

# 基于离散正弦滤波的智能电器瞬动保护算法的研究

王克星, 王建华, 宋政湘, 耿英三

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 智能电器要求在出现大短路电流情况下尽快起动瞬动保护清除故障, 但目前瞬动保护算法难以保证在各种短路情况下都能快速清除故障。文中对这一问题进行了研究, 提出了基于离散正弦滤波(DSF)的瞬动保护算法, 该算法先用长度较短的离散正弦滤波器对短路电流信号进行滤波, 有效滤除了故障信号中的非周期分量和高频分量, 然后用快速幅值算法计算短路电流大小。算法的实现简洁快速, 兼顾瞬动保护的快速性和可靠性。不但有效地保护了线路和设备, 而且能缩短短路引起的电压暂降的持续时间, 提高配电系统的供电质量。

**关键词:** 瞬动保护; 离散正弦滤波; 电压暂降; 配电网; 智能控制器

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0020-05

## 0 引言

电力系统运行中, 由于雷电、风雨雪、设备及线路的绝缘老化等因素, 会引起不同相之间或者相和地之间的非正常连接, 造成短路故障。短路故障会造成回路中发热和电动力, 引起临近线路的电压下降, 严重的短路故障甚至会破坏系统的稳定运行<sup>[1]</sup>。短路故障对电力系统的危害严重, 保护装置必须尽快发现和清除短路故障。智能脱扣器是置于变电站、开关柜及配电系统, 实现测量、保护、控制和通信等功能的智能型低压断路器。智能脱扣器的故障保护功能主要通过过流反时限长延时、短路短延时、短路瞬动三段式电流保护和接地保护实现。瞬动保护主要在出现大的故障电流时启动, 无延时切除故障, 最大限度地保护线路和设备。

目前智能控制器采用的瞬动保护算法主要有3种, 但都无法在保护的可靠性和速动性上达到统一。

1) 离散傅里叶变换算法。以全周期傅里叶变换提取故障电流信号的基波有效值进行故障保护, 算法精度最高, 但是由于计算时间超过一个周期, 因此速动性差。后来, 为了提高判断速度, 改用半周期傅里叶变换算法<sup>[2]</sup>, 半周期傅里叶变换的精度略低于全周期, 但判断速度缩短到半个周期。

2) 瞬时采样值比较算法。该算法先根据瞬动保护整定值给出检测阈值, 如果连续多个(一般3个)瞬时值超过阈值, 则满足瞬动保护条件。该算法的特点是实现简洁, 适合三相对称短路情况, 而对

于单相、两相不对称短路情况, 判断时间则从几个采样点到半个周期不等, 而且该算法容易受到非周期衰减分量的干扰, 可靠性一般。

3) 导数判断算法<sup>[3,4]</sup>。该算法高速采样故障电流信号, 计算采样电流的一阶或者多阶导数, 分析并建立电流  $i(t)$  和它的导数  $di(t)/dt$  之间的关系图, 将  $di(t)/dt - i(t)$  平面区域分为短路区和非短路区。如果连续多个瞬时电流值及其导数结果落在短路区, 则瞬动保护启动。这种算法通过对短路电流的预测达到尽可能快地判断出瞬动故障, 虽然速度很快, 算法也不复杂, 但由于没有滤波, 容易受非周期和暂态干扰的影响, 可靠性一般。另外, 较高的硬件系统要求也限制了其在低压领域的应用。

由于生产自动化水平提高和设备的电压暂降敏感性增加, 电压暂降每年给工商业用户造成巨大的经济损失, 而短路故障则是导致电压暂降的主要根源<sup>[5~7]</sup>。设备的电压暂降可接受性曲线标准如 CBEMA 曲线、ITIC 曲线以及 SEMI F47 曲线<sup>[8]</sup> 由相关行业组织制定。这些曲线表明, 缩短电压暂降持续时间是减弱其影响的重要途径, 因而需要加强短路快速保护技术的研究。

离散正弦滤波(discrete sinusoid-filtering, DSF)源自傅里叶变换和离散余弦变换<sup>[9,10]</sup>, 不但能够滤除周期信号中的非周期直流衰减量和高频谐波分量, 而且滤波周期短(10 ms ~ 1.25 ms), 适合短路故障电流的计算, 兼顾了保护的速动性和可靠性。本文对基于 DSF 的瞬动保护算法进行分析, 并用 1/8 周期的 DSF 实现配电网智能控制器的瞬动保护。该算法和瞬时采样比较算法相结合, 可以将短路保

基金项目: 国家博士点学科专项基金资助项目(2000069808)

护时间大大缩短,同时也削弱了故障引起的电压暂降的影响,提高了配电网的供电质量。

## 1 瞬动保护算法原理

发生短路时,短路电流将达到额定电流的几倍甚至几十倍,电流的相位也会发生跳变。短路电流经过一段时间的过渡后达到稳态,过渡过程的时间和发电机性能、短路位置有关。短路故障发生初期,短路电流由稳态周期分量、非周期衰减分量、周期衰减分量以及短路发生时的高频分量组成<sup>[1]</sup>。在低压网络中,短路电流不含有周期衰减分量,由于低压网络电阻较大,非周期衰减量通常在2个周期内衰减完毕。在短路后2个周期内,短路电流含有的非周期衰减分量和高频分量会影响保护判断精度,因此在计算配电网短路电流的时候要滤除这两个因素的干扰。

离散正弦滤波(DSF)根据原始信号的采样率和滤波要求决定正弦滤波器长度,用正弦滤波器和原始信号卷积,实现带通滤波。DSF的滤波器是一个完整的正弦波,因此可滤除短路电流信号中的非周期直流衰减量。根据傅里叶变换的频谱特性<sup>[9]</sup>,DSF可以滤除故障电流信号中频率高于正弦滤波器的高次谐波。因此,DSF可以保证配电网短路电流计算的可靠性。

DSF的滤波器长度可以根据信号的采样频率以及滤波要求做相应调整,滤波周期从1/2到1/16周期(10 ms~1.25 ms)。辅以快速幅值/有效值计算方法,即可在一个滤波周期后就计算出故障电流大小,大大提高了故障电流计算速度。

基于DSF的瞬动保护算法由2部分组成:DSF滤波和幅值/有效值计算。

## 2 离散正弦滤波及其滤波器设计

滤波的关键是滤波器的设计和选择,根据故障电流特点,滤波器要满足2个条件:滤波周期短和实现对50 Hz周期信号的带通滤波。滤波周期短是因为保护速动性的要求,滤波周期 $T_F$ 由滤波器(系数)长度 $L_F$ 以及原始信号的采样频率 $F_S$ 决定。滤波周期 $T_F$ 的计算公式为:

$$T_F = \frac{L_F}{F_S} \quad (1)$$

例如,假设原始信号采样率 $F_S = 4.8$  kHz,滤波器长度 $L_F = 12$ ,则滤波周期 $T_F = 2.5$  ms。

离散正弦滤波DSF是一个增益为 $g$ 的正弦信

号,进行 $N$ 点(偶数)的均匀离散,得到的 $N$ 个值作为滤波器系数,将该滤波器同原始采样信号卷积,从而实现原始信号的离散正弦滤波。

长度为 $L_F$ 的DSF滤波器系数序列 $FC_M$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} FC_M = g \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L_F}k + \frac{\pi}{L_F}\right) \\ k = [0, 1, \dots, (L_F - 1)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $g$ 表示增益系数,由原始信号的采样频率决定。

式(3)给出DSF滤波过程的计算公式, $i_s[k]$ 表示第 $k$ 个采样值, $I_{imag}[k]$ 表示第 $k$ 个DSF滤波结果。

$$\begin{cases} I_{imag}[k] = \sum_{j=1}^{L_F} FC_M[j] \cdot i_s[k-j] \\ k = L_F, L_F + 1, L_F + 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

滤波周期 $T_F$ 可调是DSF的特点之一。对于采样率为4.8 kHz的电流信号(每周期96个采样点),其滤波器长度可以为12、16、24、32、48点等,相应的滤波周期为2.5、3.33、5、6.67、10 ms,12点滤波器增益系数 $g = 0.666$ 。DSF滤波周期较短,其滤波器系数具有对称性和周期性,可以滤除信号中直流分量和高频分量,满足了故障信号滤波的要求,保证了配电网瞬动保护的可靠性和速动性。

## 3 幅值和有效值的快速算法

假设故障电流的采样频率为 $F_S$ (每周期采样点数 $N_S$ ),其DSF结果可以看作幅值为 $I_m$ 的正弦波 $I_{imag}$ ,表达式为:

$$\begin{cases} I_{imag} = I_m \sin(Wk + \theta) \\ W = \frac{2\pi}{N_S}, \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta$ 为初相角。

设 $I_{real} = I_m \cos(Wk + \theta)$ ,相邻采样点间的角度为 $\Delta = 2\pi / N_S$ ,则第 $k-1$ 个滤波值为:

$$\begin{aligned} I_{imag}[k-1] &= I_m \sin(Wk + \theta - \Delta) = \\ I_m [\sin(Wk + \theta) \cos \Delta - \cos(Wk + \theta) \sin \Delta] &= \\ I_{imag}[k] \cos \Delta - I_{real}[k] \sin \Delta & \quad (5) \end{aligned}$$

重新整理式(5),得到 $I_{real}[k]$ 的计算公式:

$$I_{real}[k] = \frac{I_{imag}[k] \cos \Delta - I_{imag}[k-1]}{\sin \Delta} \quad (6)$$

$I_{real}[k]$ 可以通过 $I_{imag}[k]$ 及其前一个值得到,则幅值 $I_m[k]$ 和有效值 $I[k]$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} I_m[k] = \sqrt{I_{\text{real}}^2[k] + I_{\text{imag}}^2[k]} \\ I[k] = \frac{I_m[k]}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (7)$$

这样,故障电流信号的幅值和有效值可以根据 DSF 滤波结果,按照式(6)和式(7)计算出来,该算法实现简单、速度快。

## 4 基于离散正弦滤波瞬动保护算法的应用研究

### 4.1 算法的应用分析

本节以  $1/8$  周期的 DSF 为例阐述不对称短路情况下的瞬动保护算法。原始信号的采样率均为  $4.8 \text{ kHz}$ (每周期 96 个采样点),  $1/8$  周期 DSF 滤波器长度为 12, 增益系数  $g = 0.666$ 。

图 1 给出了故障相角为  $210^\circ$  的单相短路电流波形及其 DSF 滤波有效值计算结果。图中细实线  $L_1$  表示短路电流信号,故障时刻  $P_1$ , 采样频率为  $4.8 \text{ kHz}$ 。 $1/8$  周期的 DSF 滤波结果如图 1 中实点线  $L_2$  所示,有效值计算结果则为图中实点线  $L_3$  所示。

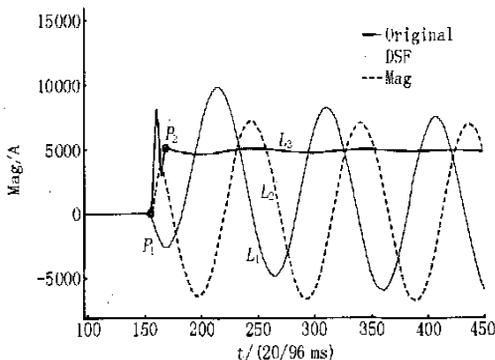


图 1 故障相角为  $210^\circ$  的单相短路电流信号的 DSF 滤波及幅值计算

Fig. 1 DSF filtering and amplitude of single-phase short circuit current on  $210^\circ$  degree fault phase angle

从图 1 的计算结果可以看到,从  $P_1$  到  $P_2$  中间的 11 个幅值计算结果跳跃剧烈,说明 DSF 滤波过程中电流波形畸变处有一个滤波器长度的过渡过程;从  $P_2$  以后的有效值计算结果趋于平稳。图 1 中短路电流有效值为  $4860 \text{ A}$ ,  $P_2$  处计算得到的有效值为  $4975 \text{ A}$ ,误差很小,从  $L_2$  用 DSF 基本滤除了非周期衰减分量,保证了有效值计算结果的准确性。虽然 DSF 结果和原始信号相比,相位发生了变换,但这并不影响短路电流有效值的计算。

图 2 给出了故障相角为  $270^\circ$  的单相短路电流波形及其 DSF 滤波和有效值计算结果。细实线  $L_1$  所

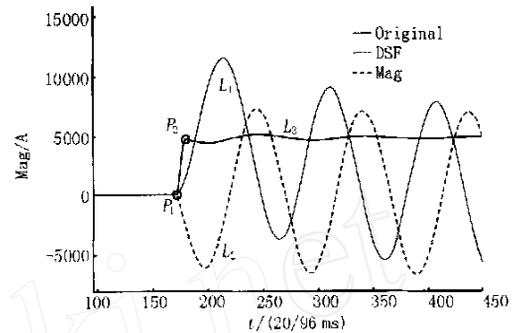


图 2 故障相角为  $270^\circ$  的单相短路电流信号的 DSF 滤波及幅值计算

Fig. 2 DSF filtering and amplitude of single-phase short circuit current on  $270^\circ$  degree fault phase angle

示为短路电流波形,采样频率  $4.8 \text{ kHz}$ ,  $P_1$  处发生故障,故障后电流信号中包含有非周期直流衰减分量以及暂态扰动分量。图 2 中线  $L_2$  为采用  $1/8$  周期 DSF 滤波结果,  $L_2$  较为光滑且无直流衰减,说明 DSF 已经有效滤除了短路电流中非周期衰减分量和暂态分量。图 2 中的点线  $L_3$  为短路电流的有效值计算结果。 $P_1$  和  $P_2$  点间距离 12 个点,为 1 个滤波长度,  $P_1$  和  $P_2$  点间的电流幅值波动较大。 $P_2$  点有效值为  $4635 \text{ A}$ ,实际短路电流为  $4860 \text{ A}$ ,误差很小。

从图 1 和图 2 的仿真计算结果可以看出,基于  $1/8$  周期 DSF 的快速故障保护算法,可以有效滤除故障信号中的非周期衰减分量和暂态分量,不受故障相角的影响,计算速度快,结果可靠性较好,精度较高,满足了智能监控器对瞬动保护精度和速度的要求。

### 4.2 算法的讨论

#### 1) 谐波、毛刺等扰动的影响

现在讨论  $1/8$  DSF 滤波算法在信号中有毛刺、谐波时的应用。图 3 给出了含有毛刺和  $10\%$  的 2 次谐波的电流信号的 DSF 滤波及幅值计算结果,细实线  $L_1$  为原始电流信号,实点线  $L_2$  和  $L_3$  分别为 DSF 滤波结果和幅值计算结果。图中,点  $P_1$  是一个 2 倍幅值的毛刺(坏点),在  $P_2$  点后的波形中含有 2 次谐波。

从图 3 毛刺点  $P_1$  的影响看,DSF 滤波结果  $L_2$  受到毛刺等采样点跳变的影响较大,其影响需要 1 个滤波周期才能消除,相应的幅值计算结果波动大,波动持续时间也为 1 个滤波周期。分析结果说明 DSF 和傅里叶滤波一样,易受毛刺、振荡等扰动的影响,但是这些影响可以在采样时通过逐点比对方法消除。

图3表明DSF滤波及幅值计算受谐波的影响较大,DSF滤波结果仍然含有并放大了谐波畸变,因此幅值计算结果呈周期性波动,影响了幅值计算的精度。

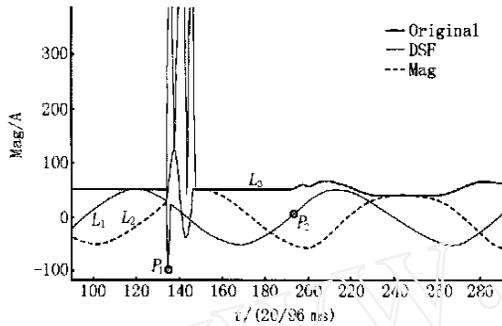


图3 含有毛刺、2次谐波信号的DSF滤波及幅值计算

Fig.3 DSF filtering and amplitude of current which include burrs and secondary harmonics

图4给出了1/8 DSF滤波的频谱分析结果。设S为DSF滤波器长度和基波长度的比值,图4中S=0.125。从频谱分析结果可以看出,2到2/S次谐波对DSF滤波结果影响较大,且(1/S-1)次谐波影响最大。DSF滤波结果容易受到高次谐波的干扰,这是其较短的滤波器长度决定的,也是短滤波器的固有弱点。由于故障发生后2个周期内,故障电流内的谐波分量和非周期分量及高频暂态量相比要小得多,不是主要干扰因素,而且智能控制器对瞬动保护的精度要求并不高,因此将DSF用于故障信号的滤波来实现瞬动保护,其精度是可靠的。

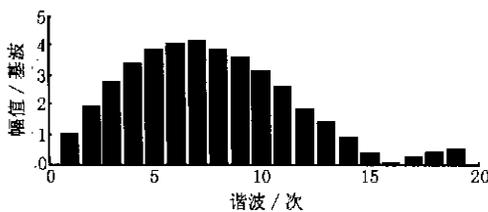


图4 1/8周期DSF的频谱

Fig.4 One-eighth DSF spectrum

### 2) 滤波器长度 $L_F$ 和采样频率 $F_S$ 的讨论

本文所用分析信号的采样频率为4.8 kHz,每周期96个采样点,以1/8周期的DSF滤波器对其进行滤波。在实际应用中,可以根据保护装置的具体性能和保护要求灵活改变  $L_F$  和  $F_S$ 。滤波器长度越大,滤波效果越好,相应的幅值计算精度越高,但是滤波周期会相应加长。滤波器长度越短,滤波效果越差,相应的幅值计算结果精度随之降低,但是滤波

周期变短,快速性好。例如,如果每周期48个采样点的信号,采样频率2.4 kHz,滤波器长度可以取8、12、16、24,对应的滤波周期为3.33、5、6.67、10 ms。

### 3) 快速幅值计算方法的讨论

本文给出的快速幅值计算方法,是利用DSF滤波结果的前2个值  $k-1$  和  $k-2$  计算  $k$  点幅值,速度快,但是对扰动没有补偿作用。如果采用  $k-1$  和  $k+1$  点DSF结果计算幅值,计算公式如式(8)所示,虽然滞后了一个采样点,但是幅值计算结果要略优于前者,而且计算量减少了。由此,可以通过多个DSF滤波结果计算电流幅值,在一定程度上可提高计算精度。此外,为了提高保护精度,可以采用多个幅值计算结果取平均等方法进行保护判断。

$$I_{real}[k] = \frac{I_{imag}[k+1] - I_{imag}[k-1]}{2\sin} \quad (8)$$

## 5 智能控制器瞬动保护算法的实现

目前,配电网中实现保护功能的智能控制器有相当一部分仍采用基于8/16位单片机的硬件系统,采样率在0.6~1.6 kHz之间;有一部分也采用基于32位单片机和DSP的高性能硬件系统。不同性能的硬件系统有不同的计算和采样能力,因此基于DSF的瞬动保护算法的实现也有不同。对于高性能硬件系统,可以直接用高采样频率实现,而对于性能一般的系统,则需要采用变采样频率的办法实现瞬动保护。现以基于MSP430F149的智能控制器为例,说明本文提出的瞬动保护算法的实现。MSP430F149具有硬件乘法器,采样频率可达200 ksp/s,硬件可灵活配置<sup>[11]</sup>。信号的高、低采样率分别为4.8 kHz和1.6 kHz,1/8周期DSF滤波的滤波器长度为12,基于DSF的瞬动保护的实现包括以下4个步骤:

1) 采样。系统正常运行时以1.6 kHz频率采样电流信号,而测量和延时保护计算所用采样频率则为0.8 kHz;

2) 预处理和算法启动判断。由于基于DSF的瞬动保护算法易受毛刺、振荡等干扰,因此在算法启动判断时必须先要进行数据预处理,以补偿这些坏点,防止保护的误起动。为了判断故障的发生,用临近周期采样点幅值变化幅度和设定阈值比较去实现;

3) DSF滤波和幅值/有效值计算。保护算法一旦启动,立刻提高系统的采样频率至4.8 kHz。在一个DSF滤波周期后,开始逐点进行DSF滤波,并且根据DSF滤波结果逐点计算出故障电流的幅值;

4) 瞬动保护判断。用计算得到的故障电流幅值和设定瞬动保护阈值比较,如果连续多点平均值高于阈值,则瞬动保护条件满足。否则,判为保护误动作或故障电流较小,恢复 1.6 kHz 的采样频率。

## 6 结论

本文提出的基于 DSF 的瞬动保护算法在精度和速度上满足了智能电器瞬动保护的要求,实现简单快速,可以用于大部分现有的配电系统硬件平台,有较高的实用意义。此外,由于该算法可以大大缩短短路故障判断时间,在一定程度上削弱了因短路引起的电压暂降,对改善配电网供电质量有着重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 李德铜 (LI De-ju). 实用短路电流计算 (Practicable Short Circuit Current Calculation) [M]. 天津:天津科学技术出版社 (Tianjin: Tianjin Science & Technology Press), 1995.
- [2] 牟龙华 (MOU Long-hua). 基于半波傅氏算法的补偿电网接地选线保护 (Selective Ground-fault Protection Based on Half-wave Fourier Algorithm for Arc-suppression Coil Neutral Grounded Systems) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2000, 27(3): 17-20.
- [3] 许志红, 张培铭, 颜毅鹏 (XU Zhi-hong, ZHANG Pei-ming, YAN Yi-peng). 新型低压断路器 (A New Type of Low Voltage Circuit Breaker) [J]. 低压电器 (Low Voltage Apparatus), 1999, (6): 15-18.
- [4] 周志敏 (ZHOU Zhi-min). 国内智能电器的现状与发展趋势 (The Present Condition and Developing Tendency of Domestic Intelligent Electric Apparatus) [J]. 电气开关 (Electric Switchgear), 2002, (6): 1-4.

- [5] Bollen M H J. Voltage Sags in Three-phase Systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, (9).
- [6] Dorr D S, Hughes M B, Gruzs T M, et al. Interpreting Recent Power Quality Surveys to Define the Electrical Environment [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(6): 1480-1487.
- [7] Sullivan M J, Vardell T, Johnson M. Power Interruption Costs to Industrial and Commercial Consumers of Electricity [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(6): 1448-1457.
- [8] EPRI. Power Quality for Business and Industry: Definitions, Equipment Compatibility, Solutions [M]. EPRI Inc, 2001.
- [9] 胡广书 (HU Guang-shu). 数字信号处理——理论与算法与实现 (Digital Signal Processing——Theory, Algorithm and Realization) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2002.
- [10] Oppenheim A V. 离散时间信号处理 (Discrete Time Signal Processing) [M]. 西安:西安交通大学出版社 (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 2001.
- [11] 胡大可 (HU Da-ke). MSP430 系列 Flash 型超低功耗 16 位单片机 (MSP430 Series Flash-type Ultra-low Power Dissipation Single-chip Microcomputer) [M]. 北京:北京航空航天大学出版社 (Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press), 2001.

收稿日期: 2003-09-22; 修回日期: 2003-11-29

### 作者简介:

王克星 (1974 - ), 男, 博士研究生, 从事电器智能化技术及电能质量分析方面的研究;

王建华 (1956 - ), 男, 教授, 博士生导师, 从事电器智能化、ASIC、网络可视化计算和电能质量分析等方面的研究;

宋政湘 (1971 - ), 男, 副教授, 从事电器智能化及电能质量检测分析方面的研究。

## Research on instantaneous protection of intelligent apparatus based on discrete sinusoid filtering

WANG Ke-xing, WANG Jian-hua, SONG Zheng-xiang, GENG Ying-san

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper presents the discrete sinusoid filtering (DSF) algorithm, which removes the fault signals quickly and calculates the magnitude correctly. The proposed algorithm employs short-lengthed discrete sinusoid filter to filtrate fault circuit signals, and with the removal of the aperiodic component and high frequency component, the values of the fault current can be obtained with fast amplitude algorithm. The algorithm, which takes both quickness and reliability into consideration, is convenient and suitable for distribution network. It can not only guarantee the security of lines and equipment, but also shorten the duration time of voltage sag to enhance the power quality.

This project is supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 2000069808).

**Key words:** instantaneous protection; discrete sinusoid filtering; voltage sag; distribution network; intelligent controller