

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.015

五点加权FFT介质损耗角测量算法的研究

孙 鹏, 杨永越

(沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 电气设备绝缘介质损耗角(介损角)的实时检测,可以为设备的绝缘监测提供可靠依据。采用FFT算法进行介损角测量时,因非同步采样会造成频谱泄漏,从而影响介质损耗角的测量精度。笔者分析了FFT算法的频谱泄漏效应,在此基础上采用了5点加权FFT算法实现对介损角的检测。该算法对信号傅里叶变换后所得序列中5个点进行加权运算,从而减小了频谱泄漏误差,提高了介损角的测量精度。通过仿真给出了该算法在频率波动、3次谐波变化、采样频率变化、采样点数变化、直流分量变化、介损角理论值变化、初始相角变化及白噪声变化时计算所得介损角的变化情况,验证了该算法的有效性。

关键词: 介质损耗角; 频谱泄漏; FFT; 五点加权快速傅里叶变换

Five-point Weighted FFT Algorithm for Measurement of Dielectric Loss Angle

SUN Peng, YANG Yongyue

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Real-time detection of dielectric loss angle can provide a reliable basis for monitoring electrical equipment insulation. When FFT algorithm is applied to measure the dielectric loss angle, the measurement accuracy is influenced by the spectrum leakage effect due to asynchronous sampling. In this paper, the spectrum leakage effect of FFT algorithm caused by asynchronous sampling is analyzed, and a five-point weighted FFT algorithm is proposed to measure the dielectric loss angle. In the algorithm, five points from the Fourier transformed signal series are weighted and calculated to reduce the spectrum leakage error and improve the measurement accuracy of dielectric loss angle. Simulation with the proposed algorithm is conducted to observe the variation of dielectric loss angle in the cases of varying parameters such as signal frequency, third-order harmonics, sampling frequency, sampling point number, direct current component, theoretical value of dielectric loss angle, initial phase angle, and white noise. The simulation results verify the effectiveness of the proposed five-point weighted FFT algorithm.

Key words: dielectric loss angle; spectrum leakage effect; FFT; five-point weighted FFT

0 引言

高压电气设备的安全运行是影响电力系统安全、稳定、经济运行的重要因素,高压电气设备损坏事故中大部分是绝缘损坏引起的,因此能够有效地检测出绝缘存在的缺陷对于电力系统的安全运行具有重要意义。介质损耗角 δ 是表征电气设备绝缘性能的重要参数, δ 及其发展趋势能有效地反映出电气设备的绝缘状况。然而实际电气设备的介损角 δ 通常数值很小,对其检测时极易受到现场各种因素的干扰,从而造成较大的测量误差,因此提高介

损角 δ 的测量精度具有非常重要的工程价值。

目前,介损角的测量方法主要有硬件法^[1-3]和软件法^[3-17]。硬件法主要以过零比较法为代表,该方法容易受谐波、频率波动和随机干扰的影响较严重。软件法主要以谐波分析法为代表,采用快速傅里叶变化计算速度快、计算量小,不受高次谐波和直流漂移的影响,但因电网频率波动造成非同步采样而产生频谱泄漏效应和栅栏效应,将严重影响介损角的测量精度。

笔者分析了FFT算法中存在的频谱泄漏效应,采用了五点加权FFT的介质损耗角测量算法,分析了该算法在频率波动、3次谐波变化、采样频率变

化、采样点数变化、直流分量变化、介损角理论值变化、初始相角变化及白噪声变化时计算所得的介损角的变化情况,结果表明,该算法能有效地减轻频谱泄漏现象,提高了介损角的测量精度。

1 FFT 的频谱泄漏效应

FFT 算法所产生的频谱泄漏现象是由于理论傅里叶变换和实际工程应用的傅里叶变换的不同所造成的。理论傅里叶变换是对无限长时域信号的变换,而实际工程应用的傅里叶变换(FFT 算法)只能对有限长信号进行变换。有限长信号在时域上相当于无限长信号与矩形窗信号的乘积,即利用 FFT 算法得到的傅里叶变换结果相当于实际信号的傅里叶变换和矩形窗信号傅里叶变换的卷积,并不等于实际信号的傅里叶变换。

设无限长正弦信号为

$$x_m(t) = A_m e^{j(\omega_m t + \varphi_m)} \quad (1)$$

其傅里叶变换对应的是一条位于频率 ω_m 处的谱线。

对于长度为 T 的矩形窗函数的傅里叶变换为

$$W_T(\omega) = (2/\omega) \sin(\omega T/2) e^{-j\omega T/2} \quad (2)$$

FFT 算法是傅里叶变换在实际工程应用中的实现算法。通过 FFT 算法,可以得到对应 $\omega = 2\pi n/T$ 的离散频谱(其中 $n=1, 2, 3, \dots, N$, N 为采样点数, T 为采样时间)。设被检测信号的角频率 $\omega_m = 2\pi k/T$, 则由 FFT 算法可得该信号的频谱序列

$$X_m(n) = A_m N \frac{\sin[(n-k)\pi]}{(n-k)2\pi} e^{j\varphi_m} e^{-j(n-k)\pi} \quad (3)$$

在式(3)中,如果 k 为整数,则

$$\begin{cases} X_m(n) = A_m N e^{j\varphi_m} / 2, n=k \\ X_m(n) = 0, n \neq k \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以知道,当信号频率为 FFT 频率分辨率的整数倍数时,该信号 FFT 变换的频谱泄漏为零,因此利用 FFT 算法可以实现介损角的准确测量。

当 k 不为整数时,设 $k = k_1 + r$ (其中 k_1 为整数, $0 < r < 1$), 则信号的频谱序列为

$$X_m(n) = A_m N \frac{\sin[(n-k_1)\pi - r\pi]}{2[(n-k_1)\pi - r\pi]} e^{j\varphi_m} e^{-j[(n-k_1)\pi - r\pi]} \quad (5)$$

式(5)可简化为

$$X_m(n) = M/t \quad (6)$$

式(6)中 M 和 t 分别为:

$$M = -A_m N \sin(r\pi) e^{j(\varphi_m + r\pi)} / 2\pi; \quad (7)$$

$$t = n - k_1 - r \quad (8)$$

由式(5)可知,非整数次谐波的频谱分布在整个

频域内, $n=k_1$ 或 $n=k_1+1$ 对应的谱线幅值最大,谱线幅值按 $1/|t|$ 的速度衰减,从而造成了频谱泄漏现象,影响了介损角的测量精度。

2 五点加权 FFT 算法原理

为了降低频谱泄漏对介损角的测量精度的影响,应尽可能使得频谱分布中谱线幅值以更快的速度衰减。通过对信号傅里叶变换所得序列相邻 5 点进行加权运算^[8],便可得到新的序列

$$X(n) = X_m(n)/4 - [X_m(n-1) + X_m(n+1)]/6 + [X_m(n-2) + X_m(n+2)]/24 \quad (9)$$

式(9)中, $n=3, 4, \dots, N-3, N-2$ 。根据式(7)和式(8),式(9)可简化为

$$X(n) = M/[t(t^2-1)(t^2-4)] \quad (10)$$

由式(10)可知,在新的频谱序列 $X(n)$ 中,谱线幅值按 $1/|t(t^2-1)(t^2-4)|$ 的速度衰减,谱线幅值的衰减速度变快,相应的频谱泄漏也会减小。当 $n=1, 2, N-1, N$ 时, $X(n)$ 按照式(9)进行加权运算,对于 $X_m(n)$ 中不存在的项按零处理,则谱线幅值的衰减速度也会变快,频谱泄漏也会减小。

设电流信号和电压信号经过 FFT 后所得的结果分别为 $X_i(n)$ 和 $X_u(n)$, 且设基波频率为

$$f_m = k \cdot \Delta f \quad (11)$$

式(11)中: k 为整数; Δf 为频率分辨率。根据式(9)可得新的序列 $X_{ii}(k)$ 和 $X_{ui}(k)$, 则介损角 δ 为

$$\delta = \pi/2 - \angle [X_{ii}(k)/X_{ui}(k)] \quad (12)$$

从以上分析可以看出,应用五点加权 FFT 算法计算介损角时的计算量和 FFT 算法接近,但却能够有效地降低了频谱泄漏效应对介损角 δ 测量精度的影响。

3 计算机仿真分析

为了验证五点加权 FFT 算法的有效性,笔者对多种干扰状态下的介损角 δ 测量算法进行了计算机仿真研究,其中绝缘介质采用阻容并联电路加以模拟,其电阻 $R_x = 100 \text{ M}\Omega$, 电容 $C_x = 6 \text{ 000 pF}$, 基波频率为 50.5 Hz ; 采样频率为 1 280 Hz , 采样点数为 1 024 , 3 次和 5 次谐波分量分别取基波分量的 10% 和 1%。根据 $\tan \delta = 1/(\omega R_x C_x)$ 可以计算介损角 δ 的理论值为 0.005 252 59 rad 。通过计算机仿真给出了五点加权 FFT 介质损耗角测量算法在频率波动、3 次谐波变化、采样频率变化、采样点数变化、直流分量变化、介损角理论值变化、初始相角变化及白噪声变化时计算所得介损角的变化情况。由于实际高压电气设备的介损角均为正值,负的介损角没有意义

可以忽略,介损角的误差均取绝对值。

3.1 频率波动的影响

由于实际电力系统的频率容易在 50 Hz 左右波动,根据《电能质量—电力系统频率允许偏差》(GB/T 15945—2008)的规定,电力系统的标称频率为 50 Hz,电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 ± 0.2 Hz,当系统容量较小时偏差限值可以放宽到 ± 0.5 Hz。考虑电力系统频率偏移标称频率最严重的情况,当电力系统的频率在 49.5~50.5 Hz 范围内变化时应用五点加权 FFT 算法计算所得到的介损角见表 1。

表1 频率波动对介损角测量的影响

Table 1 Influence of frequency fluctuation on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	频率/Hz	δ 计算值/rad	绝对误差/(10^{-5} rad)	相对误差/%
0.005 358 70	49.5	0.005 360 06	0.136	0.025 3
0.005 337 14	49.7	0.005 338 53	0.139	0.026 0
0.005 305 11	50.0	0.005 306 38	0.127	0.023 9
0.005 273 47	50.3	0.005 274 84	0.137	0.026 0
0.005 252 59	50.5	0.005 253 88	0.129	0.024 6

从表 1 中可以看出,基波频率在工频(50 ± 0.5) Hz 范围内波动时,计算所得介损角的绝对误差小于(0.15×10^{-5})rad,相对误差小于 0.03%,可以满足介损角的测量精度要求。

3.2 3次谐波的影响

在实际电力系统中,电压或电流通常含有高次谐波,其中 3 次谐波分量较大。3 次谐波分量与基波分量比值变化时计算所得到的介损角,其中 A_3/A_1 为 3 次谐波分量和基波分量的幅值之比。3 次谐波对介损角测量的影响见表 2。

表2 3次谐波对介损角测量的影响

Table 2 Influence of third-harmonics on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	A_3/A_1	δ 计算值/rad	绝对误差/(10^{-5} rad)	相对误差/%
0.005 252 59	0.1	0.005 253 88	0.129	0.024 6
0.005 252 59	0.3	0.005 253 47	0.088	0.016 8
0.005 252 59	0.5	0.005 253 63	0.104	0.019 8
0.005 252 59	0.7	0.005 253 69	0.110	0.020 9
0.005 252 59	0.9	0.005 253 87	0.128	0.024 4

从表 2 中可以看出,当 3 次谐波分量与基波分量的比值在 0.1~0.9 范围内变化时,计算所得的介损角的绝对误差小于(0.15×10^{-5})rad,相对误差小于 0.025%,完全能满足介损角测量精度的要求。由此可见,3 次谐波分量的变化对该介损角测量算法的影响很小。

3.3 采样频率的影响

当采样点数固定为 1 024 点时,采样频率在 640~2 560 Hz 变化时,由此计算所得的介损角见表 3。

表3 采样频率对介损角测量的影响

Table 3 Influence of sampling frequency on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	采样频率/Hz	δ 计算值/rad	绝对误差/(10^{-5} rad)	相对误差/%
0.005 252 59	640	0.005 253 86	0.127	0.024 2
0.005 252 59	800	0.005 253 93	0.134	0.025 5
0.005 252 59	1 280	0.005 253 88	0.129	0.024 6
0.005 252 59	1 600	0.005 253 93	0.134	0.025 5
0.005 252 59	2 560	0.005 253 87	0.128	0.024 4

从表 3 可以看出,采样频率在 640~2 560 Hz 变化时,介损角的绝对误差小于(0.15×10^{-5}) rad,相对误差小于 0.03%,采样频率变化对该介损角测量算法的影响很小。在满足介损角测量精度的条件下,可以尽量选择较低的采样频率以降低对检测电路硬件的要求。

3.4 采样点数的影响

当采样频率固定为 1 280 Hz 时,采样点数从 128 点增加到 2 048 点,采用五点加权 FFT 算法计算得到的介损角见表 4。

表4 采样点数对介损角测量的影响

Table 4 Influence of sampling dot number on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	采样点数	δ 计算值/rad	绝对误差/(10^{-5} rad)	相对误差/%
0.005 252 59	128	0.005 256 68	0.410	0.078 1
0.005 252 59	256	0.005 254 04	0.145	0.027 6
0.005 252 59	512	0.005 253 87	0.128	0.024 4
0.005 252 59	1 024	0.005 253 88	0.129	0.024 6
0.005 252 59	2 048	0.005 253 86	0.127	0.024 2

从表 4 中可以看出,采样点数从 128 点增加到 2 048 点时,计算所得介损角的绝对误差和相对误差存在下降趋势,其中绝对误差均小于(0.5×10^{-5}) rad,相对误差均小于 0.1%,完全能达到介损角测量精度的要求。由此可见,当采样点数为 128 点时也能满足介损角的测量精度要求。

3.5 直流分量的影响

在电力系统中,测量电压和电流信号时很容易发生零点漂移现象,这会在信号中产生直流分量,直流分量将会影响介损角的测量精度。直流分量与基波分量的比值变化时计算所得介损角见表 5,其中 A_0/A_1 是直流分量和基波分量的幅值之比。

表 5 直流分量对介损角测量的影响

Table 5 Influence of direct bias on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	A_0/A_1	δ 计算值/rad	绝对误差/ (10^{-5} rad)	相对误差/%
0.005 252 59	0.1	0.005 253 90	0.131	0.024 9
0.005 252 59	0.3	0.005 253 94	0.135	0.025 7
0.005 252 59	0.5	0.005 253 86	0.127	0.024 2
0.005 252 59	0.7	0.005 253 93	0.134	0.025 5
0.005 252 59	0.9	0.005 253 88	0.129	0.024 6

从表 5 中可以看出,当直流分量与基波分量的比值在 0.1~0.9 范围内变化时,计算所得介损角的绝对误差小于(0.15×10^{-5}) rad,相对误差小于 0.03%,完全能达到介损角测量精度的要求。

3.6 介损角理论值的影响

设绝缘介质的介损角的理论值在 0.001 260 63~0.021 007 46 rad 范围内变化,应用五点加权 FFT 算法计算得到的介损角见表 6。

表 6 介损角理论值对介损角测量的影响

Table 6 Influence of theoretical value on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	δ 计算值/rad	绝对误差/(10^{-5} rad)	相对误差/%
0.001 260 63	0.001 260 93	0.030	0.023 8
0.005 252 59	0.005 253 88	0.129	0.024 6
0.010 504 89	0.010 507 71	0.282	0.026 8
0.015 756 61	0.015 760 74	0.413	0.026 2
0.021 007 46	0.021 013 05	0.559	0.026 6

从表 6 中可以看出,随着介损角理论值的变化,计算所得介损角的绝对误差和相对误差变化并不明显,并且绝对误差小于(0.6×10^{-5}) rad,相对误差小于 0.03%,能达到介损角测量精度的要求。

3.7 初始相角的影响

设基波的初始相角在 $-\pi \sim \pi$ 之间变化,在此区间均匀取 25 个点,计算可得到介损角的最大值及其最大相对误差和最大绝对误差见表 7。

表 7 初始相角对介损角测量的影响

Table 7 Influence of initial phase angle on measurement of dielectric loss angle

δ 理论值/rad	δ 计算值 最大值/rad	最大绝对误差/(10^{-5} rad)	最大相对误差/%
0.005 252 59	0.005 254 28	0.169	0.032 2

从表 7 中可以看出,当基波的初始相角在 $-\pi \sim \pi$ 之间变化时,介损角的最大绝对误差小于(0.2×10^{-5}) rad,最大相对误差小于 0.04%,完全满足到介损角测量精度的要求。由此可见,初始相角的变化对该介损

角测量算法的影响较小。

3.8 白噪声的影响

取信噪比分别 10、30、50、70、90 dB,由于白噪声具有随机性,所以对每个点计算 100 次,计算可得介损角的最大值及其最大绝对误差和最大相对误差,计算所得结果见表 8。

表 8 白噪声对介损角测量的影响

Table 8 Influence of white noise on measurement of dielectric loss angle

信噪比/dB	δ 理论值/rad	δ 计算值 最大值/rad	最大绝对误差/(10^{-5} rad)	最大相对误差/%
10	0.005 252 59	0.044 310 73	3 906.000	743.600
30	0.005 252 59	0.010 678 58	542.600	103.300
50	0.005 252 59	0.005 722 42	46.980	8.944
70	0.005 252 59	0.005 314 46	6.187	1.178
90	0.005 252 59	0.005 258 83	0.624	0.119

从表 8 中可以看出,当信噪比从 10 dB 到 90 dB 变化时,计算所得介损角的误差存在下降趋势。当信噪比为 10 dB 和 30 dB 时,计算所得介损角的最大绝对误差很大,误差已经掩盖了真实值,因此在白噪声干扰较严重时应采取措施进行降噪,提高介损角的测量精度。当信噪比为 70 dB 时,介损角的最大绝对误差小于(7×10^{-5}) rad,最大相对误差小于 2%,能达到介损角测量精度的要求。

4 结语

五点加权 FFT 算法通过对信号傅里叶变换后所得序列相邻五点进行加权运算,有效地降低了由于非同步采样所造成的频谱泄漏现象,从而可以提高介损角的测量精度。此外,利用该方法测量介损角还可以有效地降低诸如电源频率的变化、初始相角的变化、采样频率的变化、高次谐波分量、直流分量以及绝缘介质状态(即介损角理论值)的变化等诸多因素对介损角测量精度的影响。

参考文献:

- [1] 刘 力,孙结中. 中间变压器对电容式电压互感器介损测量的影响[J]. 电力建设,2001,22(12):11-14.
LIU Li, SUN Jiezhong. The effect of internal potential transformer on the measurement of dielectric loss of capacitance voltage transformer[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(12):11-14.
- [2] 赵秀山,谈克雄,朱德恒,等. 介质损耗角的数字化测量[J]. 清华大学学报(自然科学版),1996,51(9):51-56.
ZHAO Xiushan, TAN Kexiong, ZHU Deheng, et al. Study on digital measurement for dielectric loss angle[J]. Journal

- of Tsinghua University(Sci. & Tech.),1996,51(9):51-56.
- [3] 梁英,律方成,李成榕,等. 两种高精度FFT算法在介损测量中的应用[J]. 华北电力大学学报,2004,31(2):12-15.
LIANG Ying,LYU Fangcheng,LI Chengrong,et al. Application of two high-accuracy FFT algorithms to measure dielectric loss[J]. Journal of North China Electric Power University,2004,31(2):12-15.
- [4] 柴旭峥,关根志,文习山,等. $\tan\delta$ 高准确度测量的加权插值FFT算法[J]. 高电压技术,2003,29(2):32-33.
CHAI Xuzheng,GUAN Genzhi,WEN Xishan,et al. The hanning-windowed interpolated algorithm for dielectric loss measurement with high accuracy[J]. High Voltage Engineering,2003,29(2):32-33.
- [5] 王楠,律方成,梁英,等. 基于高精度DFT的介损数字测量方法[J]. 高电压技术,2003,29(4):3-5.
WANG Nan,LYU Fangcheng,LIANG Ying,et al. Digital measurement of dielectric loss based on high accuracy DFT algorithm[J]. High Voltage Engineering,2003,29(4):3-5.
- [6] 徐志钮,律方成,赵丽娟. 基于加汉宁窗插值的谐波分析法用于介损角测量的分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(2):81-85.
XU Zhiniu,LYU Fangcheng,ZHAO Lijuan. Analysis of dielectric loss angle measurement by hanning windowing interpolation algorithm based on FFT[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(2):81-85.
- [7] 王微乐,李福祺,谈克雄. 测量介质损耗角的高阶正弦拟合算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(9):5-8.
WANG Weile,LI Fuqi,TAN Kexiong. Higher-order sine fitting algorithm for dielectric loss measurement[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2001,41(9):5-8.
- [8] 左自强,徐阳,曹晓珑,等. 计算电容型设备介质损耗因数的相关函数法的改进[J]. 电网技术,2004,28(18):53-57.
ZUO Ziqiang,XU Yang,CAO Xiaolong,et al. Improvement to correlation algorithm for dielectric dissipation factor calculation of capacitance equipments[J]. Power System Technology,2004,28(18):53-57.
- [9] 冯小华,张承学. 修正的谐波分析法可提高介损在线测量准确度[J]. 高电压技术,2004,30(8):36-37.
FENG Xiaohua,ZHANG Chengxue. Modified harmonics analysis approach for increasing precision in on-line measuring $\tan\delta$ [J]. High Voltage Engineering,2004,30(8):36-37.
- [10] 王楠,律方成,李燕青,等. 相关函数法计算容性设备介损角正切[J]. 华北电力大学学报,2001,22(3):22-25.
WANG Nan,LYU Fangcheng,LI Yanqing,et al. Calculation of $\tan\delta$ based on correlation function algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University,2001,22(3):22-25.
- [11] 丁晖,申忠如,刘君华. 基于小波和相关分析的虚拟介损在线检测仪[J]. 高电压技术,2000,26(6):17-19.
DING Hui,SHEN Zhongru,LIU Junhua. On line measurement of dielectric loss tangent for capacitive-type equipment based on wavelet & correlation technique[J]. High Voltage Engineering,2000,26(6):17-19.
- [12] 曹宇亚,申忠如,任稳柱. 介质损耗带电检测数字化处理方法的研究[J]. 高压电器,2000,36(3):17-19.
CAO Yuya,SHEN Zhongru,REN Wenzhu. Study on the digital processing for on-line detection of dielectric loss[J]. High Voltage Apparatus,2000,36(3):17-19.
- [13] 王楠,律方成,梁英. 基于修正理想采样频率的谐波分析法在介损在线测量中的应用[J]. 电测与仪表,2003,40(7):12-15.
WANG Nan,LYU Fangcheng,LIANG Ying. Application of harmonics analysis approach based on modified ideal sampling frequency in on-line measuring $\tan\delta$ [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2003,40(7):12-15.
- [14] 陈楷,王卉,张承学. 介损角测量中非同步采样算法的研究[J]. 继电器,2004,32(14):5-7.
CHEN Jie,WANG Hui,ZHANG Chengxue. Research on dielectric loss angle measurement in the condition of non-synchronous sampling[J]. Relay,2004,32(14):5-7.
- [15] 陈天翔,段建东,张保会,等. 用傅里叶变换测量介质损耗因数 $\tan\delta$ 的软件同步算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(15):58-62.
CHEN Tianxiang,DUAN Jiandong,ZHANG Baohui,et al. New emendatory FFT algorithm of measuring dielectric loss factor $\tan\delta$ [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(15):58-62.
- [16] 张忠蕾,李庆民,陈鹏. 谐波条件下高压电气设备介质损耗因数的定义和数字化算法[J]. 高压电器,2004,40(5):327-329.
ZHANG Zhonglei,LI Qingmin,CHEN Peng. Definition and digital algorithms for dielectric loss factor of high voltage power apparatus under harmonics condition[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(5):327-329.
- [17] 李天云,袁明哲,蔡国伟,等. 基于随机子空间和最小二乘法的介质损耗角检测方法[J]. 高电压技术,2011,37(4):828-833.
LI Tianyun,YUAN Mingzhe,CAI Guowei,et al. Measurement algorithm of dielectric loss angle based on SSI-LS[J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):828-833.
- [18] 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 Rengang. Precise algorithms for harmonic analysis based on FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(12):106-110.
- 孙鹏(1958—),男,博士,教授,研究方向为电器理论与设计、继电保护的研究。
- 杨永越(1988—),男,硕士研究生,研究方向为电气设备在线监测和故障诊断。