

一种提高短时闪变严重度 P_{st} 计算精度的方法孙成发¹ 高辉^{1,2}(1. 阿城继电器股份有限公司 哈尔滨瑞雷电气科技发展有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 短时闪变严重度 P_{st} 是 IEC 标准中衡量电能质量的一个重要指标。文中提出一种提高 P_{st} 计算精度的方法, 方法核心在于利用插值算法对 DFT (FFT) 计算结果进行修正形成插值 DFT (FFT) 以克服 DFT (FFT) 存在的频谱泄漏和栅栏效应; 提出应用 BP 网络对单位瞬时闪变值时频率和正弦电压波动值进行建模以提高二者的拟合精度。提出的方法不仅通过仿真试验得到验证而且在实际中得到成功应用。

关键词: 电能质量; 闪变严重度; 离散傅里叶变换; 插值算法; BP 网络

A method to improve calculating accuracy of the short term flicker severity P_{st} SUN Cheng-fa¹, GAO Hui^{1,2}(1. Acheng Relay Co.,Ltd, Harbin Reli Electric Technology Co.,Ltd, Harbin 150090, China;
2. School of Communication Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The short term flicker severity P_{st} is an important index of power quality in the standards of IEC. A method to improve the accuracy of P_{st} is proposed in this paper. The corn of this method is that, first, interploation algorithms is applied on revising the results of DFT (FFT) to overcome the disadvantage of spectral leakage and barrier effect, then, BP networks is employed on setting model of frequency and sin voltage fluctuation value at unit short term flicker to improve fitting accuracy. The proposed method to improve the accuracy of P_{st} is not only proved to be effective by simulation but also applied successfully in practice.

Key words: power quality; flicker severity; DFT(FFT); interploation algorithms; BP networks

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0048-04

0 引言

随着电力市场商品化的发展, 用户对电能质量特别是电压质量越来越重视, 然而随着大功率变动负荷大量进入电网 (如冲击性负荷的大量使用), 引起电网负荷的急剧变化, 电力系统面对着广泛的电网谐波、电压波动、闪变、三相电压不平衡等配用电污染, 给电力系统安全运行带来直接或潜在的危害^[1-3]。对电能质量进行实时监测, 并依据监测数据采取合理的措施提高电能质量具有重要意义。

电压波动和闪变是反映电能质量的重要标志。短时闪变严重度 P_{st} 是 IEC 标准中衡量电能质量的一个重要的综合指标^[4], 准确计算 P_{st} 是对电能质量进行监测的基础, 以往基于离散傅立叶变换 (DFT, FFT) 计算 P_{st} , 由于 DFT (FFT) 存在的频谱泄漏和栅栏效应, 致使 P_{st} 计算精度不高, 同时, 采用插值方法建立单位瞬时闪变值时频率和与相应频率的

正弦电压波动值的关系, 存在较大的拟合误差, 也是 P_{st} 计算精度不高的一个原因。为此, 文中采用插值离散傅里叶变换 (IDFT, IFFT) 克服 DFT (FFT) 存在的不足, 以提高频率, 幅值等电气参数的计算精度^[5-7], 同时, 采用 BP 网络对单位瞬时闪变值时频率和相应频率的正弦电压波动值的关系进行建模, 以提高二者的拟合精度^[8], 并最终提高 P_{st} 的计算精度。文中首先描述了短时闪变严重度 P_{st} 的计算过程和步骤, 然后, 对 IDFT (IFFT) 进行了理论推导, 并给出了 BP 网络的拟合结果, 最后通过仿真试验表明提出的方法能够很大程度上提高 P_{st} 的计算精度。

1 短时闪变严重度 P_{st} 的计算过程和步骤

IEC 定义短时闪变严重度 P_{st} 的计算方法^[4]: 首先, 对于随机变化负荷产生的电压波动, 在足够长观测时间 T (至少 10 min) 内对瞬时视感度 $S(t)$ 进

行等间隔采样; 然后, 将 $S(t)$ 数据分级, 并统计各等级数据分布概率, 再由各等级数据分布概率得到累积概率分布函数 (CPF); 最后, 根据 CPF 作出闪变程度的统计评定, 即计算闪变严重度 P_{st} 。可见, 瞬时视感度 $S(t)$ 直接反映了电压波动引起灯光闪烁对人视感的影响, 是计算 P_{st} 的关键。

定义瞬时视感度 $S(t)$ 曲线上的离散点值为瞬时闪变值 P_{st} , 根据 IEC 定义的短时闪变严重度 P_{st} 的计算方法, P_{st} 的计算步骤可描述为:

Step1: 对连续电压信号 $u(t)$ 采样, 形成离散电压信号 $u(n)$, 对离散信号 $u(n)$ 每半个周波计算一次电压均方根值得到电压均方根值序列 $U(n)$, 形成离散电压均方根值曲线。

Step2: 对电压均方根值序列 $U(n)$ 以时间 τ 进行等间隔划分, 得到划分内电压均方根值序列 $U_i(n)$, $i=1, \dots, N$, N 为观测时间 T 内划分数总数, 且 $N=T/\tau$, 对每个划分中均方根值序列进行傅立叶分析 (FFT), 求出离散频谱序列 $U_{f_m}(m)$, $m=1, \dots, M$, M 为频谱频率的上限, 进而得到相应频率为 f_m 的正弦电压均方根值曲线的峰峰值, 即频率为 f_m 的电压波动值 $\Delta U_{f_m}(m)$ 。

$$U_{f_m}(m) = FFT(U_i(n)) \quad (1)$$

$$\Delta U_{f_m}(m) = 2|U_{f_m}(m)| \quad (2)$$

Step3: 定义第 i 个电压均方根值序列划分 $U_i(n)$ 的瞬时闪变值 p_i 等于相应频谱上各频率 f_m 对应瞬时闪变值之和, 即:

$$p_i = \sum_{m=0}^M \left[\frac{2|U_{f_m}(m)|}{du_m} \right]^2, i=1, \dots, N \quad (3)$$

式中: du_m 为单位瞬时闪变值时频率 f_m 和对应的正弦电压波动值。

Step4: 将观测时间 T 内各个划分对应的瞬时闪变值 p_i 分为 L 级, 由于 p_i 是等间隔数据, 可以通过分布在相应等级数据的频率来表示该等级中数据分布概率 $p(l)$, $l=1, \dots, L$, 即:

$$p(l) = N_l/N \quad (4)$$

式中: N_l 为分布在 l 等级中的数据个数。

Step5: 依据数据分布概率 $p(l)$ 作出直方图, 再由直方图形成 CPF。由瞬时闪变值 p_i 得出的 CPF 反映了瞬时闪变值 p_i 超过一定限值的时间与观测时间 T 的百分比。对于随机变化负荷的瞬时闪变值 CPF 曲线, 常用 5 个规定值计算短时闪变严重度 P_{st} , 即:

$$P_{st} = (0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})^{0.5} \quad (5)$$

式中: $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 和 P_{50} 分别为观测时间 T 内瞬时闪变值 p_i 超过 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间的觉察单位值。

2 提高 P_{st} 计算精度的方法

通过对 P_{st} 计算步骤的分析可知: 在对电压均方根值 $U_i(n)$ 通过式 (1) 进行频谱分析时, 由于 DFT (FFT) 存在频谱泄漏和栅栏效应, 致使频谱分析得到的频率和幅值产生较大的误差, 影响 P_{st} 的计算精度; 另外, 由于标准中只给出单位瞬时闪变值时离散频率对应的正弦电压波动值, 而通过式 (1) 得到的频率往往查不到对应频率的正弦电压波动值, 以往通过插值方法确定式 (3) 中的 du_m , 而通过插值方法对单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦电压波动值建模存在较大误差, 也影响 P_{st} 的计算精度; 文中针对影响 P_{st} 计算精度的不同因素, 提出相应的解决方案。

2.1 插值 DFT (FFT) 改善 DFT (FFT) 性能

设模拟信号含有多种频率成分, 对其以等间隔 Δt 采样, 得到离散序列

$$u(k\Delta t) = \sum_m A_m e^{2\pi i f_m k \Delta t}, k=0, \dots, N-1 \quad (6)$$

式中: A_m 为频率为 f_m 的模拟信号幅值; N 为采样点数。对离散信号 $u(k\Delta t)$ 进行 DFT 变换, 即:

$$U(n\Delta f) = \sum_m A_m D_N((n\Delta f - f_m)T) \quad (7)$$

式中: $\Delta f = 1/T$, $T = N\Delta t$, $D_N(\cdot)$ 为 Dirichle 核, 且 $D_N(\cdot)$ 表达式为

$$D_N(\theta) = \frac{\sin(\pi\theta)}{N \sin(\pi\theta/N)} e^{-i\pi\theta \frac{N-1}{N}} \quad (8)$$

考虑余弦窗

$$w(k\Delta t) = \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m \cos\left(\frac{2\pi m k \Delta t}{T}\right), k=0, \dots, N-1 \quad (9)$$

则 $u(k\Delta t) \cdot w(k\Delta t)$ 的 DFT 变换为

$$U_w(n\Delta f) = \sum_m A_m W_M((n\Delta f - f_m)T) \quad (10)$$

式中

$$W_M(\theta) = \sum_{m=0}^M (-1)^m \frac{a_m}{2} [D_N(\theta - k) + D_N(\theta + k)] \quad (11)$$

又由文献[6]可知

$$U_w(n\Delta f) = \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m [U((n-k)\Delta f) + U((n+k)\Delta f)] \quad (12)$$

在式(7)中, 如果 f_m 不是 Δf 的整数倍, 由于栅栏效应, DFT 不可能求出信号的准确参数, 不妨设:

$$f_m = (l_m + x_m)\Delta f \quad (13)$$

式中 $0 \leq x_m < 1$, 当 $x_m < 0.5$ 时, $|U(l_m\Delta f)|$ 相对较大, 当 $x_m > 0.5$, $|U((l_m+1)\Delta f)|$ 相对较大。为了推导关于 f_m 和 A_m 的插值公式, 由式(12)可得到加余弦窗后频谱在整数倍频点 $l_m\Delta f$ 和 $(l_m+1)\Delta f$ 的谱线幅值

$$U_w(l_m\Delta f) = A_m \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m [D_N(-x_m - m) + D_N(-x_m + m)] \quad (14a)$$

$$U_w((l_m+1)\Delta f) = A_m \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m [D_N(1-x_m - m) + D_N(1-x_m + m)] \quad (14b)$$

为了研究问题方便, 取系数 α 为

$$\alpha = \frac{|U_w((l_m+1)\Delta f)|}{|U_w(l_m\Delta f)|} \quad (15)$$

考虑到采样点数 N 通常较大 ($N \geq 1024$), 则有下面近似式: $\sin\left(\frac{x_m}{N}\right) \approx \frac{x_m}{N}$ 和 $\cos\left(\frac{x_m}{N}\right) \approx 1$, 利用式(14)和(15)可确定准确的 x_m , 将 x_m 代入式(13)便可得到准确的频率 f_m , 再将 x_m 代入式(14a)或(14b)均可得到准确的 A_m 。

对于式(9)余弦窗, 当 $M=0$, $a_0=1$ 时, 余弦窗变为矩形窗, 由式(14a)和(14b)知

$$U_w(l_m\Delta f) = A_m \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m [D_N(-x_m - m) + D_N(-x_m + m)] = A_m e^{\pi i x_m} \frac{\sin(\pi x_m)}{\pi x_m} \quad (17)$$

$$U_w((l_m+1)\Delta f) = A_m \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m [D_N(1-x_m - m) + D_N(1-x_m + m)] = A_m e^{\pi i x_m} \frac{\sin(\pi x_m)}{\pi(1-x_m)} \quad (18)$$

由式(15)、(17)和(18)可推得

$$x_m = \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad (19)$$

将 x_m 代入式(13), (14a) 可得

$$f_m = (l_m + x_m)\Delta f = \left(l_m + \frac{\alpha}{1+\alpha}\right)\Delta f \quad (20)$$

$$A_m = \left| \frac{\pi x_m}{\sin(\pi x_m)} e^{-\pi i x_m} U_w(l_m\Delta f) \right| \quad (21)$$

对于式(9)余弦窗, 当 $M=1$, $a_0=a_1=0.5$ 时, 余弦窗成为海宁窗, 由式(14a)、(14b)和(15)可推得

$$x_m = \frac{2\alpha - 1}{1 + \alpha} \quad (22)$$

将 x_m 代入式(13), (14a) 可得

$$f_m = (l_m + x_m)\Delta f = \left(l_m + \frac{2\alpha - 1}{1 + \alpha}\right)\Delta f \quad (23)$$

$$A_m = \left| \frac{2\pi(1-x_m^2)}{\sin(\pi x_m)} e^{-\pi i x_m} U_w(l_m\Delta f) \right| \quad (24)$$

随着 M 的增大, 窗函数频谱旁瓣衰减越大, 能够更好地抑制泄漏, 但是, 频谱主瓣宽度增加, 这样 M 值也不宜取得过大, 一般 M 取 0 和 1 就能够达到需要的精度。

2.2 BP 网络拟合单位瞬时闪变值时频率和电压波动值关系

鉴于通过插值方法描述单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦电压波动值关系存在较大的误差, 采用具有很好的非线性函数逼近能力和内插特性的 BP 网络来对单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦电压波动值的关系进行拟合建模^[8]。

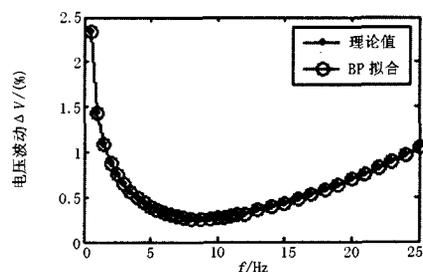


图 1 BP 网络拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of BP networks

考虑微处理器的计算能力, 对 BP 网络计算复杂度的进行必要的约束, 为降低 BP 网络的计算复杂度, 以频率 8.8 Hz 为界线, 将产生单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦电压波动值数据分成两部分, 对每一部分数据分别采用单独的 BP 网络拟合。BP 网络采用三层结构, BP 网络的输入为频率值, 输出为单位瞬时闪变值时与对应频率的正弦电

压波动值, 于是 BP 网络的输入和输出节点数均为 1, BP 网络的隐层节点数的选取由于缺乏理论依据, 采用试凑的方法, 同时考虑微处理器的计算能力, 最终隐层节点数确定为 3。

对于确定结构的两个独立 BP 网络, 均采用附加动量自学习 BP 算法训练网络, 学习误差小于 10^{-6} 时停止学习。图 1 描述了 BP 网络对频率和对应频率的正弦波动电压值的拟合情况。可以看出 BP 网络能够非常精确地反映频率和对应频率的正弦波动电压值的非线性关系。

3 仿真试验

IEC 通过大量试验得到单位瞬时闪变值时矩形波动电压、正弦波动电压电压波动值 ΔV (%) [4]。基于标准数据进行仿真试验, 试验中对波动电压采取等间隔采样, 采样间隔 $\Delta t = 10$ ms, 则采样频率 $f_s = 1/\Delta t = 100$ Hz, 采样长度 $N = 1024$, 则频率分辨率 $\Delta f = 1/(N\Delta t)$, 由于波动电压的波形、电压波动值和频率固定, 计算得到的 P_{st} 固定为 0.7144。

表 1 试验结果比较

Tab.1 Comparison of simulation results

f /Hz	正弦波 P_{st}			矩形波 P_{st}		
	ΔV /(%)	FFT	IFFT	ΔV /(%)	FFT	IFFT
4.0	0.500	0.7132	0.7144	0.333	0.6069	0.6988
4.5	0.445	0.7067	0.7156	0.316	0.6832	0.7008
5.0	0.398	0.6638	0.7129	0.293	0.6338	0.7042
5.5	0.360	0.5952	0.7129	0.269	0.5662	0.6966
6.0	0.328	0.5050	0.7145	0.249	0.5007	0.7029
6.5	0.300	0.5087	0.7133	0.231	0.4991	0.7069
7.0	0.280	0.6020	0.7151	0.217	0.6002	0.7110
7.5	0.266	0.6698	0.7150	0.207	0.6653	0.7126
8.0	0.256	0.7042	0.7113	0.201	0.7044	0.7146
8.8	0.250	0.6997	0.7128	0.199	0.7090	0.7224
9.5	0.254	0.6220	0.7097	0.200	0.6242	0.7112
10.0	0.262	0.5429	0.7154	0.205	0.5586	0.7175
10.5	0.270	0.4698	0.7138	0.213	0.4709	0.7170
11.0	0.282	0.5693	0.7149	0.223	0.5718	0.7197
11.5	0.296	0.6465	0.7141	0.234	0.6504	0.7191
12.0	0.312	0.6957	0.7134	0.246	0.6989	0.7168
13.0	0.348	0.6973	0.7133	0.275	0.7026	0.7185
14.0	0.388	0.5739	0.7148	0.308	0.5815	0.7227
15.0	0.432	0.5372	0.7138	0.344	0.5406	0.7212
16.0	0.480	0.6828	0.7136	0.380	0.6893	0.7201
17.0	0.537	0.7067	0.7137	0.333	0.7154	0.7224
18.0	0.584	0.6015	0.7144	0.316	0.6065	0.7186
19.0	0.640	0.5043	0.7131	0.293	0.5049	0.7176
20.0	0.700	0.6669	0.7143	0.269	0.6807	0.7291

为了比较文中提出方法的有效性, 在仿真试验

中, 分别应用 IFFT 和 FFT 对波动电压进行频谱分析, 并采用训练好的 BP 网络拟合单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦波动电压值的关系。表 1 对试验结果进行了对比。图 1 对试验结果的相对误差进行了比较。

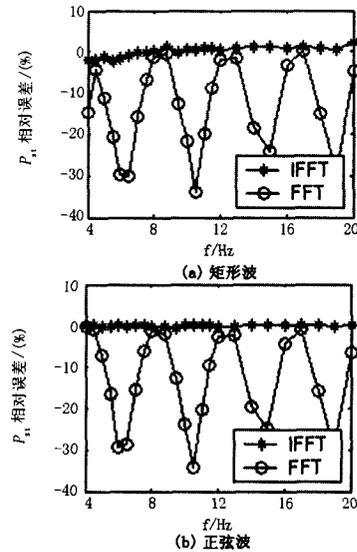


图 2 试验结果相对误差比较

Fig.2 Relative errors comparison of simulation results

表 1 中数据表明, 对于正弦波动电压和矩形波动电压文中提出方法计算的 P_{st} 具有很高的精度, 明显优于以往的方法。图 1 直观地表明文中提出方法计算 P_{st} 的相对误差很小, 且非常稳定, 而以往方法计算 P_{st} 的相对误差出现较大的振荡。可见, 文中提出方法具有很好的性能。

4 结论

文中提出应用 IDFT (IFFT) 改善 DFT (FFT) 性能, 提高相关电气参数计算精度, 采用 BP 网络拟合单位瞬时闪变值时频率和对应频率的正弦电压波动值关系, 提高拟合精度, 进而提高瞬时闪变值 P_{st} 计算精度。文中提出方法不仅通过仿真试验证明具有很好的性能, 而且在实际中得到成功的应用。

参考文献

- [1] 赵刚, 施围, 林海峰. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001,25(11):15-18.
ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-feng. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001,25(11):15-18.
- [2] 赵海翔, 陈默子, 戴惠珠. 闪变值离散化计算的误差分析及其应用[J]. 电网技术, 2004,28(13):84-87.

(下转第 56 页 continued on page 56)

这和实际的情况是符合的。

2 结论

本文提出了一种计算图的连通性问题的邻接矩阵染色算法,该算法基于广度优先搜索法 BFS 的原理,结合了邻接矩阵特殊的结构和物理意义,采用了直观便捷的图形化方法。通过算例证明,该算法切实有效,并且可以成功应用在电力系统网络拓扑分析中。

参考文献

- [1] 于尔铿. 能量管理系统 (EMS) [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 但刚, 赵云龙. 城市中压配电网接线方式及配电自动化探讨[J]. 华北电力技术, 2007, (1): 18-21.
DAN Gang, ZHAO Yun-long. Study on Connection Modes of Urban Middle Voltage Distribution Network and Distribution Automation[J]. North China Electric Power, 2007,(1): 18-21.
- [3] 卜月华. 图论及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [4] Sartaj Sahni. Data Structures, Algorithms, and Applications in C++[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [5] 龚延平. 数据结构与算法 (C++) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [6] 丘生, 张焰. 用邻接表保存中压配电网拓扑结构[J]. 电力自动化设备, 2005, 3(3): 57-59.
QIU Sheng, ZHANG Yan. Adjacency List Saving Topology Structure of Mid-voltage Distribution System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,3(3): 57-59.
- [7] 张百舸, 姚学武. 网络拓扑着色的矩阵方法及其在电力系统中的应用[J]. 吉林电力, 2005, 8(4): 23-25.
Zhang B G, Yao X W, Tian L H. Matrix Transform Method of Network Topology Coloring and Its Application in Power System[J]. Jilin Electric Power, 2005,4(8).
- [8] 张宏, 郭宗仁. 基于节点-支路关联矩阵的配电网馈线故障区域定位算法[J]. 电力自动化设备, 2004,24(1): 27-29.
ZHANG Hong, GUO Zong-ren. Fault Section Locating for Distribution Feeder Net Based on Node-branch Incident Matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(1): 27-29.
- [9] 李晓鹏, 侯佑华. 矩阵方法在电力系统网络拓扑的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2000,18(4).
LI Xiao-peng, HOU You-hua. Matrix Method in Application of Power System Network Topology[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2000,18(4).
- [10] 李淘, 刘凯奎. Visual C++ SQL Server 数据库开发与实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [11] 周双喜. 现代电厂工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
ZHOU Shuang-xi. Modern Power Plant Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- 收稿日期: 2007-11-07; 修回日期: 2008-03-04
作者简介:
崔岩 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电技术. E-mail: cyan@mail.iee.ac.cn
-
- (上接第 51 页 continued from page 51)
- ZHAO Hai-xiang, CHEN Mo-zi, DAI Hui-zhu. Error Analysis of Discrete Calculation Method of Flicker Severity and Its Application[J]. Power System Technology, 2004,28(13): 84-87.
- [3] 佟为明, 宋雪雷. 电压闪变的相关标准及分析[J]. 低压电器, 2006,(3):57-61.
TONG Wei-ming, SONG Xue-lei. Introduction and Analysis of Relative Standards of Voltage Flicker[J]. Low Voltage Apparatus, 2006,(3):57-61.
- [4] 孙树勤. 电能质量技术丛书之四——电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
SUN Shu-qin. Power Quality Techniques——Voltage Fluctuation and Flicker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [5] Jain V J. High-Accuracy Analog Measurements Via Interpolated FFT[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1979, 28:113-122.
- [6] Grandke T. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1983,32:350-355.
- [7] 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 Zong-hang, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of The CSEE, 1999,19(3):63-66.
- [8] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社出版社, 1999.
LI Shi-yong. Fuzzy Control · Neurocontrol and Intelligent Cybernetics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
-
- 收稿日期: 2008-03-03
作者简介:
孙成发 (1965-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化及继电保护; E-mail: suncf2000@163.com
高辉 (1969-): 男, 博士, 研究方向为交通运输、智能控制及电力系统自动化。