

# 一种混合递推的 DFT 相量测量算法

杨力森, 汪芳宗, 孙水发

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 电力系统的稳定、安全、经济的运行需要快速准确地采集实时的电压和电流的有效值(幅值)与相位。然而, 电网的频率是波动的, 使采样很难做到对被测信号进行整周期截断, FFT 算法的栅栏效应和泄漏现象, 将导致明显的测量误差。提出一种混合递推的 DFT 相量测量算法。首先, 利用频谱修正法获得精确的电网频率, 然后采用相量校正算法纠正误差。通过滑动数据窗的递推算法提高了计算效率和时间响应, 仿真证实了所提算法是有效和可行的。

**关键词:** 相量测量; 递推 DFT; 频谱修正; 滑动窗口

## A mixed recurrence DFT algorithm for phasor measurements

YANG Li-sen, WANG Fang-zong, SUN Shui-fa

(College of Electrical Engineering and Information Technology,  
China Three Georges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Accurate and quick acquisition of effective values(or amplitudes) and phases of real time current and voltage is needed to guarantee the stability, security and economics of power systems. However, the frequency of the grid is always fluctuating, which makes the sampling signals non-synchronous. And the railing effect and leakage of FFT algorithm will result in obvious measurement errors. This paper introduces a mixed recursive DFT algorithm for phasor measurements. First, the spectrum correction theory is applied to obtain the precision frequency of the grid. Furthermore, an improved phasor computing algorithm is proposed to correct the error. This algorithm based on a sliding window can enhance the computational efficiency and time response greatly. The simulation results verify the effectiveness and practicability of the algorithm.

**Key words:** phasor measurements; recursive DFT; spectrum correction; sliding window

中图分类号: TM764 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)05-0023-05

## 0 引言

相量测量实际上包含对信号幅值、相角和频率这三个特征量的测量。近几年相量测量技术获得重大发展, 同步相量测量技术的应用研究正引起人们的极大兴趣, 目前国内外相量测量装置(PMU)正在推广应用于电力系统的各个方面<sup>[1]</sup>。所谓同步相量测量就是以 GPS 时间为基准对测量点上的电压和电流进行测量, 测量所得相量具有同一参考基准, 彼此间可以直接进行比较。

相量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, 其测试结果均很精确, 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<sup>[2]</sup>。文献[3, 4]对

PMU 测量误差来源进行了详细的分析, 相对从硬件方面采取措施提高相角测量精度, 改进测量算法提高测量精度更为可行。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。

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立叶变换, 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, 将产生频率泄漏其幅值、相位的计算结果是不准确的<sup>[5~10]</sup>。

本文提出一种混合递推的 DFT 相量测量算法。首先, 利用频谱修正法获得精确的电网频率, 然后采用相量校正算法纠正误差。

## 1 频谱泄露和栅栏现象及抑制方法

用 DFT 进行频谱分析时, 所要处理的信号均是

经过采样得到的数字信号。在实际量测时域信号时,观测信号的时间总是有限的,也就是对时域信号进行截断,截断就会造成能量泄露,该泄露就叫频谱泄露。如果采样是同步的,泄漏频谱在整数次谐波点上的幅值为零,则不会造成分析的误差。但是如果采样是非同步时,泄漏频谱在整数次谐波点上的幅值不为零,这时泄漏频谱将引起频谱分析误差。实际计算表明,频谱泄露产生的误差远大于数值积分误差和混叠误差(在正常的采样频率下),因此必须减少泄露误差。减少频谱泄露的方法一般有两种:

(1) 增加采样时间,即加宽窗长度。但这样会使数据增多,运算量和存储量都增加。

(2) 改变窗的形状。由于这些窗函数在时域上变化相对平缓,窗口边缘值为零,高频分量衰减快,旁瓣明显受到抑制,因此减少了频谱泄露。

连续的电参量信号在时域截断后,变成非周期信号,理论上应具有连续频谱,但用 DFT 计算信号的频谱,结果将是离散的,即只能给出连续频谱的离散抽样值,而得不到连续频率函数。这就如同通过“栅栏”观看景物一样,只能在离散点的地方看到真实景象,即只能观察到有限个频谱值,而每个间隔中的频谱就看不到了,把这种现象称为“栅栏效应”。减少栅栏效应的方法一般有两种:

(1) 加长数据的长度,即增加时域采样数据点数;

(2) 使频域抽样更密,即增加频域抽样点数  $N$ 。一般是在时域数据末端补零,使一个周期内的点数增加,但并不改变原记录数据。频域抽样为  $2\pi/N$ ,  $N$  增加,必然使样点间距离更近,谱线更密,谱线变密后原来看不到的谱分量就有可能看到了。补零起到对原  $X(\omega)$  做插值的作用,使离散谱的包络得到平滑。

通常情况下很难做到同步采样,这是因为电网频率总是处于不断的波动中,同时被测的电参量信号中除了含有基波分量之外还含有大量整数次和非整数次谐波分量(间谐波),即电参量信号不是严格理想的正弦周期信号,所以即使采用跟踪锁相技术,也不可能保证采样频率总是电参量信号工频的整数倍,即难以做到严格的同步采样<sup>[11]</sup>。

由于非周期采样进行非整周期截断,截断信号周期延拓后的新信号将再不等于原周期信号,会造成信号波形的间断,这就导致信号真实频率和频率分辨率之间的比值不再是一个整数,而是一个实数。这实际上就是信号的频率将处在离散频谱的两条相邻谱线之间,不再是对正某一谱线。正是因为频谱泄露和栅栏效应的影响,由谱线反映出的信号频

率、幅值和相位就都存在较大的误差,使测得的幅值、频率和相角偏离实际值,尤其相位测量误差更大,不能满足测量精度的要求。

## 2 频率测量原理

假设一个频率为  $f$ 、幅值为  $A$ 、初相位为  $\varphi$  的单一频率信号  $x(t)$ , 在经过了采样率为  $f_s$  的模数变换后得到如下形式的离散信号:

$$x(k) = A \sin(2\pi k f / f_s + \varphi) \quad (1)$$

窗函数  $w(n)$  的连续频谱为  $W(2\pi f)$ , 则加窗后该信号的离散傅立叶变换的表达式为

$$\bar{X}(k\Delta f) = (A/2j)e^{j\varphi} W(2\pi(k\Delta f - f)/f_s) \quad (2)$$

式中:  $\Delta f = f_s/N$  为离散频率间隔,也就是频率分辨率,  $N$  是数据截断长度。

峰值频率  $f = k_0\Delta f$  很难正好位于离散谱线频点上,也就是说,  $k_0$  一般不是整数。设峰值点左右两侧的谱线分别为第  $k_1$  和  $k_2$  条谱线,这两条谱线是峰值点附近幅值最大和次最大的谱线。显然,  $k_1 \leq k_0 \leq k_2 = k_1 + 1$ 。在离散频谱中找到这两条谱线,从而可确定  $k_1$  和  $k_2$ 。这两条谱线幅值分别是  $c_1 = |\bar{X}(k_1\Delta f)|$  和  $c_2 = |\bar{X}(k_2\Delta f)|$ , 令  $\alpha = k_0 - k_1 - 0.5$ , 由(2)式可得:

$$\frac{c_2 - c_1}{c_2 + c_1} = \frac{|W(2\pi(-\alpha + 0.5)/N)| - |W(2\pi(-\alpha - 0.5)/N)|}{|W(2\pi(-\alpha + 0.5)/N)| + |W(2\pi(-\alpha - 0.5)/N)|} \quad (3)$$

令  $\beta = (c_2 - c_1)/(c_2 + c_1)$ , 并且当  $N$  较大时,一般可以简化为  $\beta = g(\alpha)$ , 采用多项式逼近方法计算  $\alpha = g^{-1}(\beta)$ , 采用布莱克曼窗函数时<sup>[12, 13]</sup>

$$\alpha = 1.96043163\beta + 0.15277325\beta^3 + 0.07425838\beta^5 + 0.04998548\beta^7$$

可求得峰值频率:  $f = (\alpha + 0.5 + k_1)f_s/N$  (4)

考虑到电力系统的惯性,同步转速也就是频率的变化缓慢,这里取  $N = rM = 4M$ ,  $M$  为每周期采样点数,  $r$  为所需采集的信号周期数,取决于所用窗函数的半主瓣宽度和旁瓣宽度之比<sup>[14]</sup>。为了满足实时监测和控制的要求,要求 PMU 子站至少每隔 20 ms 发送一次数据<sup>[15]</sup>, 每采集  $M$  点数据后与前  $3M$  点数据一起计算一次。数据窗滑动的递推算法推导如下:

$$\text{采样数据 } x(k) \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \dots, \underbrace{rM-1}_{(r-1)M}$$

$$\text{加窗后的 DFT 为 } \bar{X}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\omega(k)W_N^{nk} \quad (5)$$

式中:  $\omega(k) = 0.42 - 0.5 \cos(2\pi k / N) + 0.08 \cos(4\pi k / N)$

$k = 0, 1, \dots, N-1$  为布莱克曼窗函数<sup>[17]</sup>,  $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$   
布莱克曼窗为余弦窗, 时域的乘积非常方便频域求取。

$$\bar{X}(n) = X(n) \otimes \Delta\Omega(n) \quad (6)$$

式中:  $X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)W_N^{nk}$ ,  $\Delta\Omega(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \omega(k)W_N^{nk}$

只要求出  $X(n)$  即可, 设某一数据窗的 DFT 为

$$X^1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)W_N^{nk} \quad (7)$$

则滑过  $p$  点新数据窗的 DFT 为

$$\begin{aligned} X^{\text{II}}(n) &= \sum_{k=p}^{N+p-1} x(k)W_N^{n(k-p)} = \sum_{k=p}^{N-1} x(k)W_N^{n(k-p)} + \\ &\quad \sum_{k=N}^{N+p-1} x(k)W_N^{n(k-p)} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)W_N^{n(k-p)} + \\ &\quad \sum_{k=0}^{p-1} x(k+N)W_N^{n(k+N-p)} - \sum_{k=0}^{p-1} x(k)W_N^{n(k-p)} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)W_N^{nk}W_N^{-pn} + \\ &\quad \sum_{k=0}^{p-1} x(k+N)W_N^{nk}W_N^{-pn} - \sum_{k=0}^{p-1} x(k)W_N^{nk}W_N^{-pn} = \\ &\quad W_N^{-pn} \left\{ X^1(n) + \sum_{k=0}^{p-1} [x(k+N) - x(k)]W_N^{nk} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

本文中取  $p = N/4 = M$ , 即每采样周期计算一次式 (8), 其中主要计算是

$$\sum_{k=0}^{p-1} [x(k+N) - x(k)]W_N^{nk} = \sum_{k=0}^{M-1} x(k+N)W_N^{nk} - \sum_{k=0}^{M-1} x(k)W_N^{nk} \quad (9)$$

### 3 相量校正算法

设第  $i$  个采样周期的采样时刻为  $t = t_i, t_i + T_s, \dots, t_i + kT_s, \dots$ , 其中, 采样间隔  $T_s = 1/f_s = 1/(Mf_0)$ ,  $M$  为每周期的采样点数,  $f_0$  为额定频率。与第  $i$  个采样周期对应的同步相量表示为:

$$\tilde{X}(i) = Ae^{j\varphi_i} \quad (10)$$

将一个采样周期范围内的频差  $\Delta f(t)$  表示为固定值  $\Delta f$ , 第  $i$  个采样周期的第  $k$  个采样值可表示为:

$$\begin{aligned} x_i(k) &= \sqrt{2}A \sin(2\pi k f / f_s + \varphi_i + 2\pi i / M) = \\ &= \sqrt{2}A \sin[2\pi k (f_0 + \Delta f) / f_s + \varphi_i + 2\pi i / M] = \\ &= \sqrt{2}A \sin[2\pi k (1 + \Delta f / f_0) / M + \varphi_i + 2\pi i / M] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{则}^{[16]} \quad X(i) = \left( \frac{\sqrt{2}}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_i(k)W_M^k \right) W_M^i \quad (12)$$

式中:  $W_M = e^{-j\frac{2\pi}{M}}$ , 将式 (11) 表示为指数形式并代入式 (12), 化简得:

$$X(i) = \frac{A}{M} \left[ e^{j\varphi_i} \sum_{k=0}^{M-1} W_M^{\frac{k\Delta f}{f_0}} - e^{-j(\varphi_i + \frac{4\pi}{M})} \sum_{k=0}^{M-1} W_M^{k(\frac{\Delta f}{f_0} + 2)} \right] \quad (13)$$

$$\text{又因为} \quad \sum_{k=0}^{M-1} W_M^{\frac{k\Delta f}{f_0}} = \sum_{k=0}^{M-1} e^{j\theta k} = \frac{\sin(\theta M / 2)}{\sin(\theta / 2)} e^{j\theta(M-1)/2} \quad (14)$$

$$\text{令} \quad \theta = \frac{2\pi\Delta f}{f_0 M} \quad (15)$$

式 (13) 可变换为:

$$\begin{aligned} X(i) &= \frac{A}{M} \left\{ e^{j\varphi_i} \frac{\sin(\theta M / 2)}{\sin(\theta / 2)} e^{j\theta(M-1)/2} - e^{-j\varphi_i} \times \right. \\ &\quad \left. \frac{\sin(\theta M / 2)}{\sin[(\theta + \frac{4\pi}{M})/2]} \times e^{-j[(\theta + \frac{4\pi}{M})(M-1)/2 + \frac{4\pi}{M}]} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

将式 (10) 代入式 (16), 得

$$X(i) = \tilde{X}(i) \frac{\sin(\theta M / 2)}{M \sin(\theta / 2)} e^{j\theta(M-1)/2} - b(i) \quad (17)$$

式中:

$$b(i) = \tilde{X}(i)^* \frac{\sin(\theta M / 2)}{M \sin[(\theta + \frac{4\pi}{M})/2]} \times e^{-j[(\theta + \frac{4\pi}{M})(M-1)/2 + \frac{4\pi}{M}]} \quad (18)$$

可见只要求出  $b(i)$  和  $\theta$ , 即可由  $X(i)$  得到精确的同步相量  $\tilde{X}(i)$ 。由式 (4) 知  $\theta$  已求得,  $b(i)$  可对式 (17) 每  $m$  次采样计算一次, 联立方程组可解得:

$$b(i) = \frac{X(i-m) - X(i)e^{-j\theta m}}{e^{-j\theta m} - e^{j(\theta + \frac{4\pi}{M})m}} \quad (19)$$

同步相量  $\tilde{X}(i)$  可按式校正得到:

$$\tilde{X}(i) = [X(i) - b(i)] \frac{M \sin(\theta / 2)}{\sin(\theta M / 2)} e^{-j\theta(M-1)/2} \quad (20)$$

这里我们取  $m = M$  来计算式 (19)。比较式 (9) 中  $\sum_{k=0}^{M-1} x(k)W_N^{nk}$  与式 (12) 中  $\sum_{k=0}^{M-1} x_i(k)W_M^k$  可见  $X(i)$  也

已求得, 当  $n=1$  又  $N=rM$  时, 可从式 (8) 中抽取  $X(i) = X^{\text{II}}(ri)$ , 因此处

$$x(k) = \begin{cases} x_i(k) & k = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0 & k = M, M+1, \dots, N-1 \end{cases}, \text{是在原每周} \\ \text{期采样数据后补零的 DFT 运算}^{[17]}。$$

### 4 仿真实验

为了验证所提出的改进算法, 本文对如下形式的信号进行谐波分析的仿真:

$$x(k) = \sum_{i=1}^9 A_i \sin(2\pi \frac{if}{f_s} k + \varphi_i) \quad (21)$$

其中:基波频率  $f$  为 50.5 Hz, 采样频率  $f_s$  为 4 800 Hz, 截断信号的数据长度  $N$  取 384 点, 基波和各次谐波的幅值(为无单位数值)和相位如表 1 所示。

表 1 仿真信号的谐波成分

Tab.1 Components of the simulated harmonic signal

仿真信号	谐波次数						
	基波	2	3	4	5	7	9
幅度	1.00	0.02	0.10	0.01	0.05	0.02	0.01
相位	50	10	20	20	40	60	80

表 2 仿真的结果

Tab.2 Simulated results

结果误差 /(%)	谐波次数						
	基波	2	3	4	5	7	9
幅度 /(%)	0.0025	0.3805	0.0191	0.1731	0.0182	0.0538	0.0669
相位 /(%)	-0.0190	1.5933	0.4174	5.6737	0.2593	-0.3969	-0.3566

由表 2 可见本算法具有精度高, 计算简单的特点, 实验结果证明了本文算法的有效性和易实现性。

## 5 结论

本文在长数据窗中采用频谱修正方法获得精确的电网频率, 然后在短数据窗中采用相量校正算法纠正误差, 有效地消除信号频率偏移额定频率时 DFT 算法的频率泄漏和栅栏效应的影响。通过滑动数据窗的递推算法提高了计算效率和响应时间, 简化了计算, 仿真证实了所提算法是有效和可行的。该算法可以方便地移植到 PMU 等基于微处理器的电力系统监控设备中, 从而实现对电网相量、谐波等的精确测量。

## 参考文献

- [1] 丁剑, 白晓民, 王文平, 等. 电力系统中基于同步数据的应用研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(6):78-84.  
DING Jian, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping, et al. Overview of Application Researches Based on Synchronous Data Measured by PMUs in Power System[J]. Relay, 2006, 34(6):78-84.
- [2] Depablos J, Centeno V, et al. Comparative Testing of Synchronized Phasor Measurement Units [J]. IEEE.
- [3] 王义军, 任先文, 范琦, 等. 同步相量测量单元及其误差分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2):66-69.  
WANG Yi-jun, REN Xian-wen, FAN Qi, et al. Synchronous Phasor Measurement Unit and Error

Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2):66-69.

- [4] 杨贵玉, 江道灼, 邱家驹, 等. 相角测量装置的同步相量测量精度问题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14):57-61.  
YANG Gui-yu, JIANG Dao-zhuo, QIU Jia-ju, et al. Synchronous Measurement Precision of Phasor Measurement Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14):57-61.
- [5] Benmouyal G. An Adaptive Sampling Interval Generator for Digital Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3):1602-1609.
- [6] 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.
- [7] 蔡菲娜, 张建奇. 一种非均匀同步采样及其 DFT 算法[J]. 电测与仪表, 2004, 41(6):11-13.  
CAI Fei-na, ZHANG Jian-qi. A Non-uniformity Synchronous Sampling and DFT Algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(6):11-13.
- [8] 黄纯, 何怡刚, 江亚群, 等. 交流采样同步方法分析与改进[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9):39-42.  
HUANG Chun, HE Yi-gang, JIANG Ya-qun, et al. Analysis and Improvement of Synchronization Technique for AC Sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9):39-42.
- [9] 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, LIU Bing-xu, et al. Study of DFT Algorithm in Synchronized Phasor Measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1):84-87.
- [10] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2):20-24.  
WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A DFT-based Method for Phasor and Power Measurement in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2):20-24.
- [11] 潘文, 钱愈寿, 周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(I)窗函数的研究[J]. 电工技术学报, 1991, 2(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, 1991, 2(1):50-54.
- [12] 张鸿博. 基于 DSP 的电能质量监测算法及监测装置的研究(硕士学位论文)[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.  
ZHANG Hong-bo. A Study on Algorithm and Equipment for Power Quality Monitoring Based on DSP, Thesis[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [13] 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.
- [14] 陈冬红. 电力系统谐波测量和分析方法研究(硕士学位论文)[D]. 南京:河海大学, 2005.  
CHEN Dong-hong. Research of the Methods for Measurement and Analysis on Power System Harmonics, Thesis[D]. Nanjing:Hohai University, 2005.
- [15] 严登俊,袁洪,高维忠,等.利用以太网和 ATM 技术实现电网运行状态实时监测[J]. 电力系统自动化,2003,27(10): 67-69.  
YAN Deng-jun,YUAN Hong,GAO Wei-zhong,et al. Real-time Monitoring System for the States of Power Network Over Ethernet and ATM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10):67-69.
- [16] 李建,谢小荣,韩英铎. 同步相量测量的若干关键问题[J]. 电力系统自动化, 2005,29(1):45-48.  
LI Jian,XIE Xiao-rong,HAN Ying-duo. Some Key Issues of Synchrophasor Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):45-48.
- [17] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.  
HU Guang-shu. Digital Signals Process-theory, Arithmetic and Achieve[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1997.

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2007-09-28

作者简介:

杨力森(1970-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事电力自动化系统的研究工作; E-mail: ylsyls@ctgu.edu.cn

汪芳宗(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电网一体化计算及并行分布式处理的研究工作;

孙水发(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事信息处理的研究工作。

(上接第 18 页 continued from page 18)

表 4 故障线路接有不同负荷时短路电流仿真数据

Tab.4 Simulation data of short-circuit current at different load of faulted line

负荷/VA		1+j2	50+j10	500+j100	(2+j1)*10 <sup>5</sup>	(2+0.9)*10 <sup>6</sup>
短路电流/kA	$I_F=10/\text{km}$	11.6	1.16	1.16	1.18	1.23

## 4 结语

配电网中短路电流的计算是确定中性点运行方式、绝缘配合、保护方式等方面的重要依据。在传统的计算中通常不考虑线路阻抗,这使得理论计算数据偏大。随着配电线路的不断增长,这种近似所带来的误差将会越来越大。本文充分考虑了线路阻抗的影响,利用对称分量法分析了单相短路电流的计算方法,并从理论和仿真的角度分析了故障位置、非故障线路及参数对短路电流的影响,最后通过仿真对负荷的影响做了初步的分析。为简化分析,本文对变压器的阻抗、负荷、非故障线路的阻抗做了近似处理。为更详尽地讨论配电网在不同接地方式下的短路电流的特性,还应建立更加完善的数学模型。

## 参考文献

- [1] 陈维江,蔡国雄. 10kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 56-60.  
CHEN Wei-jiang, CAI Guo-xiong. Neutral Grounding Mode in 10kV Distribution Network via Peterson Coil with Parallel Resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 56-60.
- [2] 曾祥君,尹项根. 配电网中性点接地方式改造探讨[J]. 电工技术杂志, 2002, (10): 5-8.  
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen. Discussion for Transformation of Neutral Grounding Method MV

Networks[J]. Transation Society,2002, (10): 5-8.

- [3] 张慧媛,丁杨. 城市电网中性点经电阻接地方式的应用探讨[J]. 高压电器, 1997, (1): 32-35.

ZHANG Hui-yuan, DING Yang. Application Discussion on Neutral Grounding Mode via Resistance on Urban Power Network[J]. High Voltage Unit, 1997, (1): 32-35.

- [4] 倪虹妹,周军. 电网中性点经电阻接地浅析[J]. 江西水利科技, 2004, 30 (5): 115-117.

NI Hong-mei, ZHOU Jun. Primary Discussion on Neutral Grounding Mode via Resistance of Network[J]. Science and Technology of Jiangxi Water Power, 2004, 30 (5): 115-117.

- [5] 陈慈萱. 过电压保护原理与运行技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

CHEN Ci-yuan. Over-voltage Protection Theory and Operating Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,2002.

- [6] Gatta F M, Geri A. Analytical Prediction of Abnormal Temporary Over-voltage due to Ground Faults in MV Networks[J]. Electric Power System Research,2007, 77(10):1305-1313.

收稿日期: 2007-10-26; 修回日期: 2007-12-04

作者简介:

顾秀芳(1974-), 女, 硕士, 从事电力系统分析及配电网自动化及其远程监控的教学和研究工作。E-mail: gxfhelo@sina.com