

一种改进的小波阈值法在信号消噪中的研究

朱高中¹, 王艳红²

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 北京工业职业技术学院, 北京 100042)

摘要: 对于非平稳信号, 小波多尺度分解是一种有效的信号去噪方法, 在 D. L. Donoho 和 I. M. Johnstone 提出的多分辨率分析小波阈值去噪方法的基础上, 采用了一种改进的阈值函数, 改进的阈值函数克服了硬阈值函数不连续的缺点, 同软阈值函数一样具有连续性, 而且解决了软阈值函数中存在的恒定偏差, 同时它具有软硬阈值函数不可比拟的灵活性。仿真结果表明, 采用了改进的阈值函数的去噪结果有效抑制了在信号奇异点附近产生的 Pseudo-Gibbs 现象, 无论是在视觉效果上, 还是在信噪比增益和最小均方误差意义上均优于传统的软硬阈值方法。

关键词: 小波变换; 小波阈值去噪; 阈值函数; 均方误差; 信噪比

Study of an improved wavelet threshold method in signal suppression

ZHU Gao-zhong¹, WANG Yan-hong²

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: It is an effective method to reduce the noises by wavelet much dimension decomposition in non stationary signals. Based on much resolution analysis wavelet threshold de-noising method which put forward by D.L. Donoho and I. M. Johnstone, this paper puts forward an improved de-noising method. This improved threshold function has many advantages over soft threshold function, it overcome the shortcoming of the hard threshold with discontinuous function and solves the problem of the permanent bias in soft threshold function. At the same time, the improved threshold function is more elastic than the soft threshold and hard threshold function. Simulation results indicate that the de-noising method adopting the improved threshold function suppresses the Pseudo-Gibbs phenomena near the singularities of the signal effectively, and the numerical results also show the new method gives better MSE performance and SNR gains than hard threshold and soft threshold methods.

Key words: wavelet transform; wavelet shrinkage; threshold function; MSE; SNR

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0041-05

0 引言

信号在产生、传输及接收过程中, 难免会被噪声污染, 因此去噪在信号处理中是必不可少的一环。现在已有多种信号去噪的方法, 如维纳 (Wiener) 滤波法、卡尔曼 (Kalman) 滤波法、减谱法等。小波分析是近年来发展起来的一种优良的数学工具, 小波变换可以获得信号的多分辨率描述, 这种描述符合人们观察世界的一般规律, 它克服了傅立叶变换无法描述信号的局部特征的不足, 可以从局部到任意细节观察信号, 因此它已成为信号处理的优良工具。利用小波去噪是小波变换的重要应用领域。

信号和噪声在小波域中有不同的性态表现, 它们的小波系数幅值随尺度变化的趋势不同。随着尺

度的增加, 噪声的幅值很快衰减为零, 而真实信号系数的幅值基本不变。小波去噪就是利用信号的先验知识, 根据真实信号和噪声的小波系数在不同尺度上具有不同性质的机理, 在小波域采用有效的数学方法尽量多地剔除由噪声产生的系数, 同时最大限度地保留真实信号的系数, 最后由经过处理的小波系数重建信号, 此信号即是去噪后的信号。小波去噪算法简单地描述可分为3步: 第一步对观测信号进行小波变换; 第二步对变换后的小波系数进行非线性处理; 第三步对处理后的小波系数施行小波反变换。

目前常用的对小波系数进行非线性处理的方法有3种: Mallat提出的模极大值处理算法^[2]、Xu提出的空域相关去噪算法^[3]和Donoho提出的阈值^[4]去噪算法, 其中以阈值去噪算法最为常用。在阈值去噪算法中, 阈值函数的选取和阈值的确定是两个最基本的问题。主要的阈值定法有: 基于Stein无偏似然估计的软阈值估计 (rigsure)、长度对数阈值^[4]、启

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (072102240006)

发式SURE阈值和最小极大方差阈值。软、硬阈值函数是两种最常用的阈值函数,但由于硬阈值函数整体不连续,直接导致了会在去噪后的信号中出现突变的震荡点,当噪声水平较高时,这种现象尤为明显^[5]。软阈值函数虽然整体连续性好,但是由于当小波系数较大时,处理过的系数与原系数之间总存在恒定的偏差,这将直接影响重构信号与真实信号的逼近程度,给重构信号带来不可避免的误差。为了克服二者的不足,文中构造了一个改进的阈值函数。

本文首先介绍了小波变换与多分辨分析,再阐述了小波阈值去噪原理和算法,其中包括硬、软阈值法和改进的阈值法,最后进行了仿真实验及结果分析。

1 小波变换与多分辨分析

小波变换发展了传统的傅立叶变换思想,它在时域和频域都具有良好的局部特性,特别是对非平稳信号的分析明显优于傅立叶变换。设 $f(t)$ 是任意平方可积函数,就是能量有限函数,记

$f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 为 $\psi(t)$ 母小波,则 $f(t)$ 的小波变换定义为:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中: a 为尺度因子, b 为平移因子。其逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint \frac{1}{a} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (2)$$

其中: $C_\psi = \int \frac{|\psi(w)|}{|w|} dw < \infty$, 则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波。

在工程应用中利用小波变换对信号进行处理,应用最广泛的是二进小波变换,它对尺度参数进行离散化,而对时间域上的平移参量保持连续变换,不破坏信号在时间域上的平移变量。1988年, Mallat 在构造正交小波基时,提出了多分辨率分析的概念,从空间的概念上形象地说明了小波的多分辨特性,对正交小波基的构造方法进行了统一,提出了正交小波变换的快速算法,即 Mallat 算法。

设 f_k 为信号的离散采样数据,如果 $C_{0,k} = f_k$, 则有:

$$\begin{cases} C_{j,k} = \sum_n C_{j-1,n} h_{n-2k} \\ D_{j,k} = \sum_n C_{j-1,n} g_{n-2k} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $k=0,1,2,\dots,N$, N 为离散采样数据长度, h, g 为滤波器脉冲响应,即分解各列滤波器组系数, $C_{j,k}$, $C_{j,k} f_k$ 为在 2^j 分辨率下连续逼近; $D_{j,k}$ 为信号的细节系数; $D_{j,k} f_k$ 为在 2^j 分辨率下的高散细节。信号的 Mallat 重构公式如下:

$$C_{j-1,n} = \sum C_{j,k} h_{n-2k}^* + D_{j,k} g_{n-2k}^* \quad (4)$$

其中: h^*, g^* 分别为 h, g 的共轭转置,为重构各滤波器阻系数。通过不断的计算式得到原始信号 $C_{0,k} = f_k$ 。

2 小波阈值去噪原理

设一维观测信号为 $f(t) = s(t) + n(t)$, 其中 $s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为方差为 σ^2 的高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 。

对 $f(t)$ 进行离散采样,得到 N 点离散信号 $f(n)$, $n=0,1,2,\dots,N-1$, 其小波变换为

$$Wf(j,k) = 2^{\frac{-j}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \psi(2^{-j} - k), \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

$Wf(j,k)$ 即为小波系数。在实际应用中,式(5)的计算是繁琐的,而且小波函数 $\psi(t)$ 一般无显式表达,从而有小波变换的递归实现方法为

$$sf(j+1,k) = sf(j,k) * h(j,k) \quad (6)$$

$$Wf(j+1,k) = sf(j,k) * g(j,k) \quad (7)$$

其中: h 和 g 分别是尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 对应的低通和高通滤波器, $sf(0,k)$ 为原始信号, $sf(j,k)$ 为尺度系数, $W(j,k)$ 为小波系数。相应的重构公式为

$$sf(j-1,k) = sf(j,k) * h_0(j,k) + Wf(j,k) * g_0(j,k)$$

其中: h_0 和 g_0 分别对应于重构低通和高通滤波器。

为方便起见记 $w_{j,k} = Wf(j,k)$, 因为小波变换是线性变换,所以对 $f(k) = s(k) + n(k)$ 作离散小波变换后,得到的小波系数 $w_{j,k}$ 仍由两部分组成,一部分是信号 $s(k)$ 对应的小波系数 $Ws(j,k)$ 记为 $u_{j,k}$, 另一部分是噪声 $n(k)$ 对应的小波系数 $Wn(j,k)$, 记为 $v_{j,k}$ 。

Donoho 和 Johnstone 提出的小波阈值去噪方法的基本思想是,当 $w_{j,k}$ 小于某个临界阈值时,认为

这时的 $w_{j,k}$ 主要是由噪声引起的, 予以舍弃; 当 $w_{j,k}$ 大于这个临界阈值时, 认为这时的小波系数主要是由信号引起的, 那么就把这一部分的 $w_{j,k}$ 直接保留下来(硬阈值方法)或者按某一个固定量向零收缩(软阈值方法), 然后用新的小波系数进行小波重构得到去噪后的信号。此方法可通过以下3个步骤实现:

- 1) 对带噪信号 $f(k)$ 作小波变换, 得到一组小波系数 $w_{j,k}$;
- 2) 通过对 $w_{j,k}$ 用软或硬阈值函数进行阈值处理, 得出估计小波系数 $\bar{w}_{j,k}$; 使得 $\|\bar{w}_{j,k} - u_{j,k}\|$ 尽量小;
- 3) 利用 $\bar{w}_{j,k}$ 进行小波重构, 得到估计信号 $f(k)$ 即为去噪后的信号。

3 小波阈值去噪算法

运用小波阈值去噪, 它是基于多分辨率分析原理, 由于信号和噪声具有不同的奇异性, 随着尺度的增加, 信号的小波模极大值也增大, 则噪声相反。利用此特性, 通过尺度变换, 进行阈值处理, 能够有效地去除噪声。

3.1 软阈值和硬阈值算法

对小波系数进行非线性阈值处理。为保留信号的整体形状不变, 保留所有的低频稀疏, $v_{L,k} k=1,2,\dots,2^L$ 。取阈值 $\lambda = \sigma\sqrt{2\log_e N}$, 对每个小波系数, 采用软阈值和硬阈值方法进行处理:

$$\text{软阈值: } \bar{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \lambda & w_{j,k} \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \\ w_{j,k} + \lambda & w_{j,k} \leq -\lambda \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{硬阈值: } \bar{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

3.2 软硬阈值函数存在的不足

软硬阈值法虽然在实际中得到了广泛的应用, 也取得了较好的效果, 但它们本身存在着较多的缺点:

软阈值法 虽然该阈值函数在小波域内是连续的, 不存在间断点问题, 但它的导数是不连续的, 因而在求高阶导数时存在困难。并且软阈值对大于阈值的小波系数采取恒定值压缩, 这与噪声分量随着小波系数增大而逐渐减小的趋势不相符。

硬阈值法 该阈值函数在整个小波域内是不

连续的, 在 λ 和 $-\lambda$ 存在间断点, 这与实际应用中常常要对阈值函数进行求导运算存在矛盾, 具有一定的局限性; 同时, 它只对小于阈值的小波系数进行处理, 对大于阈值的小波系数不加处理, 这与实际情况下大于阈值的小波系数中也存在噪声信号的干扰不相符。

3.3 改进阈值函数的构造

为了克服软阈值法和硬阈值法的缺点, 针对以上不足, 本文采用了文献[9]改进的阈值方法, 其函数表达式如下:

$$\bar{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + |w_{j,k}| - \lambda)} & \text{当 } w_{j,k} \geq \lambda \\ 0 & \text{当 } w_{j,k} < \lambda \\ w_{j,k} + \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + |w_{j,k}| - \lambda)} & \text{当 } w_{j,k} \leq -\lambda \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\alpha \in [0,1]$ 为软化因子。当 $w_{j,k} > 0$,

$$\frac{\bar{w}_{j,k}}{w_{j,k}} = \frac{w_{j,k} - \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + w_{j,k} - \lambda)}}{w_{j,k}} = 1 - \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + w_{j,k} - \lambda) \cdot w_{j,k}}$$

$$\text{此时 } \lim_{w_{j,k} \rightarrow \infty} \frac{\bar{w}_{j,k}}{w_{j,k}} = 1。$$

当 $w_{j,k} < 0$,

$$\frac{\bar{w}_{j,k}}{w_{j,k}} = \frac{w_{j,k} + \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + w_{j,k} - \lambda)}}{w_{j,k}} = 1 + \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + w_{j,k} - \lambda) \cdot w_{j,k}}$$

$$\text{此时 } \lim_{w_{j,k} \rightarrow -\infty} \frac{\bar{w}_{j,k}}{w_{j,k}} = 1$$

同时,

$$\lim_{w_{j,k} \rightarrow 0} (\bar{w}_{j,k} - w_{j,k}) = \lim_{w_{j,k} \rightarrow 0} \left[\pm \frac{\alpha \cdot \lambda}{(1 + |w_{j,k}| - \lambda)} \right] = 0。$$

由上边的分析得出改进的阈值函数也是以 $\bar{w}_{j,k} = w_{j,k}$ 为渐近线, 随着 $w_{j,k}$ 的增大而 $\bar{w}_{j,k}$ 逐渐接近, 克服了软阈值函数 $\bar{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 之间具有恒定偏差的缺点。

由式(10)可见, 当阈值 λ 很小时, 改进阈值函数的作用与硬阈值函数相当, 但它更灵活, 当 $|w_{j,k}|$ 非常接近阈值 λ 时, 不是直接将小波系数置零, 而是渐近为零, 这样就使得函数连续, 为进一步的利用该函数提供了可能。在 $|w_{j,k}| < \lambda$ 的小波

系数域内全部置零, 与软硬阈值法一致, 但在 $|w_{j,k}| \geq \lambda$ 内, 该函数对小波系数采取的是缓变地压缩, 随着小波系数的不断增大, 压缩量减小, 当小波系数大于一定值时, 不进行压缩处理, 这样做符合对大于阈值的小波系数的处理, 更好地处理有用信号中存在的噪声分量。

4 实验结果及分析

为了说明改进阈值函数在去噪算法中的有效性和优越性, 分别采用传统的硬、软阈值函数和改进阈值函数进行了大量的实验。

实验中采用了交变频调速系统中的电压信号来进行分析, 得到变频调速中的电压信号如图 1(a), 根据文献[8], 当 $[SNR] < 15$ dB 时, 采用 rigrsure 规

则效果最差。本文采用极大极小原理选择的阈值 (minimaxi), 分别运用软阈值法、硬阈值法以及本文的改进阈值法进行了去噪处理, 采用的小波基为 db1, 最大分解尺度为 3 层, 采用三种阈值法去噪后结果分别见图 1 中的 (b), (c), (d)。由图 1(b),(c),(d) 结果可以看出, 软阈值去噪后不能够很好地反映原始信号; 硬阈值法去噪效果不够理想, 所得到估计信号产生振荡, 改进的阈值法去噪却能够兼顾传统两种方法的优点, 不仅去噪效果优异, 而且能够很好地反映原始信号, 去噪信号的信噪比 (SNR) 和均方误差 (MSE) 如表 1 所示。从表 1 可知, 本文提出的阈值函数在信噪比和均方误差两个性能指标上明显好于经典的软硬阈值法。同时我们还可以通过对它们去噪后结果用快速傅立叶变换来分析。

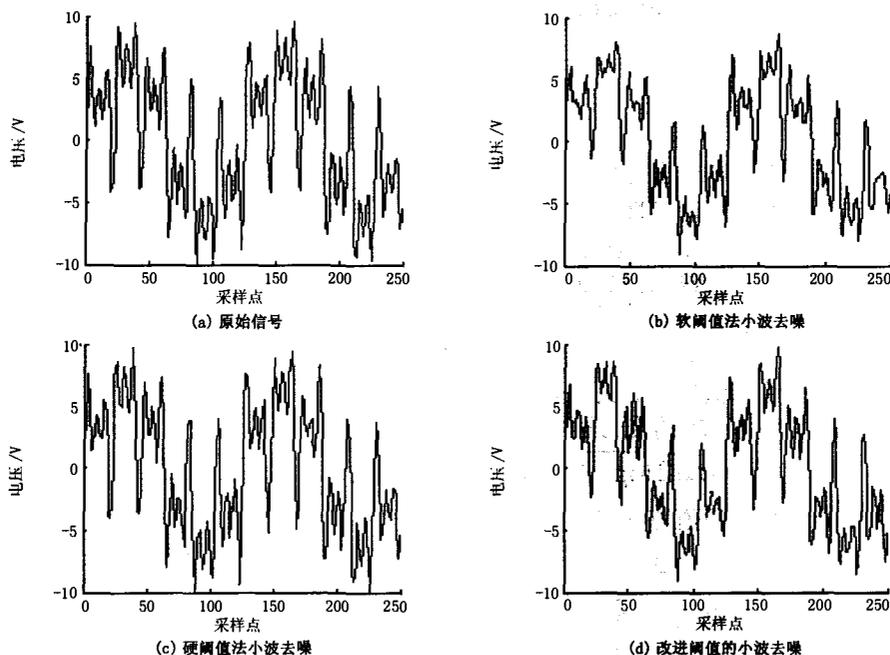


图 1 变频调速电压信号及三种阈值去噪后结果

Fig.1 Original signal and its suppression results with threes different methods

表 1 各种方法的信噪比 (SNR/dB) 和均方误差 (MSE)

Tab.1 SNR of different methods and MSE

方法	性能指标	
	SNR/dB	MSE
原始含噪电压信号	12.123	0.9983
软阈值方法	28.465	0.3543
硬阈值方法	20.478	0.3215
本文的方法	28.742	0.3081

采用快速的傅立叶变换算法对去噪的图形进行分析, 分析结果如图 2 所示, 由图 2 可以看出软阈值和硬阈值去噪谐波成分很大, 而改进的阈值去噪后很好去除噪声, 保留原始信号中的有用信号, 谐

波成分也得到较好滤除。仿真实验表明, 改进的阈值函数在阈值法去噪中显示了很好的去噪效果。

表 2 不同方法的两项指标的比较

Tab.2 Comparison of two indices with different methods

方法	压缩比/(%)	能量恢复系数/(%)
软阈值方法	7.14	99.80
硬阈值方法	9.26	99.89
本文的方法	6.83	99.92

另外, 我们可以从信号消噪效果还需要两个重要的指标: “压缩比” 和 “能量恢复系数” 来说明改进阈值方法在信号消噪中的优越性, 由文献[10]可

知能量恢复系数越大, 说明信号失真小, 压缩比越小, 说明保留的数据量越小, 舍弃的无用数据对信号恢复没有太多影响, 去噪效果越好。表 2 列出了

3 种方法对信号去噪后两项指标值。从中可以看出本文采用改进的阈值方法压缩比小, 能量恢复系数大, 去噪效果较好。

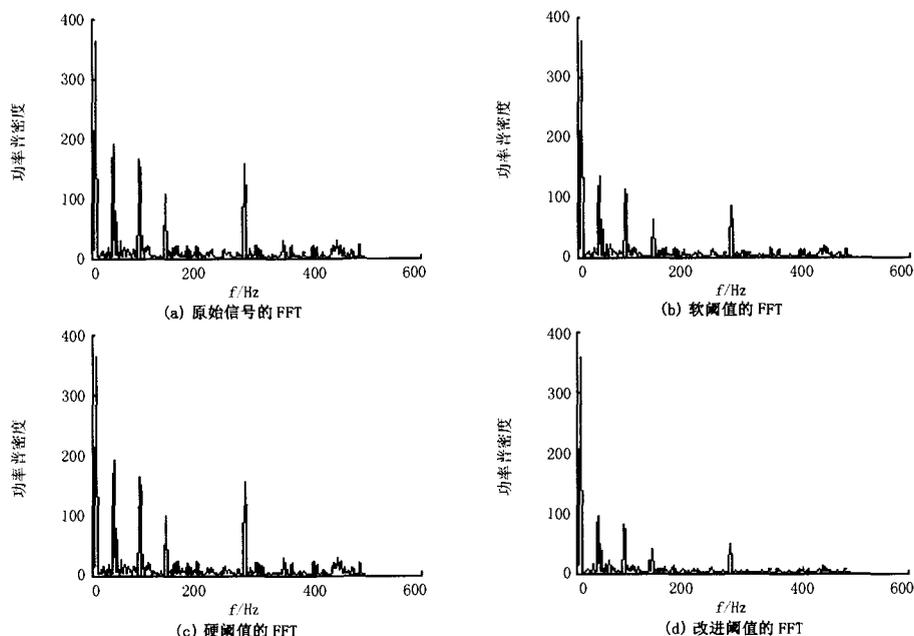


图 2 变频调速系统电压信号及三种阈值去噪后的 FFT

Fig.2 Original FFT and its suppression results with three methods

5 结束语

在分析软阈值、硬阈值函数各自缺点的基础上, 本文采用了一种改进的阈值函数, 并把改进阈值函数应用到小波阈值去噪算法中。通过仿真实验得出的结果明显可以看出, 改进阈值函数是可行且非常有效的。对噪声性质和信噪比及具体的信号进行分析采取合适的处理方法, 无论是从视觉效果, 还是从信噪比来看, 本文的新方法比硬取阈值和软取阈值都有所改进。另外, 还需要研究基于改进阈值函数的小波变换后各尺度上的阈值的自适应选取, 以达到更加满意的去噪效果。

参考文献

- [1] 周文晖, 李青, 周兆经. 采用小波多分辨率信号分解的电能质量检测[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 81-84.
ZHOU Wen-hui, LI Qing, ZHOU Zhao-jing. Power Quality Detection Using Wavelet-multiresolution Signal Decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical, 2001, 16(6): 81-84.
- [2] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1992, 38 (2) : 617-643.
- [3] XU Yan-sun, Weaver J B, Healy D M, et al. Wavelet

Transform Domain Filters : a Spatially Selective Noise Filtration Technique[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1994, 3 (6): 747-758.

- [4] Donoho D L. Denoising by Soft Thresholding[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1995, 41 (3) : 613-627.
- [5] Chang S G, Bin Yu, Vetterli M. Adaptive Wavelet Thresholding for Image Denoising and Compression[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9 (9) : 1532-1546.
- [6] Gao H Y, Bruce A G. Waveshrink with Firm Shrinkage[J]. Statist, 1997, 7 (4) : 855-874.
- [7] 薛慧, 杨仁刚. 基于小波包除噪的电能质量扰动检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 85-90.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Power Quality Disturbance Detection Method Using Wavelet Package Transform Based De-noising Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 85-90.
- [8] 王新. 交-交变频调速系统的新型控制方法以及故障诊断研究(博士学位论文)[D]. 上海: 华东理工大学, 2005.
WANG Xin. Research on Novel Control Methods and Fault Diagnosis of AC-AC Variable Frequency Speed Regulation System, Doctoral Dissertation[D]. Shanghai: University of Science and Technology, 2005.

(下转第 49 页 continued on page 49)

运行下阻抗很大,消耗功率很小,不影响测量准确度。当谐振过电压产生后电抗器饱和,大电流通过与其串连的电阻,消耗的功率很大,能在10个工频周期内迅速阻尼铁磁谐振。采用先进的速饱和电抗型阻尼器,不仅能有效地阻尼铁磁谐振,而且会使电子式电压互感器的瞬变响应特性得到明显改善。

3 结语

确定了以电容分压器为电压传感单元的电子式电压互感器集电压信号采集和传送为一体,符合相应的国际标准:IEC 60044-7(电子式电压互感器),具有明显的优点:(1)采用以因瓦合金材料作为极板的同轴电容分压器作为电压传感器,测量精度高,稳定性好;(2)具有很宽的测量范围和响应速度,没有铁芯饱和问题,可以准确测量出大的非周期分量和暂态分量;(3)用速饱和电抗型阻尼器代替谐振型阻尼器来抑制铁磁谐振;(4)用SF6代替传统的油绝缘,避免了渗透油的问题,并且可降低高度,把分布电容降到最低;(5)可在补偿电抗的两端装有带串联电阻的保护间隙,防止由于二次侧短路造成的电压升高而击穿电抗器线圈;(6)电压测量一体化设计,系统体积小、重量轻、绝缘结构简单,成本低,现场安装方便;(7)可以充分利用现代信号处理技术,校正系统误差,为实现高精度测量提供了保证;(8)可以方便地提供模拟传统电压传感器的输出信号及与上位计算机通信的数字信号。数字量接口与微机保护具有良好的兼容性。

参考文献

- [1] 罗苏南,叶妙元.电子式互感器的研究进展[J].江苏电机工程,2003,(3)
LUO Su-nan, YE Miao-yuan. Research Development of Electronic Transducer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, (3).
- [2] 程云国,刘会金,李云霞,等.光学电压互感器的基本原

理与研究现状[J].电力自动化设备,2004,(5).

- CHENG Yun-guo, LIU Hui-jin, LI Yun-xia, et al. Basic Principle and Current Development of Optical Voltage Transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, (5).
- [3] 方志,邱毓昌,李双.混合式光电电流互感器电流传感头的设计[J].电工技术杂志,2003,(7).
FANG Zhi, QIU Yu-chang, LI Shuang. Design of a Sensor Head for Hybrid Optical Current Transformer[J]. Electrotechnical Journal, 2003, (7).
- [4] 徐雁,韩世忠,彭丽,等.电阻式电压互感器的研究[J].高电压技术,2005,(12).
XU Yan, HAN Shi-zhong, PENG Li, et al. Study on the Resistive Voltage Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2005, (12).
- [5] 时德钢,刘晔,等.高电压等级电压互感器综述[J].变压器,2003,(6).
SHI De-gang, LIU Ye, et al. Overview of High-Voltage Potential Transformer[J]. Transformer, 2003, (6).
- [6] 李伟凯,郑绳植.高压电压互感器精密电容分压器的研究与设计[J].传感技术学报,2005,(9).
LI Wei-kai, ZHENG Sheng-xuan. Study and Design of High Voltage Potential Transformer Using Precise Capacitive Voltage Divider[J]. Journal of Transduction Technology, 2005, (9).
- [7] 张永辉,常安碧,等.一种同轴高压电容分压器的设计[J].高电压技术,2003,(1).
ZHANG Yong-hui, CHANG An-bi, et al. Design of a High Voltage Coaxial Capacitive Voltage Divider[J]. High Voltage Engineering, 2003, (1).

收稿日期:2007-01-29; 修回日期:2007-06-14

作者简介:

王化冰(1974-),男,讲师,硕士,长期从事电子技术、电气自动化等方向的教学与研究工作。E-mail: xiaocaosnow@163.com

(上接第45页 continued from page 45)

- [9] 朱云芳,戴朝华,陈维荣.小波消噪阈值选取的一种改进方法[J].电测与仪表,2005,42(7):4-6.
ZHU Yun-fang, DAI Zhao-hua, CHEN Wei-rong. A Modified Method for the Wavelet De-noising Threshold Selection[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2005, 42(7):4-6.
- [10] 任震,何建军,黄雯莹.基于小波包算法的电机故障信号的压缩和重构[J].中国电机工程学报,2001,21(1):25-29.

REN Zhen, HE Jian-jun, HUANG Wen-ying. Compression and Reconstruction for Faults Signals of Electric Machines Based on Wavelet Packets[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 25-29.

收稿日期:2007-01-22; 修回日期:2007-04-09

作者简介:

朱高中(1980-),男,硕士生,研究方向为信号处理、小波分析及电能质量控制。E-mail: zhugaozhong188@163.com