

基于小波包变换的电压骤降信号分析

熊玲玲, 刘会金, 傅志伟

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 电压骤降是暂态电能质量问题中最常见的现象, 对其进行准确的检测是控制和治理的前提。小波包变换是小波变换的进一步完善和发展, 其均等划分频带特性使之具有比小波更好的时频分辨率。利用此特性, 信号被分解到小波包平面, 根据有用频带信息, 提取电压骤降信号的特征分量; 对信号中混有噪声和数据量过大的情况, 利用软阈值法同时进行去噪和压缩处理, 并对调节系数对软阈值法处理的影响进行了分析。仿真结果表明, 小波包变换也是分析电压骤降信号的一种有效方法。

关键词: 电能质量; 小波包; 特征提取; 阈值

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0008-05

0 引言

电压骤降是指工频电压降低 0.1 ~ 0.9 p. u. 之间, 持续时间在 0.5 个周波到 1 min 的暂态电能质量问题。随着计算机, 可调速驱动器等大规模敏感性电力电子器件在控制自动化中的广泛应用, 电压骤降的发生可能导致装置的损坏、生产的中断, 从而造成巨大的经济损失, 被认为是影响用户设备正常运行的最严重的暂态电能质量问题^[1]。对其进行准确的检测与识别, 已引起广泛的关注^[2]。

电压骤降信号具有发生随机性, 持续时间短和突变的特性, 要求分析方法具有快速性和准确性等性能, 即能完整地反映信号在任一时刻频域特征。近来兴起的小波变换是一种窗口大小固定, 但时间窗和频率窗可改变的时频局部化方法, 特别适合于突变、非平稳信号的分析。本文提出一种新的电压骤降信号分析方法, 它是在小波变换的基础上发展而来的, 即小波包变换。它为信号提供更加精细的分解, 不仅在时域, 而且在频域都给出完整的信息, 时频分辨率比小波变换更高。更能准确地提取和分析电压骤降暂态过程。基于此特性, 将信号分解到小波包域, 提取有用频带信息, 得到反映电压骤降现象的特征分量, 以利于进一步的识别和分类; 并根据信号和噪声的小波包系数的特征, 采用调节系数阈值法进行去噪和压缩处理, 实现噪声和不需要的频率成分的滤除。

1 小波包变换基本原理

1.1 小波包分析及算法

小波包分析将小波变换中没有细分的高频部分

进一步分解, 并能够根据分析信号的特征, 自适应地选择频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时-频分辨率。因此, 小波包变换具有更广泛的应用价值。小波包分解树如图 1 所示。其中 S 表示信号, A 表示低频, D 表示高频。末尾的序号数表示小波包分解的层数(即尺度数)^[3]。

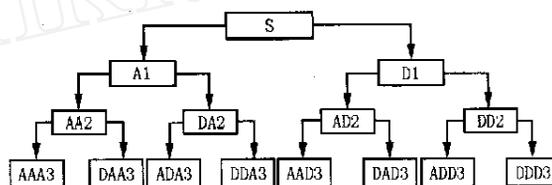


图 1 小波包分解树结构

Fig. 1 Decomposing tree of wavelet package

小波包是在小波变换的基础上发展起来的, 有关小波变换和小波包变换理论在文献中都做了详细介绍^[4], 因此本文只做简要说明。定义一序列函数 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程^[5]:

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) u_n(2t - k) \tag{1}$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) u_n(2t - k)$$

$h(k), g(k)$ 是一组共轭镜像滤波器, 由式(1)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ 称为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 确定的小波包。因 $\{u_n(t)\}$ 是正交尺度函数 $\phi(t)$ 的正交小波包, 从而构成 $L^2(R)$ 的规范正交基。则信号可以分解如下:

$$f(t) = \sum_{I_{nk,j}} C_{n,j}(k) 2^{k/2} U_n(2^{k/2}t - j) \tag{2}$$

$$C_{n,j}(k) = 2^{k/2} \int f(t) U_n(2^{k/2}t - j) dt$$

式中: $I_{nk} = \{2^h n, 2^h n + 1, \dots, 2^h(n+1) - 1\}, j \in N$ 。

重构公式为:

$$C_{j,m}(k) = \sum_n C_{j+1,2m}(n) \dot{h}_{k-2n} + \sum_n C_{j+1,2m+1}(n) \dot{g}_{k-2n} \quad (3)$$

式中: \dot{h}_{k-2n} , \dot{g}_{k-2n} 是 h_{k-2n} 和 g_{k-2n} 的逆算。

1.2 基小波的选择

小波基函数的选择是小波应用的关键,也是小波应用中有待进一步研究的工作。不论小波变换或小波包变换,其实质是用一系列的小波函数取逼近某个信号的过程,即表明信号在各频段上的分量与小波函数系的相似程度。即使对于同一信号,采用不同的小波基函数的分析效果也是不同的。在电力系统中,根据电能质量波形的特点,需要采用时域和频域同时具有良好的局域性,且对不规则性较为灵敏的小波。对于电压骤降信号而言,要求能够提取信号的瞬时、奇异与突变成分。因此,选择小波基时,考虑时、频两域的紧支撑性尤为重要。Daubechies(或 db)小波的正交、时频紧支撑、高正规性等特点较为符合这一要求。因此,在电力系统中推荐用 db 小波。文献[5]指出,db4 小波相对于其他小波,具有最短的时窗,因而具有比其他小波更好的时间分辨率。本文采用 db4 正交小波对电压骤降信号进行分析。

2 小波包变换在电压骤降信号分析中的应用

2.1 小波包用于信号的特征提取

电压骤降现象是电能质量问题中发生最为普遍的一种现象,不同的文献描述电压骤降现象特征采用的特征量不同,但大部分采用骤降幅值和骤降持续时间来描述。所谓骤降幅值即为骤降期间特征电压与正常电压的差值;而持续时间即这个电压差值所持续的时间。有些文献考虑到输配电线路的结构,变压器的接线方式,故障类型等情况,将电压骤降相角变化也作为衡量电压骤降的指标。在本文中,选择采用电压骤降深度 $U\%$ 和骤降持续时间 T 来描述骤降特征。其表达式如下:

$$U\% = (U_T - U_N) / U_N \times 100\% \\ T = T_2 - T_1 \quad (4)$$

式中: U_T 为骤降特征电压; U_N 为额定电压; T_1 为骤降开始时刻; T_2 为骤降结束时刻。

利用小波变换在突变点的特性可以准确地提取电压骤降的特征分量,从而实现暂态电能质量的检测和分类^[6]。而小波包变换除了具有与小波变换共同的特性外,其均等划分频带的特性使特征量的呈现更加明显。它将信号均等划分到不同尺度上,每

一个尺度对应信号的一部分,且不受其他频带的影响。我们只需提取与特征向量有关的频带信息,就可以获得信号的特征描述。由小波包分解树图 1 可知,最低层的第 1 个系数包含的只是低频分量,即概貌系数,反映的是信号整体的性质;其余系数均包含低频和低频分量,显示信号的细节部分。通过对概貌系数的分析,可以准确地提取电压骤降幅值,得到电压骤降深度。而细节系数所体现奇异性特征的两点即为电压骤降发生和结束的时刻,由此得到电压骤降持续时间。

2.2 基于小波包的阈值法用于信号的去噪和压缩处理

由于实际检测到的电压骤降信号通常包含高频突变或噪声干扰。必须先对信号进行预处理,将噪声部分去除;同时减少数据传输量,对信号进行压缩,以利于信号的特征提取和识别。非线性阈值法由于具有能得到原始信号的近似最优估计、计算速度快以及具有广泛的适应性等特点,是用于去噪和压缩最常用的一种方法^[7]。根据信号和噪声的小波包系数的非相关性^[8],设定阈值对各节点的小波包系数进行处理,并重构回原信号。不仅可以去除噪声,而且所保留的数据量大大缩小,达到了压缩的效果。其步骤如下:

- 1) 根据选定的小波基及分解层次 N ,对信号进行小波包分解,提取小波包分解系数;
- 2) 对于分解的第 N 层上的细节系数,分别选择一个适当的阈值,将分解系数中小于阈值的系数舍弃,保留阈值以上的系数;
- 3) 根据第 N 层的小波包分解的概貌系数和量化处理的细节系数逐步重构信号。计算重构信号的信噪比 SNR ,均方误差 MSE 以及压缩比 CR ,判断小波包阈值法分析效果。

为了取得良好的去噪和压缩效果,阈值的选择是关键。由于特征信号与噪声具有不同的小波包分解特性,且为了将重构信号和原始信号的误差控制在允许范围内,各节点阈值的设定采用如下方法:

$$thrd_n = u \cdot \max(|w_n|) \quad (5)$$

其中: $thrd_n$ 为各节点阈值; $0 < u < 1$ 为阈值调节系数; w 为小波包分解系数; n 为分解的节点数。压缩后的系数 w_n 满足

$$w_n = \begin{cases} \text{sgn}(w_n) \cdot (|w_n| - thrd_n) & |w_n| > thrd_n \\ 0 & |w_n| < thrd_n \end{cases} \quad (6)$$

这样,就将 w_n 中在阈值之下的系数舍弃,存储的只是阈值之上的数据 w_n ,大大压缩了原始信号。该阈值方法采用调节系数 u ,大大平滑了处理后小波包分解系数的波形,较好地保留了反映信号奇异性的特征信息。 u 值的大小选取影响着信号去噪和压缩的效果。衡量指标如信噪比、信号重构均方误差、压缩比都会随 u 值的变化而变化。

3 仿真研究

本文利用 Matlab 仿真电力系统工频运行时在 20 km 处发生单相接地短路故障,其故障相电压发生短时下降,得到的电压骤降波形如图 2 所示。 a 、 b 表示电压骤降的发生时刻和结束时刻,系统采样频率为 25 kHz,每周期采样点数为 500。 X 、 Y 轴分别表示的是信号采样点数和电压幅值(V)。

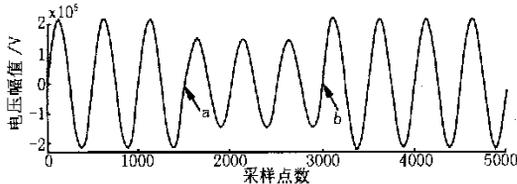


图 2 故障相的电压骤降波形

Fig. 2 Voltage sag waveform of fault phase

3.1 小波包特征提取

利用 Simulink 仿真单相接地故障产生的电压骤降现象持续时间为 0.06 s。其波形如图 2 所示,在 1 500 点处发生电压幅值下降,在 3 000 点处恢复正常。为了获得信号的时域信息,利用 db4 小波对信号进行三级小波包分解,分解至 8 个频段,每个频带的带宽为 3.125 kHz。 $s_{130} \sim s_{137}$ 为小波包分解的第 3 层系数。得到的各个频带信息如图 3 所示。

从图 3 中我们得到每一个相关频带的信息, s_{130} 为小波包概貌系数, $s_{131} \sim s_{137}$ 则为小波包细节系数。 $s_{131} \sim s_{137}$ 系数在 1 500 点和 3 000 点,均发生了突变。说明信号在这两点存在奇异性,即有电压骤降现象发生。而且在结束点由于冲击电流效应产生了一些许的振荡。由此,我们可准确地判断出电压骤降发生的时间和这一现象的持续时间,实现了准确的时间定位。转换到时域中,我们可知信号在 0.06 s 发生电压骤降,在 0.12 s 结束,持续时间

T 为 0.06 s,与理论值相符。对 s_{130} 的峰值系数取模值即可以看出电压骤降的幅度。如图 4 所示,正常情况下电压峰值为 $2.2e + 005$ V,发生骤降期间电压峰值为 $1.5e + 005$ V。其差值即为骤降电压幅值。从而得到电压骤降深度 $U\%$ 为 32。

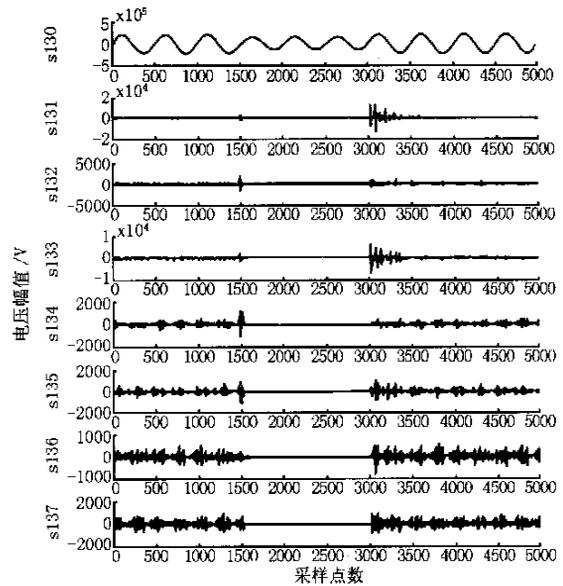


图 3 小波包分解系数图形

Fig. 3 Decomposing coefficients of wavelet package

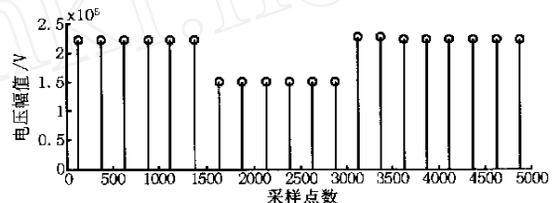


图 4 小波系数峰值模值

Fig. 4 The modulus maxima of wavelet coefficients

3.2 阈值法去噪和压缩的研究

利用 Matlab 仿真所构造的电压骤降噪声波形如图 5(a),它是原始电压骤降信号加上一个噪声强度为 10 000 的高斯白噪声所构成,其信噪比为 22 dB。利用 db4 小波包对信号进行 4 尺度的分解。以 Shannon 熵为代价函数,获得最佳分解树结构。采用文中所提的阈值方法进行去噪和压缩处理,并对信号进行重构。结果如图 5(b)、(c)所示。

由图 5(b)可知,利用阈值处理所得的压缩信号波形由于噪声的存在并不能显示奇异点的位置,但是其数据量大大减少,重构以后的波形与原始波形相差无几,其相似率达到 99.7%。通过计算阈值处理后的信号,其信噪比提高到 34 dB,信号重构均方误差为 $9.4458e - 004$ 。压缩比为 23.11%。

在利用如上所提的阈值法分析电压骤降信号过程中,最优小波基的选择、阈值系数的选取以及 u 值的不同都会影响去噪和压缩的效果。由于最优小

波基的选择仍是小波理论研究中的一大难点,故在本文中主要根据经验选择分析小波。而软阈值处理后的信号要比硬阈值处理后的信号光滑的多,本文选择软阈值的处理方法。对于调节系数 u 值,本文利用 Matlab 仿真对不同噪声情况下 u 值的大小对信号处理效果的影响进行了分析,从而判断出最佳值的选取。

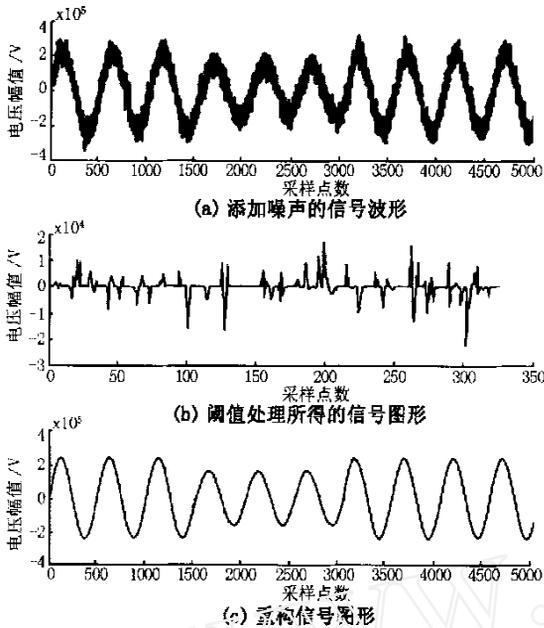


图5 重构信号图形

Fig. 5 Signal waveform with noise and the result by soft-thresholding

表1 SNR = 13 dB 时 u 值对信号处理的效果Fig. 1 Analysing effect of signal using u when SNR is 13 dB

u	去噪后 信噪比/dB	信号重构 均方误差/(%)	数据压 缩比/(%)
0.1	16	3.78	74.6
0.3	21	1.37	38.53
0.5	25	0.58	30.15
0.6	27	0.44	25.31
0.7	27	0.37	10.55
0.8	28	0.34	6.78
0.9	28	0.33	2.82

由表1、表2、表3中数据可以得出以下结论:

1) 随着 u 值的增大,信号重构后的信噪比逐渐增大,重构均方误差也逐步减小,信号的压缩比逐渐变小。 u 值的改变对采用阈值法去噪和压缩信号的效果有较大的影响;

2) u 值取 0.1 ~ 0.6 时,信号去噪后信噪比、信号重构均方误差和数据压缩比变化比较快; u 值取 0.7 ~ 0.9,三者的值变化不大。从信号的特征来讲,

表2 SNR = 22 dB 时 u 值对信号处理的效果Tab. 2 Analysing effect of signal using u when SNR is 22 dB

u	去噪后 信噪比/dB	信号重构 均方误差	数据压 缩比/(%)
0.1	24	0.76 %	71.43
0.3	29	0.28 %	34.46
0.5	33	0.12 %	28.8
0.6	34	9.445 8e - 004	23.11
0.7	35	8.149 6e - 004	9.42
0.8	35	7.564 9e - 004	4.73
0.9	36	7.353 5e - 004	1.84

表3 SNR = 25 dB 时 u 值对信号处理的效果Tab. 3 Analysing effect of signal using u when SNR is 25 dB

u	去噪后 信噪比/dB	信号重构 均方误差	数据压 缩比/(%)
0.1	27	0.45 %	71.41
0.3	31	0.17 %	33.02
0.5	36	7.527 2e - 004	25.0
0.6	37	5.999 2e - 004	21.42
0.7	37	5.266 4e - 004	7.49
0.8	38	4.934 2e - 004	3.76
0.9	38	4.815 8e - 004	1.09

经过阈值处理以后的信号不仅要求信噪比高,而且能完善地保留信号的奇异性特征,信号的整体应是平滑性质的。所以, u 值取得过小,不能很好地去除影响信号奇异性的噪声系数; u 值取得过大,不仅将信号与噪声分离开来,信号的数据量保留的太少,而且其特征系数也被删除,从而不能有效地进行分类和识别。综合以上考虑,故在本文中选择 u 为 0.6 作为阈值调节系数;

3) 当信号噪声强度太大时,这种阈值方法不能较好地去除噪声和压缩信号,信号的改善程度不高;当信号噪声强度不大时,该方法可以取得较好的去噪和压缩效果。

4 结论

电压骤降的发生、恢复时间的精确确定是获得骤降特性参数而首先要解决的问题;对信号进行去噪以及数据压缩则是提取特征参数的关键环节。本文利用小波包变换的指数等间隔划分性能,对电压骤降信号进行特征提取,从相应频带中得到电压骤降深度和骤降持续时间,以利于信号的进一步分类和识别。并根据去噪和压缩的原理,采用软阈值的处理方法对各个小波包系数进行阈值调整,去除噪声和多余信息。对所选取的阈值,本文针对调节系

数 u 的取值对去噪和压缩效果的影响和该阈值方法的可行性进行了分析,并给出了仿真结论。有关小波包在诸如电压骤降等暂态电能质量检测中的应用还处于初步阶段,小波包本身的很多特点都还没得到充分的发挥。因此选取最优小波基以及最佳小波包树,准确提取特征分量等研究将成为小波变换在电力系统应用中的一个热点问题。

参考文献:

- [1] McGranaghan M F, Muller D R. Voltage Sags in Industrial System [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29 (2) :397-403.
- [2] Santoso S, Power E J, Grady W M. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2).
- [3] 胡昌华,张军波,等 (HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, et al). 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 (System Design and Analysis Based on MATLAB——Wavelet Analysis) [M]. 西安:西安电子科技大学出版社 (Xi'an:Xi'an Electronic Technology University Press), 2001.
- [4] 杨福生 (YANG Fu-sheng). 小波变换与工程分析与应用 (Wavelet Transform and Project Analysis and Application) [M]. 北京:科学出版社 (Beijing:Science Press), 2000.

- [5] Brito N S P, Souza B A, Pires F A C. Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power [A]. The 1998 International Conference on Harmonics and Quality of Power. 1998: Athens (Greece), 511-515.
- [6] Gouda A M, et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4) :1469 - 1476.
- [7] Donoho D L. De-noising by Soft-thresholding [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3) :613-627.
- [8] 鲁怀伟,杜三山 (LU Huai-wei, DU San-shan). 一种小波包去噪自适应阈值算法 (An Adaptive Threshold Arithmetic for Wavelet Packet Denoising) [J]. 兰州铁道学院学报 (自然科学版) (Journal of Lanzhou Railway Institute, Natural and Science), 2001, 20(6) :11-15.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-02

作者简介:

熊玲玲 (1979 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制;

刘会金 (1952 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量测控以及灵活交流输电技术等方面的研究;

傅志伟 (1977 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为灵活交流输电技术。

Voltage sag analysis based on wavelet package transform

XIONGLing-ling, LIU Hui-jin, FU Zhi-wei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Voltage sag is the most familiar problem in power quality transient, and its detection is the precondition of monitoring and restraining. Wavelet package transform with better time-frequency resolution is developed on the wavelet transform. The signal is decomposed on the wavelet package plane and the characteristic weights of voltage sag can be achieved using available information. As for the voltage sag interfered with noise and overmuch data, this paper presents the soft-thresholding method for the de-noising and compression, and analyzes the effect of adjustable coefficients to this method. The simulation results show that wavelet package transform is also useful in analyzing the voltage sag.

Key words: power quality; wavelet package; characteristics extraction; threshold

(上接第 7 页 continued from page 7)

A model of bidding strategy based on auction theory

WU Jur-ji, LI Cong, YANG Wei, ZHANG Jurfang

(School of Electric Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The issue of bidding strategy has become more and more popular with the reform of power market. The paper establishes a double auction model between generator and regulator based on double auction principle of Game Theory with a mathematical description. Further more, an optimized bidding strategy is obtained through deduction. The strategy can maximize the expected income of a generator. What's more, the case that the generator reduces revenue when bidding at marginal cost could not appear.

Key words: power market; double auction; Game Theory; bidding strategy