

# 基于相位差校正的电网频率高精度测量

贺建闽, 黄治清

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电网频率是重要的电能质量指标之一, 频率的高精度测量同时也是许多应用技术的基础。该文介绍一种基于相位差校正的电网频率测量方法。理论分析和仿真表明这种方法具有较强的抗干扰性, 其频率测量精度主要与信噪比、频率偏差及采样数据的长度有关。该方法原理简单、运算速度快、校正精度高, 能够满足电力系统测量实时性要求。

关键词: 电网频率测量; 相位差校正; 离散傅立叶变换

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)14-0043-05

## 0 引言

电网电压信号, 考虑有限次数谐波, 如式 (1) 所示。

$$u(t) = \sum_{h=1}^n U_{mh} \sin(2\pi h f_0 t + \theta_h(t)) \quad (1)$$

式 (1) 中: 将信号频偏影响归结到时变的初相角中, 电压信号基频即为测量点的电网频率

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_0 t + \theta_1(t))}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_1(t)}{dt} \quad (2)$$

式 (2) 中:  $f_0$  为电网额定频率, 50 Hz。由于电力系统运行的分布性、非线性、非平稳性和其它诸多因素的影响, 电网各点电压初相角变化不同, 造成电网各点的实测频率有所不同。

电流信号初相角变化通常较大, 根据式 (2) 可知, 由电流信号求得的基波频率变化也较大, 所以实测中总是以电压信号来测量电网频率。

电网频率测量技术研究的意义首先在于电网频率是电能质量体系中的一个重要指标, 其次电网频率测量不准将导致与频率相关的电气参数测量或计算出现较大误差。另外在电力系统中, 一些高新技术的应用需要高精度频率测量作保证<sup>[1]</sup>。现代测量技术中, 许多物理信号也转换为频率量进行测量, 所以测频技术的研究受到越来越多的重视, 它是保证测量精度的重要环节。

频率测量主要基于硬件测频技术和软件测频技术。常用的软件测频算法有周期法 (或称交零法)、解析法、误差最小化原理类算法、傅里叶算法、正交去调制法及其它方法<sup>[2]</sup>。周期法在实时测量仪器中应用较多, 作者在设计电能质量监测系统之初用的也是这种方法。实践证明周期法虽有原理简单、

易于实现的优点, 但其对噪声、谐波及间谐波的抗干扰能力较弱。本文介绍一种基于电压相位差校正的电网频率测量, 它具有原理明晰, 算法简洁, 计算剪度高, 对谐波、间谐波以及噪声具有较强的抗干扰能力。由于电网频率的特点在于其额定频率确定, 频率变化范围较小 (通常不超过  $\pm 0.1$  Hz), 所以相位差校正法很适于电网频率的高精度测量。

## 1 测量的基本原理

对于电压信号  $u(t)$ , 为分析叙述方便起见, 将电压考虑成为单一简谐信号

$$u(t) = U_m e^{j[2\pi(f_0 + f_0)t + \theta_0]} \quad (3)$$

式中:  $U_m$  为电压峰值;  $f_0$  为电网额定频率, 50 Hz;  $f_0$  为电网频率偏移;  $\theta_0$  为电压初相角, rad。

关于电压频率测量, Phadke 等人提出一种用电压相位变化测量频率的方法<sup>[3]</sup>。对电压信号  $u(t)$ , 用窗函数 (为便于说明, 本文以矩形窗为例) 截成两段, 如图 1 所示。在时间窗  $[0, T]$ 、 $[T, 2T]$  内对  $u(t)$  等间隔地各采  $N$  个点, 通常选择  $N$  为基 2 的整数即为 2 的幂, 通过离散傅立叶变换 (DFT), 求得  $U_2(f_0)$ 、 $U_1(f_0)$  的相位差及频率偏移  $f_0$ , 进而求得测量期间  $[0, 2T]$  的电网平均频率  $f_0 + f_0$ <sup>[3-6]</sup>。

经矩形窗分隔, 两段电压信号的表达式分别为

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m e^{j[2\pi(f_0 + f_0)t + \theta_0]} \\ u_2(t) &= U_m e^{j[2\pi(f_0 + f_0)t + 2\pi f_0 T + \theta_0]} \end{aligned} \quad (4)$$

设  $f_s$  为采样频率,  $S/f_s$  采样时间间隔  $t = 1/f_s$ ,  $s$  每个工频周期采样点数为  $f_s/f_0$ ; 时间窗宽度  $T$  为  $M$  个工频周期, 且  $T = M/f_0$ ,  $s$  每个时间窗内的采样点数  $N = T/t = Tf_s$ 。

$u_1(t)$  的傅里叶变换如式 (5) 所示。

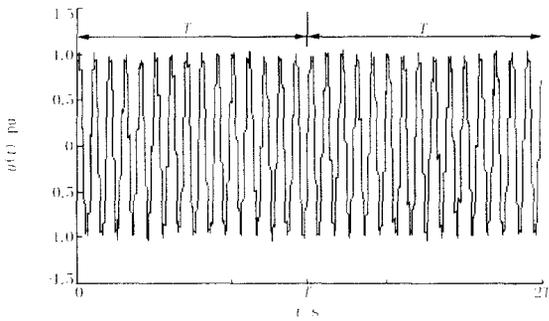


图 1 电压信号

Fig 1 Voltage signal

$$U_1(f) = \int_0^T u_1(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

式(5)的  $N$  点离散傅里叶变换如式(6)所示,其频谱的频率分辨率  $\Delta f = f_s/N = f_0/M = 1/T$ 。

$$U(k, f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n, t) e^{-j2\pi (k, f)(n, t)} = \frac{U_m e^{j\phi_0}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi (f_0 + f_0)n, t} e^{-j2\pi k, f n, t} = \frac{U_m e^{j\phi_0}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi (f_0 + f_0 - k, f) n, t} \quad (6)$$

对式(6)用等比级数求和并整理得

$$U_1(k, f) = \frac{U_m e^{j\phi_0} \sin[(f_0 + f_0 - k, f) N t]}{N \sin[(f_0 + f_0 - k, f) t]} e^{-j(f_0 + f_0 - k, f)(N-1)t} \quad (7a)$$

将  $T=N t=M/f_0$  和  $f=f_0/M$  代入式(7a),得

$$U_1(k, f) = \frac{U_m e^{j\phi_0} \sin[(M + f_0 T - k) t]}{N \sin[(M + f_0 T - k) t/N]} e^{-j(M + f_0 T - k)(N-1)/N} \quad (7b)$$

$U_1(k, f)$  频谱的第  $M+1$  根谱线对应的频率为  $M f=f_0$ , 其频谱为

$$U_1(M, f) = U_1(f_0) = \frac{U_m e^{j\phi_0} \sin(f_0 T)}{N \sin(f_0 T/N)} e^{-j f_0 T(N-1)/N} \quad (8)$$

同理,对于  $U_2(t)$ ,经  $N$  点 DFT 后,第  $M+1$  根谱线的频谱为

$$U_2(M, f) = U_2(f_0) = \frac{U_m e^{j(\phi_0 + 2\pi f_0 T)} \sin(f_0 T)}{N \sin(f_0 T/N)} e^{-j f_0 T(N-1)/N} \quad (9)$$

根据  $U_2(f_0)$  和  $U_1(f_0)$  的相位可求得  $u_2(t)$  和  $u_1(t)$  的相位差

$$= [ \phi_0 + 2\pi f_0 T - f_0 T(N-1)/N ] - [ \phi_0 - f_0 T(N-1)/N ] = 2\pi f_0 T \quad (10)$$

要注意的是,  $U_2(f_0)$  和  $U_1(f_0)$  的相位取值在

$[-\pi, \pi]$  之间, 可能在  $[-2\pi, 2\pi]$  之间,所以式(10)在实际应用中应作以下调整

$$\begin{cases} +2\pi, & < -\pi \\ -2\pi, & > \pi \end{cases}$$

经相位差校正后,测量期间的电网频率为

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 + \Delta\phi / (2\pi T) \quad (11)$$

对式(3)所给的单一简谐电压信号分析可得知由于频率偏移  $\Delta f$  的存在,使得采样时间窗宽度  $T$  不是信号真实周期  $1/(f_0 + \Delta f)$  的整数倍,这将造成频谱泄漏和栅栏效应。式(8)至式(11)分析表明,用 DFT 虽然不能准确地求出  $U_2(f_0)$  和  $U_1(f_0)$  的相位,但可以准确地求出二者的相位差。当  $\Delta f$  在国标《GB/T15945-95 电能质量,电力系统频率允许偏差》规定的最大频偏  $\pm 0.5$  Hz 范围内变化,仍可用相位差校正法准确地求出电网频率。

应该注意的是,时间窗宽度不能选得太大,原因之一一是时间窗太大可能使  $U_2(f_0)$  实际相位  $(2\pi f_0 T + \phi_0) > \pi$ , 而 DFT 计算所得相位在  $[-\pi, \pi]$  之间,从而产生较大的相位测量误差;原因之二是太大的时间窗可能使测得的电网频率不能真实反映时间窗内的频率波动情况。

## 2 谐波及间谐波对电网频率测量的影响

在式(3)所示的信号  $u(t)$  中加入谐波或间谐波成份  $u_h(t)$

$$u_h(t) = U_{hm} e^{j(2\pi h f_0 t + \phi_0)} \quad (12)$$

式中:  $h$  取整数或非整数。同上节一样,用矩形窗将  $u_h(t)$  截成两段,形成  $u_{h1}(t)$  和  $u_{h2}(t)$ 。在第一个时间窗  $[0, T]$  内对  $u_{h1}(t)$  的  $N$  个样点经 DFT,第  $M+1$  根谱线的频谱为

$$U_{1h}(M, f) = U_{1h}(f_0) = \frac{U_{hm} e^{j\phi_0} \sin[N(hf_0 - f_0)t]}{N \sin[(hf_0 - f_0)t]} e^{-j(hf_0 - f_0)(N-1)t} = \frac{U_{hm} e^{j\phi_0} \sin[(h-1)M]}{N \sin[(h-1)M/N]} e^{-j(h-1)M(N-1)/N} \quad (13)$$

取采样频率  $f_s = 6400$  S/s,时间窗宽度分别取 0.02 s 和 0.16 s,当谐波(间谐波)次数  $h$  在 0~6 之间变化时,  $U_{1h}(f_0)$  幅值和  $h f_0$  关系如图 2 表示。

$u_{2h}(t)$  的频谱分析方法同上,通过对式(13)和图 2 分析可得以下结论:

1) 当  $h$  为整数时,  $U_{1h}(f_0) = 0$  及  $U_{2h}(f_0) = 0$ , 表明频率为  $f_0$  整数倍次的谐波不会对相位差以及电网频率测量精度产生影响。

2)  $h$  不为  $f_0$  整数倍时,间谐波将对测量精度产

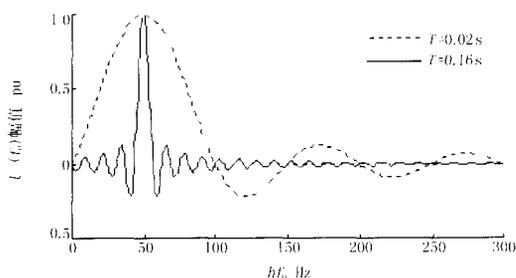
图2  $U_{1h}(f_0)$ 幅值和  $hf_0$ 的关系曲线

Fig 2 Amplitude-frequency characteristic

生影响,且  $hf_0$  距  $f_0$  越近、 $U_{1h}$  值越大,对相位差和电网频率测量精度的影响越大。

3) 时间窗宽度取 0.02 s,由图 2 可见,间谐波频率在一个较宽范围内取值,都将存在较大的  $U_{1h}(f_0)$ 。如果间谐波频率紧邻基波频率,将对基波频谱产生旁瓣甚至主瓣干涉,造成频谱混迭,从而导致相位和相位差测量误差。实践证明适当地加宽时间窗,如图 2 所示选取 0.16 s,能将间谐波的影响频率范围大大缩小,这表明适当增大时间窗宽度,对间谐波具有良好的抑制作用。

4) 式 (13) 表明抑制间谐波的影响不能靠提高信号的采样频率  $f_s$  来实现。

### 3 噪声对电网频率测量的影响

实践证明噪声是引起测量误差的一个主要原因,噪声主要来自两个方面,一是来自测量仪器硬件(如电源),另一方面来自 A/D 变换器的量化噪声,本文将这两种噪声合并讨论。通常假定观测数据中的噪声模型是均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的平稳高斯白噪声,可用式 (14) 来描述

$$u_x(t) = \sum_{i=1}^n U_{xi} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (14)$$

由前一节分析可知,高斯白噪声中只有接近被测信号基频的分量才会对基波信号相位差测量产生影响,而且这些分量的幅值越大,造成的测量误差越大。

所以在使用相位差校正法测量电网频率时,抑制高斯白噪声影响的有效途径是提高测量信号的信噪比以及加大测量的时间窗。

### 4 电网频率测量的工程实现

由于信号相位差的测量基于 DFT,所以使用相位差校正法测量电网频率时,测量仪软件实现可有以下 2 条途径:

1) FFT法:对  $[0, T]$ 、 $[T, 2T]$  的两段电压采样值分别进行  $N$  点 FFT 变换,求得  $U_2(f_0)$  和  $U_1(f_0)$  的相位差,根据式 (11) 计算电网频率。

2) 互功率谱法:对电压  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  的互相关函数  $R_{u_1u_2}(T)$  进行  $N$  点 FFT 变换,求得  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  的互功率谱  $S_{u_1u_2}(f)$ 。在仿真计算中,互功率谱可直接调用 MATLAB 中的  $CSD(u_1, u_2, N)$  函数;在实时监测软件设计中,则可采用诸如 LabWindows/CVI 中的  $CrossSpectrum(u_1, u_2, N)$  函数,互功率谱计算的基本原理是

$$S_{u_1u_2}(f) = F[R_{u_1u_2}(\cdot)] = U_1^*(f) U_2(f) \quad (15)$$

式中:  $U_1^*(f)$  是  $U_1(f)$  的共轭复数,  $S_{u_1u_2}(f_0)$  中包含了  $u_2(t)$  和  $u_1(t)$  的基波分量相位差,通过相位差校正同样可求得电网频率。

以上两种算法编程复杂程度相当,当采样时间宽度选择足够大,例如大于 4 个工频周波,二者的频率测量精度相当,均能达到设计要求,因此都可应用于电网电能质量监测系统的频率测量模块。但是在 MATLAB 平台上的多次仿真实验,发现调用  $CSD(u_1, u_2, N)$  函数的互功率谱法耗时较 FFT 法大,二者的耗时比约为 5:1,所以在实际工作中作者采用 FFT 法。

### 5 仿真算例

参照电网的实际情况,电压信号参数设定如表 1 所示,采样频率  $f_s = 6400$  S/s

表 1 电压信号参数

Tab 1 Parameters of voltage signal			
信号成份	幅值 / p. u	频率 / Hz	初相角 / rad
基波	1.000	$f_0 + f_0$	/6
3次谐波	0.015	$3(f_0 + f_0)$	/5
5次谐波	0.015	$5(f_0 + f_0)$	/4
7次谐波	0.010	$7(f_0 + f_0)$	/3
噪声	由电压信号的信噪比确定		

算例 1 仅考虑电压基波和谐波分量,不考虑高斯白噪声影响,时间窗宽度  $T = 0.02$  s,电网频率偏移在  $\pm 0.5$  Hz 范围内变动,分别用 FFT 法和互功率谱法,设定的电网实际频率和仿真测量频率如图 3 表示,频率测量误差如图 4 所示。

算例 1 说明在信号中不存在噪声而仅有谐波分量的情况下,用相位差校正法测量电网频率能够达到很高的精度,并且在这种情况下对测量时间窗宽度没有特别的要求。

算例 2 信号如表 1 所示,设定时间窗宽度  $T =$

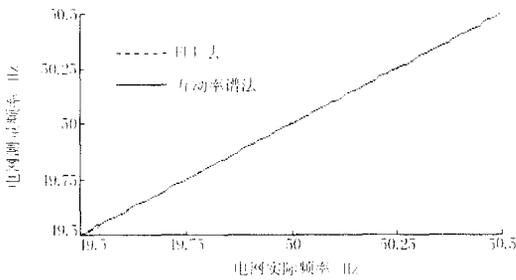


图 3 电网实际频率和测量频率关系

Fig 3 Relationship between real and measured value of power system frequency

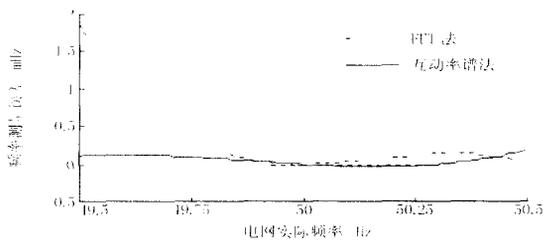


图 4 电网频率测量误差

Fig 4 Measured error of power system frequency

0.16 s, 分别选择电网频率偏移为 -0.5 Hz 和 -0.05 Hz, 电压信噪比取值为 10 ~ 70 dB, 用 FFT 法, 信噪比和频率测量误差关系如图 5 所示。

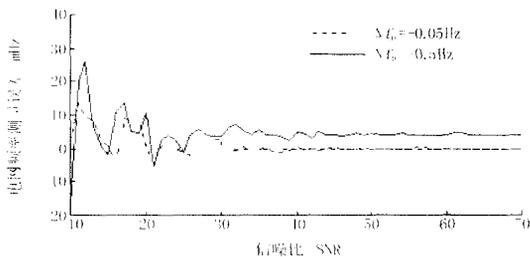


图 5 信噪比和电网频率测量误差的关系

Fig 5 Relationship between SNR and the measured error of power system frequency

算例 2 说明噪声是引起电网频率测量误差的一个主要原因。噪声越大或电网频率偏移越大, 频率测量的误差也越大, 因此提高测量信号的信噪比是抑制噪声影响的有效途径。

算例 3 信号如表 1 所示, 电压信噪比取 40 dB, 电网频率偏移取 -0.1 Hz, 分别用 FFT 法和互功率谱法, 测量时间窗宽度和频率测量误差关系如图 6 所示。

算例 3 说明了基于相位差校正的电网频率测量方法的有效性和实用性。作者近年在各地电网所作

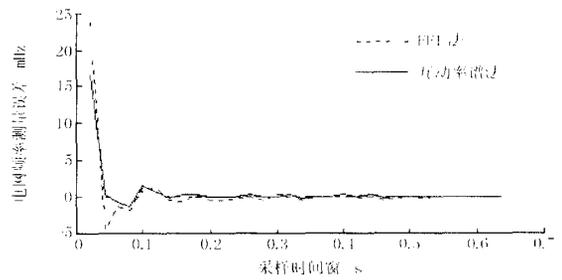


图 6 测量时间窗宽度和电网频率测量误差关系

Fig 6 Relationship between time window length and frequency measured error

测量证实我国 110 kV、220 kV 电网频率大部分时间在 49.95 ~ 50.05 Hz 之间变动, 很少超出 49.90 ~ 50.10 Hz。在上述条件下进行的多次仿真结果表明, 采样时间窗宽度选择 8 个工频周波, 可以将电网频率测量误差控制在 ±1 mHz 以内, 所以在实测中, 时间窗宽度选择 4 ~ 8 个工频周波能够满足电网频率测量的精度要求。

### 6 结束语

电网频率较为稳定, 在绝大部分时段内不超过 50 ± 0.1 Hz, 相对于频率变化范围较大的信号, 如无线电信号、机械振动信号, 电网频率测量较为容易实现, 但要作到电网频率高精度测量仍然是一件困难的事。对于电网频率监测, 国标 GB/T15945 - 95 规定测量仪的绝对误差值不得超过 10 mHz, 电力系统中的一些新技术应用可能要求更高精度的频率测量。本文介绍一种基于相位差校正的电网频率测量方法, 并对测量误差原因进行了分析。理论分析和仿真结果表明, 电网频率偏移、谐波和间谐波、噪声都是造成测量误差的原因, 其中噪声的影响最大。适当选择测量时间窗宽度是提高相位差校正法测频精度主要的也是有效的途径, 而无需过多地提高采样频率和 A/D 转换精度。国内现行大多数电能质量测量仪每通道采样率为 128 点/周波、12 ~ 16 位 A/D 转换、每次测量时间窗为 4 ~ 8 个工频周波, 能够满足电网频率高精度测量的要求。本文介绍方法具有原理简单、计算精度高、抗干扰性强的优点, 这种方法不仅适用于矩形窗, 而且能很好地适用于各种余弦窗。

### 参考文献:

[1] 肖遥, 孟·让·柯洛德. 电力系统频率测量误差成因分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(1): 39-42

- XIAO Yao, Maun Jean-Claude. Analysis on Error in Power System Frequency Measurement[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 39-42
- [2] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 54-57.
- XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo. An Overview on Power System Frequency Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 54-57.
- [3] Phadke A G, Thorp J S, Adamiak M G. A New Measurement for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency[J]. IEEE Trans on PAS, 1983, 102(5): 1025-1038
- [4] 刘渝. 正弦波频率快速估计方法[J]. 数据采集与处理, 1998, 13(1): 7-11.
- LU Yu. Fast Frequency Estimation of Single Tone[J]. Journal of Data Acquisition Processing, 1998, 13(1): 7-11.
- [5] 谢明,张晓飞,丁康. 频谱分析中用于相位和频率校正的相位差校正法[J]. 振动工程学报, 1999, 12(4): 454-458.
- XIE Ming, ZHANG Xiao-fei, DING Kang. A Phase Difference Correction Method for Phase Frequency Correction in Spectral Analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(4): 454-458
- [6] 丁康,钟舜聪,朱小勇. 离散频谱相位差校正方法研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 52-55.
- DING Kang, ZHONG Shun-cong, ZHU Xiao-yong. Phase Difference Correcting Method for Calibration of Discrete Spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(2): 52-55.
- [7] 刘灿涛,赵伟. 频偏对数字积分法测量相位差影响的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 63-66.
- LIU Can-tao, ZHAO Wei. Research for the Effect of Frequency Winding to Measuring Phase Difference with Digital Integral Method[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 63-66

收稿日期: 2004-11-20; 修回日期: 2004-12-23

作者简介:

贺建闽(1955-),男,硕士,副教授,研究方向为电气化铁道供电系统、电网电能质量测控技术; E-mail: hjmhyx@163.com

黄治清(1958-),女,副教授,学士,研究方向为电力系统自动化、电网电能质量测控及虚拟仪器设计。

## Power system frequency high-precision measurement based on phase difference correction method

HE Jian-min, HUANG Zhi-qing

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Power system frequency is one of the most important indexes of power quality. The high-precision frequency measurement is the base of a great deal of applied technologies. In this paper, a phase difference correction method is presented to correct the power frequency. This method has strong anti-disturbance capability by theoretical analysis and simulation. Frequency measuring accuracy is mainly related to signal-to-noise ratio (SNR), frequency excursion and the length of sampled data. With the characteristic of principle simple, high speed and accuracy, the method can meet the need of real-time frequency measurement in power system.

**Key words:** power system frequency measurement; phase difference correction method; DFT

(上接第 10 页 continued from page 10)

## The integrated protection for power network

BO Zhi-qian<sup>1</sup>, HE Jing-han<sup>2</sup>, DONG Xin-zhou<sup>3</sup>

(1. AREVAT & D Automation, Britain; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper presents a novel protection and automation scheme for distribution networks called transient polarity directional comparison scheme. The technique is based on the detection and processing of fault generated transient current signals, in which specially designed protection relays are installed at each substation of a distribution network. The transient detection unit of the relay detects the fault generated super-imposed current signals. The transient polarity identification algorithm is then applied to the super-imposed signals to identify the polarity of the signal detected. The direction of a fault is determined by comparison of the polarity of the signals derived from all the line sections connected to the substation. The actual faulted section is identified by processing the directional information from various substations, with which the integrated protection of power network is realized.

**Key words:** transient based protection; polarity comparison; integrated protection