率必须为信号频率的整数倍, 第二个条件则要求采样必须是等间隔采样。

实现同步采样的方法, 通常是取 $T_s = T/N$ 为采样间隔, 利用定时器定时, 每隔 T_s 时间触发中断进行采样。理想条件下, 该方法可以满足同步采样的两个条件。当被采样的信号频率发生变化, 采样频率将不再是信号频率的整数倍, 此时称为异步采样。如利用 DFT 对异步采样数据进行相量估计将产生频率泄漏, 带来一定的误差。在测量精度要求较高的场合, 必须采用一定的措施, 实现同步采样或弥补由异步采样带来的误差。表 1 给出了 $N=64, T=20$ ms 情况下, DFT 计算信号 $x(t) = \sin(2\pi ft)$ 产生的最大误差绝对值, f 取 49.5~50.5 Hz。

为了消除或减小由异步采样所造成的误差, 国内外均进行了大量的研究, 目前所采用的方法有:

表 1 频偏对 DFT精度的影响

Tab 1 Influence of offset frequency on accuracy of DFT

信号频率 /Hz	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50.0	50.1	50.2	50.3	50.4	50.5
幅度误差 / (%)	0.52	0.41	0.31	0.20	0.10	0	0.1	0.20	0.31	0.41	0.51
相位误差 / (°)	2.116	1.693	1.270	0.846	0.423	0	0.423	0.846	1.269	1.691	2.113

方法 1:硬件同步法^[5]。利用锁相环电路跟踪信号频率,然后分频产生采样脉冲触发中断实现同步采样。该方法能够实现同步采样,消除异步采样计算误差,但需要专门的硬件同步电路,且电路较为复杂,提高了成本,目前大部分测量装置均没有该部分电路。

方法 2:软件同步法。该方法又分为两类,一类是通过频率的估计,数据窗大小 N 不变,调整定时器设置的采样间隔 T_s 以满足同步采样条件^[6]。该方法仅适用于频率缓慢变化的信号,且在软件控制硬件改变采样间隔时刻会出现较大的误差。另一类则保持采样间隔不变,改变数据窗的大小 N 实现同步采样^[7]。显然,该方法 N 的取值不一定为整数,在相量估计时需进行一定的补偿,该方法虽然提高了测量精度,但计算负担却大大增加。

方法 3:异步采样补偿法^[8,9]。这是近期讨论较多的一种方法,利用频偏造成的不同数据窗 DFT 计算初相角的偏差来估算信号的真实频率,并获得相量估计误差公式,对 DFT 运算结果进行补偿。这种方法的缺点是,频偏越大,谐波含量越高,其精度将降低。

本文利用线性插值法计算采样序列中的两相邻过零点,从而得到信号频率;由信号频率采用线性插值法修正采样序列,得到满足同步采样要求的新序列;对该序列进行 DFT 变换可得到精确的相量估计值。

2 算法原理

1) 频率的跟踪

假设采样序列为 $x(i)$, 采样间隔为 T_s , $T_s = T/N$, 其中 T 为工频信号周期, N 为数据窗大小。如果有 $x(k_1) \cdot x(k_1 + 1) < 0$, 说明在 $x(k_1)$ 与 $x(k_1 + 1)$ 之间存在一个过零点, 利用线性插值有:

$$\frac{x(k_1 + 1) - x(k_1)}{1} = \frac{0 - x(k_1)}{k_1}$$

$$k_1 = -x(k_1) \cdot \frac{1}{x(k_1 + 1) - x(k_1)}$$

$$(0 < k_1 < 1) \quad (3)$$

其中: k_1 为过零点与采样点 $x(k_1)$ 之间的距离, $k_1 \cdot T_s$ 为相距时间。

同理, 可以求得另一相邻过零点与采样点

$x(k_2)$ 之间的距离:

$$k_2 = -x(k_2) \cdot \frac{1}{x(k_2 + 1) - x(k_2)} \quad (4)$$

考虑特殊情况, 如果 $x(k) = 0$ 则对应 $k = 0$ 因此, 输入信号的周期及频率可由下式获得

$$T = 2[(k_2 + k_2) - (k_1 + k_1)] \cdot T_s \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{T}$$

2) 采样值的同步修正

如果测量信号频率 f , f 为工频。说明由于发生频率波动, N 点采样值为非同步采样。直接用 DFT 进行相量计算将造成较大误差。采样值修正的实质是将 N 点采样值以最后一点为固定点, 其他采样点位置前移 ($f < f$) 或者后移 ($f > f$), 得到新位置对应的采样值构成新序列将满足同步采样条件, 即 N 点新序列刚好覆盖一个信号周期, 且等间隔。方法如下:

对于原采样序列 $x(i)$, 各点采样位置对应移动距离 m_i 由下式计算:

$$m_i = \frac{(N - i) \cdot (\frac{1}{Nf} - \frac{1}{Nf})}{\frac{1}{Nf}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

如果 $m_i > 0$, 信号周期大于工频信号, 原采样序列各点以数据窗内最新点为固定点 ($m_N = 0$) 前移 m_i , 前移后对应的新序列采用线性插值方法可得:

$$\frac{x(i) - x(i - \text{int}(m_i) - 1)}{1 - [m_i - \text{int}(m_i)]} = \frac{x(i - \text{int}(m_i)) - x(i - \text{int}(m_i) - 1)}{1}$$

$$x(i) = [x(i - \text{int}(m_i)) - x(i - \text{int}(m_i) - 1)] \cdot \{1 - [m_i - \text{int}(m_i)]\} + x(i - \text{int}(m_i) - 1) \quad (7)$$

上式中 $x(i)$ 为新序列, $\text{int}(m_i)$ 为对 m_i 取整。考虑特殊情况, 当 $\text{int}(m_i) - m_i = 0$, 则无须进行插值计算, 对应新序列由下式计算:

$$x(i) = x(i - m) \quad (8)$$

同理, 当 $m_i < 0$, 原序列除最新点外均后移, 相应计算公式如下:

$$\frac{x(i) - x(i + |\text{int}(m_i)|)}{|\text{int}(m_i)|} = \frac{x(i + |\text{int}(m_i)| + 1) - x(i + |\text{int}(m_i)|)}{1}$$

$$x(i) = [|\text{int}(m_i)| - |\text{int}(m_i)|] \cdot [x(i + |\text{int}(m_i)| + 1) - x(i + |\text{int}(m_i)|)] + x(i + |\text{int}(m_i)|) \quad (9)$$

如 $\text{int}(m_i) - m_i = 0$, 则有:

$$x(i) = x(i + |m|) \quad (10)$$

3) 对修正后的采样序列利用 DFT 计算幅值及相角

每周波采样 N 点的离散信号, 通过 DFT 计算基波电压 (电流) 如下:

$$X(1) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j\frac{2}{N}n) \quad (11)$$

或者表示为:

$$X(1) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [\cos(\frac{2}{N}n) - j\sin(\frac{2}{N}n)]$$

实部部分和虚部部分分别为:

$$A = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos(\frac{2}{N}n)$$

$$B = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin(-\frac{2}{N}n)$$

基波的幅值:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (12)$$

对应相位角:

$$= \arctan(\frac{B}{A}) \quad (13)$$

算法要求存储的采样数据必须大于采样数据窗大小 N , 因为当信号频率低于工频时, 可能在一个数据窗内不存在两个过零点, 且在利用线性插值计算新序列时也必须用到前一个数据窗数据。通常电力系统的频率不可能波动太大, 存储两个数据窗的采样值即足够。

算法对采样值的同步, 利用的是原有的采样值, 只增加了少量的加、减、乘法。如果对于每一个采样点都进行相量估计, 在没有出现新的过零点或频率估计结果变化微弱可以忽略时, 无须重新对 m_i 进行计算, 采用上次的结果即可。算法只对异步采样数据进行同步修正, 对于相量估计算法采用的仍是 DFT, 具有良好的滤波特性, 仍然可以采用递归 DFT 减小运算量, 提高计算速度。

3 量化误差及电压闪变对算法的影响

由于本文算法采用基于过零点的频率测量方法, 在过零点附近的采样值往往较小, 必须考虑 A/D 转换的量化误差对测量结果的影响。设测量信号额定电压幅值为 4 V, 采用量程为 $-5 \sim +5$ V, 14 位 A/D 转换器估计其量化误差对算法测频影响。

对于 14 位 A/D 转换器其分辨率 $LSB = 610 \mu\text{V}$, 因此在过零点采样值的最大偏差为:

$$u = \frac{1}{2} \pm LSB = \pm 305 \mu\text{V}$$

以信号实际零点为时间起点, 那么有

$$4 \sin(\omega t) = u \quad (14)$$

其中: t 为量化误差造成的最大时间误差。对于 50 Hz 信号 $t = \pm 13.9 \mu\text{s}$ 考虑最坏情况, 即两过零点均有最大误差, 且极性相反。计算最大频率误差为:

$$f = |50 - \frac{1}{0.02 \pm 2t}| = 0.069 \text{ Hz}$$

同理, 16 位 A/D 转换器量化误差造成的最大频率误差为 0.017 Hz, 因此, 通过选择高分辨率的 A/D 转换器可以减小误差。

考虑到电网频率的波动较为缓慢, 选择间隔若干个周期的过零点计算频率可以降低最大误差。如选择间隔 4 个周期的过零点计算频率, 则对于 14 位 A/D 转换器其量化误差造成的最大频率误差为:

$$f = |50 - \frac{1}{(0.02 \times 4 \pm 2t)/4}| = 0.017 \text{ Hz}$$

而 16 位 A/D 转换器量化误差造成的最大频率误差可降为 4.25×10^{-3} Hz。该方法的实质是将量化误差作为一异常数据, 通过平滑滤波将其误差分配到各个周波, 从而降低了其引起的最大误差。

另外, 由电压闪变 (非过零点极性短时逆变) 而出现的非正常过零点将使频率测量出现错误, 考虑到电网频率不可能有较大波动, 这种异常数据可以通过比较排除。

4 仿真结果

采用 Matlab 对本文算法进行仿真, 采样频率为 3 200 Hz, 数据窗 $N = 64$, $f_0 = 50$ Hz。

1) 频率测量及跟踪性能

图 1 对算法的测频性能进行了测试, 被测信号为 $x(t) = \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{6})$, f 变化范围为 45 ~ 55 Hz, 测量步长为 0.1 Hz。仿真结果表明, 在该范围内误差绝对值均小于 6×10^{-4} Hz, 算法具有很高的测量精度。

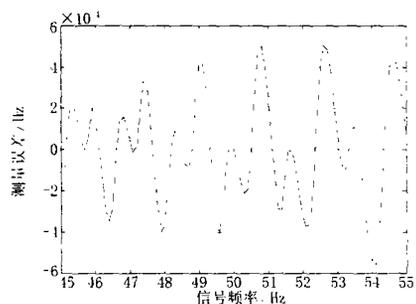


图 1 频率测量性能

Fig 1 Frequency measurement performance

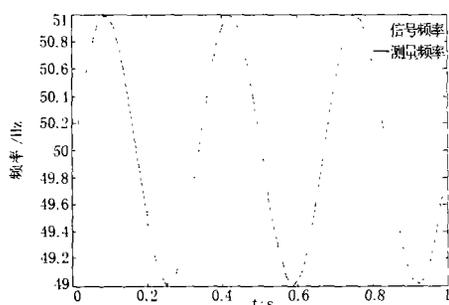
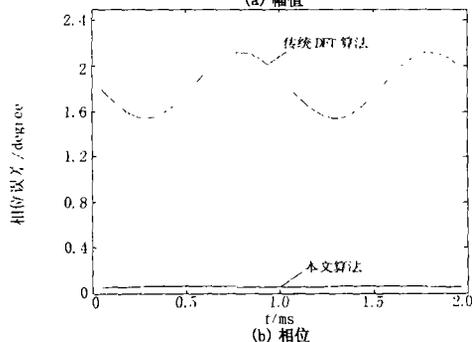
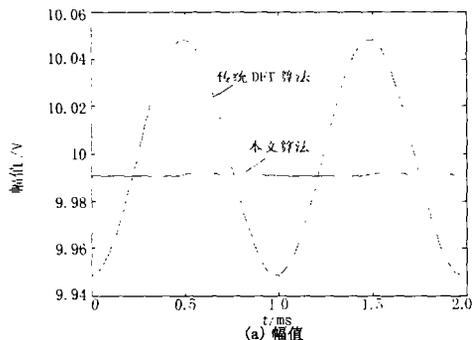


图 2 频率跟踪性能

Fig 2 Frequency tracking performance



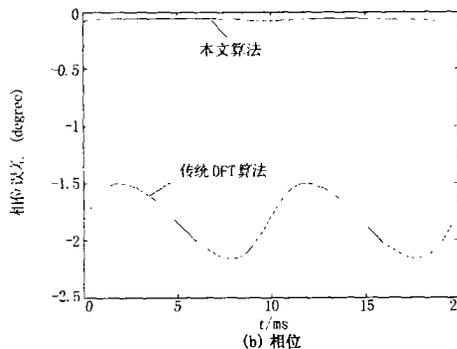
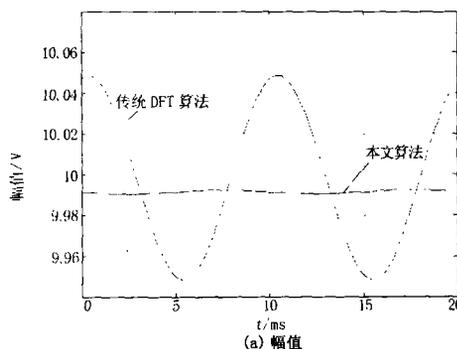
被测信号: $x(t) = 10 \sin(2\pi f t)$, $f = 49.5 \text{ Hz}$

图 3 本文算法与传统 DFT 算法相量估计性能比较

Fig 3 Comparison on phasor estimation performance between traditional DFT method and the proposed method

图 2 测试算法的频率跟踪性能,采用信号模型

为 $x(t) = \sin[2\pi f_0 t - \frac{1}{3} \cos(6\pi t)]$, 瞬时频率



被测信号: $x(t) = 10 \sin(2\pi f t) + 0.5 \sin(2\pi \cdot 3f \cdot t) + 0.3 \sin(2\pi \cdot 5f \cdot t)$, $f = 50.5 \text{ Hz}$

图 4 本文算法与传统 DFT 算法相量估计性能比较 (含谐波)

Fig 4 Comparison on phasor estimation performance between traditional DFT method and the proposed method (including harmonic component)

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} = f_0 + \sin(6\pi t)$$

对该信号,每出现一个新的过零点测量一次频率作为图 2 的纵坐标,该过零点的对应时刻为横坐标。从图中可以看出,测量频率曲线与信号的真实频率曲线几乎重合,对两曲线分析比较得到其误差绝对值在 0.1 Hz 内波动,能很好的跟踪被测信号频率。

2) 与传统 DFT 算法相量估计性能比较

图 3 对本文算法与传统 DFT 算法的相量估计性能 (包括幅值和相位) 进行了比较,被测信号模型为 $x(t) = 10 \sin(2\pi f t)$, $f = 49.5 \text{ Hz}$ 。本文算法幅值最大误差为 0.01%, 相位误差最大为 0.064°。显然,在频率偏移情况下本文算法大大提高了测量精度。

图 4 被测信号模型为:

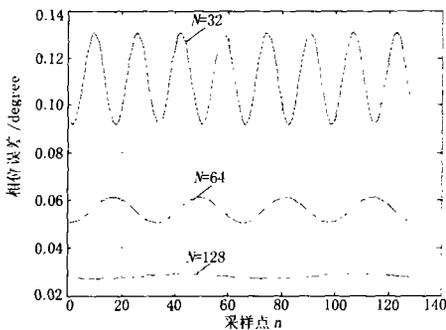
$$x(t) = 10 \sin(2\pi f t) + 0.5 \sin(2\pi \cdot 3f \cdot t) + 0.3 \sin(2\pi \cdot 5f \cdot t)$$

$f = 50.5 \text{ Hz}$ (包含 5% 的三次谐波, 3% 的五次谐波), 本文算法幅值最大测量误差为 0.01%, 相位测量误差最大为 -0.083°; 说明在信号中包含谐波情

况下算法仍能保持良好的性能。

3) 不同数据窗对本文算法精度的影响

图 5 比较了在不同数据窗情况下 ($N = 32, N = 64, N = 128$) 相位测量的精度, 被测信号模型为, $x(t) = 10 \sin(2\pi ft)$, $f = 49.5 \text{ Hz}$ 。从图中可看出三者均有很高精度; 同时, 由于算法中大量采用了线性插值, N 越大, 采样序列越密集, 算法精度越高, 但 N 越大对硬件要求也越高, 计算量增大, 可根据硬件性能及所需精度适当选择数据窗的大小。



被测信号:

$$x(t) = 10 \sin(2\pi ft), f = 49.5 \text{ Hz}$$

图 5 不同数据窗条件下算法相位测量性能比较

Fig 5 Comparison of performances on phase measurement with different N

5 结论

本文提出了一种基于 DFT 的高精度、实用的电力系统相量测量算法。与传统的基于 DFT 的算法相比, 本文算法利用线性插值实现采样值的同步, 精度明显提高, 计算量小, 且保持了 DFT 的良好特性, 能够满足同步相量测量对于精度及实时性的要求。

参考文献:

- [1] Phadke A G Synchronized Phasor Measurements in Power Systems [J]. IEEE Computer Applications in Power Systems, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] IEEE Standard 1344-1995, Synchrophasors for Power Systems [S].
- [3] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统实时相角监控

系统研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 17-19.
LU Zhi-gang, HAO Yu-shan, KANG Qing-ping, et al Research of the Phase Angle Monitoring Control System in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 17-19.

- [4] Depablos J, Centeno V, et al Comparative Testing of Synchronized Phasor Measurement Units [J]. IEEE
- [5] 江道灼, 孙伟华, 陈素素. 电网相量实时同步测量的一种新方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 40-44.
JANG Dao-zhuo, SUN Wei-hua, CHEN Su-su A New Method of Real Time and Synchronous Measurement on Power Network Phase Parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 40-44.
- [6] Benmouyal G An Adaptive Sampling Interval Generator for Digital Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3): 1602-1609.
- [7] Hart D, Novosel D, Hu Y, et al A New Frequency Tracking and Phasor Estimation Algorithm for Generator Protection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1064-1073.
- [8] 耿池勇, 高厚磊, 刘炳旭, 等. 适用于同步相量测量的 DFT 算法研究 [J]. 电力系统自动化设备, 2004, 24(1): 84-87.
GENG Chi-yong, GAO Hou-lei, LU Bing-xu, et al Study of DFT Algorithm in Synchronized Phasor Measurement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 84-87.
- [9] WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.

收稿日期: 2005-05-27; 修回日期: 2005-07-01

作者简介:

钟山 (1975 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化方面的研究; E-mail: nczs@163.com

王晓茹 (1962 -), 女, 教授, 主要从事电力系统自动化方面的研究工作;

胡绍谦 (1979 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统自动化方面的研究。

A new phasor estimation method for synchronized phasor measurements

ZHONG Shan¹, WANG Xiao-ru¹, HU Shao-qian²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2 Nari-relays Electric Co., Ltd, Nanjing 211100, China)

(下转第 54 页 continued on page 54)

- [8] Bjorgan R, L U Chen-ching, Lawarree J. Financial Risk Management in a Competitive Electricity Market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (4): 1285-1291.
- [9] Linares P. Multiple Criteria Decision Making and Risk Analysis as Risk Management Tools for Power Systems Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (3): 895-900.
- [10] 雷兵,王秀丽,高瑛,等. 独立发电商在日前市场的竞价策略分析 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (24): 8-14. LEI Bing, WANG Xiu-li, GAO Ying, et al. Analysis of IPPs Bidding Strategy in Day-ahead Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (24): 8-14.
- [11] Ferrero R W, Rivera J E. Application of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (1): 184-190.

收稿日期: 2005-05-27; 修回日期: 2005-07-20

作者简介:

彭希 (1982 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力自动监控; Email: pengpengxixi@yahoo.com.cn

刘涤尘 (1953 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电气工程与自动化和电力自动监控等方面的研究。

Study of generators trade risk management strategy based on straddle options contract

PENG Xi¹, L U Di-chen¹, CHEN Bo²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Zhongshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Zhongshan 528400, China)

Abstract: In electricity market, as facing double price risks of fuel market and electricity consumption market, generators must seek effective means to manage risks. Option and its hedging function are particularly discussed in this paper. Trade model considering linked prices of coal and electricity is set up and risk management strategy based on straddle options contract is introduced. Theoretical analysis and calculation instance indicate that trade strategy is effective and feasible.

Key words: risk management; straddle option; generators; hedging

(上接第 30 页 continued from page 30)

Parameters identification for hydraulic turbine governing systems based on genetic algorithm

YANG Xiao-dong, DONG Chen, LU Wen-hua, WEN Jin-yu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper introduces the idea of GA in the parameter identification of hydraulic turbine governing system and solves the problem that traditional identification methods such as frequency-domain methods and time-domain methods cannot validly identify the parameters of nonlinear systems. To raise the efficiency of identification, this paper improves the methods of selections of the initial colony and filial generation. The identification results of real governing system demonstrate that such parameter identification methods with GA have the advantages of fast computation and high parameter identification precision. And the conclusion is that the idea of GA provides a new way for parameter identification of hydraulic turbine governing system which has magnitude value for engineering application.

Key words: governing system; parameter identification; genetic algorithm

(上接第 38 页 continued from page 38)

Abstract: The result of Discrete Fourier Transform (DFT) in asynchronous sampling is not accurate and can not satisfy the requirement of synchronized phasor measurements, due to spectral leakage and barrier effect. This paper analyzes several methods of synchronous sampling and error eliminated and proposes a new phasor estimation method. The proposed method obtains two adjacent zero-crossing points of sampling series by linear interpolation method for frequency tracking, amends the sampling series to get satisfied synchronous sampling, and computes the new series for phasor estimation by DFT as well. The simulation shows that the method has a notable accuracy improvement, and adds little calculation burden than traditional DFT. The favorable performance satisfies the demand of accuracy and real-time of synchronized phasor measurements.

Key words: DFT; synchronized phasor measurements; synchronous sampling; offset frequency; phasor estimation