

基于小波与多维分形的电能质量扰动分类

胡为兵^{1,2}, 李开成¹

(1. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了基于小波变换和 multidimensional fractal 的电能质量扰动概率神经网络自动分类系统。分类系统的实现分为两个阶段, 首先采用离散小波多分辨率分析和 Parseval 定理提取不同尺度下扰动信号的能量分布特征, 同时利用多维分形方法计算同一畸变信号的局部方差分维数, 并将小波变换提取的能量分布特征和局部方差分维数组合构成特征矢量。其次将特征矢量输入到概率神经网络进行训练和测试, 从而实现正弦波形、电压骤降、电压陡升、谐波、中断、脉冲和振荡瞬态的分类。采用提出方法的电能质量扰动平均分类率为 95.86%, 高于只采用离散小波变换提取特征矢量分类率 2.15%。

关键词: 电能质量扰动; 小波变换; 多维分形; 概率神经网络; 特征矢量

Power quality disturbances classification based on wavelet transform and multifractal analysis

HU Wei-bing^{1,2}, LI Kai-cheng¹

(1. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Electrical Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A novel approach of power quality (PQ) disturbance classification based on the discrete wavelet transform, multifractal analysis and probabilistic neural network is proposed in the paper. The multiresolution analysis technique of discrete wavelet transform and the Parseval's theorem are utilized to extract the energy distribution features of the PQ disturbance signals at different resolution levels. Multifractal analysis calculates the variance fractal dimension of the same PQ disturbance signals as the other dimension of features vectors. Then by combining both energy distribution features and variance fractal dimension, it is possible to completely describe the characters of different PQ disturbance. These feature vectors are applied to probabilistic neural network system for training and testing so as to identify PQ disturbance type according to features of energy distribution and variance fractal dimension. The accuracy of classification reaches to 95.86% and is superior to the existing method based on only wavelet transform for features extraction.

Key words: power quality disturbances; wavelet transform; multifractal analysis; probabilistic neural network; feature vectors

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)05-0045-04

0 引言

随着大功率非线性负载和冲击性负载的大量使用, 造成了电网电能质量的恶化。同时电子电路和微处理器等广泛用于工业生产, 这些设备又容易受到电能质量扰动的影响。配电网的电能质量扰动主要包括电容投切的振荡瞬态、重负载的启动和停止引起的电压骤降和陡升、由于短路造成的电压中断、以及非线性设备引起的谐波和脉冲等。为了测量、评估和改善电能质量扰动的影响, 首先需要

对电能质量扰动进行检测、定位和分类。

目前配电变电站的电能质量分析主要采用故障录波仪记录故障数据, 但其记录的数据量非常大, 采用人工的方法很难有效地实现不同电能质量扰动的分类。许多文献采用傅立叶变换^[1]、小波变换^[2-4]提取特征矢量然后利用人工神经网络^[5,6]、模糊逻辑对电能质量扰动进行自动分类^[7]。文献[8]采用多维分形描述了电力系统的瞬态现象, 该方法最重要的特征在于不论原始信号的实际幅度大小可以自动实行输入数据的归一化, 它开辟了分析瞬态信号的一种新方法。在实现电能质量扰动的自动分类中, 包

括两个阶段,第一是提取不同扰动信号的特征矢量,第二阶段是在提取的特征矢量基础上自动区分扰动的类型。本文详细介绍了小波多分辨率分析和多维分形提取特征矢量的过程,给出了概率神经网络对电能质量扰动分类的结果,并对分类结果进行了比较分析。

式:

$$c_{\text{signal}} = [c_0, d_0, d_1, \dots, d_{J-1}] \quad (5)$$

为了减少特征矢量维数本文不直接使用细节系数和逼近系数作为训练和测试的样本。而是采用不同尺度下的能量分布作为特征矢量的一部分。每个分解尺度下的能量采用下式计算:

$$Ec_0 = \sum_{j=1}^N |c_{0j}|^2 \quad (6)$$

$$Ed_i = \sum_{j=1}^N |d_{ij}|^2 \quad i=1, \dots, J \quad (7)$$

其中: $i=1, \dots, J$ 是小波分解的尺度, N 是细节和逼近信号的系数总数, Ec_0 、 Ed_i 分别为逼近和细节信号在不同尺度上的能量分布。在本文的分析中小波变换的特征量的维数是 12。同时为了与文献[13]的分类结果比较,其小波变换的特征矢量维数取为 14。图 1 为小波提取的一组能量分布的特征矢量。

1 小波变换的特征提取

电能质量扰动信号是一种奇异信号,它表示电压波形函数在某处间断、突变或某阶次导数不连续。可以采用小波变换对奇异信号进行检测,其多分辨率信号分解可以将电能质量扰动信号分解到不同的频带上,然后在该频带上进行时域分析。对于任意信号 $x(t) \in L^2(R)$, 其多分辨率分解为^[9]:

$$x(t) = \sum_k c_0(k) \phi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{J-1} d_j(k) 2^{j/2} \phi(2^j t - k) \quad (1)$$

其中: J 表示分解的层数; $c_0(k)$ 为尺度系数; $d_j(k)$ 是小波系数。采用滤波器形式的双尺度方程表示如下:

$$c_{j-1}(k) = \sum_n h(n-2k) c_j(n) \quad (2)$$

$$d_{j-1}(k) = \sum_n g(n-2k) c_j(n) \quad (3)$$

其中: $h(k)$ 、 $g(k)$ 分别称为低通滤波器和高通滤波器系数,且满足:

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (4)$$

由以上分析和推导可得,畸变信号的细节信号和逼近信号的小波系数,可以把其表示成矩阵的形

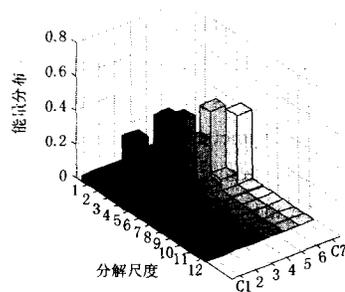


图 1 小波提取的特征矢量

Fig. 1 Feature vector of disturbance signal based on wavelet transform

表 1 扰动信号模型

Tab.1 Model of power quality disturbance signal

电能质量扰动	符号表示	模型	参数
正弦信号	C1	$x(t) = \sin(\alpha t)$	
电压骤降	C2	$x(t) = A(1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \sin(\alpha t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
电压骤升	C3	$x(t) = A(1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \sin(\alpha t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
谐波	C4	$x(t) = A(\alpha_1 \sin(\alpha t) + \alpha_3 \sin(3\alpha t) + \dots + \alpha_{19} \sin(19\alpha t))$	$0.1 \leq \alpha_1, \alpha_3, \dots, \alpha_{19} \leq 0.9 \quad \sum \alpha_i^2 = 1$
中断	C5	$x(t) = A(1 - (u(t-t_1) - u(t-t_2))) \sin(\alpha t)$	$0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 1 \text{ min}$
瞬时脉冲	C6	$x(t) = \sin(\alpha t) + M(u(t-t_1) - u(t-t_2))$	$50\mu\text{s} \leq t_2 - t_1 \leq 1 \text{ ms}$
瞬时振荡	C7	$x(t) = A \begin{bmatrix} \sin(\alpha t) + \alpha \exp^{-(t-t_1)/\tau} * \\ \sin \omega_n(t-t_1)(u(t_2) - u(t_1)) \end{bmatrix}$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8 \quad 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $0.1 \text{ ms} \leq \tau \leq 0.2 \text{ ms}$

2 方差分维数

分形理论基础的建模可以分为四类:形态学的、熵的、频谱的、方差分维数的分形^[10]。无论怎样,

瞬态和非稳态信号不是纯的分形, 因为它的分维数是时变的。在分析电能质量扰动信号时使用一个矩形窗, 并且沿着时间轴移动, 就可以计算不同时间段的局部方差分维数, 该局部方差分维数可以有效表征电能质量扰动的类型。

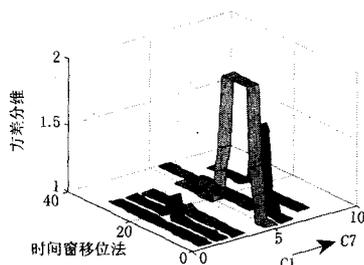


图2 电能质量扰动信号的方差分维数

Fig. 2 Local variance fractal dimension of disturbance signal based on multi-fractal

在实时实现中, 信号 $x(t)$ 是离散的, 在时间 Δt 内幅值增量的方差 σ^2 按照下面的幂律方程与时间增量联系:

$$\text{Var}[x(t_2) - x(t_1)] \sim |t_2 - t_1|^{2H} \quad (8)$$

其中: H 是 Hurst 指数。为了使点等间隔的分布在数图上, 通常选择序列以及方差以 b 为底的对数即:

$$X_k = \log_b(\Delta t_k), Y_k = \log_b[\text{Var}(\Delta x)_k] \quad (9)$$

一个多项式线性拟合方法用来决定这些点的斜度 s 。这个斜度计算的公式如式 (10) 所示:

$$s = \frac{(k2 - k1) \sum_{i=k1}^{k2} X_i Y_i - \sum_{i=k1}^{k2} X_i \sum_{i=k1}^{k2} Y_i}{(k2 - k1) \sum_{i=k1}^{k2} X_i^2 - \left(\sum_{i=k1}^{k2} X_i \right)^2} \quad (10)$$

其中: Hurst 指数可以得到通过 $H = s/2$ 计算得到。

被分析的电能质量扰动信号以 12 800 sps 采样率采样 4 096 个点。其中计算局部方差分维数的窗宽取为 256 点, 每次移位 128 点。这样由局部方差分维数构成的电能质量扰动信号的特征矢量维数为 30。图 2 为 7 类扰动信号的一组局部方差分维数的特征矢量, 组合小波变换提取的能量分布特征矢量的 12 维, 则对于同一扰动信号可以用 43 维的特征矢量表征其特性, 这是概率神经网络训练和测试的数据来源。

3 概率神经网络 PNN 的分类

最初的概率神经网络 PNN (Probabilistic

Neural network) 是由 Spectht 提出的, 其基本的思想是 Bayes 分类准则与 Parzen 概率密度函数估计方法^[11]。由于其模块化的结构和快速的学习速度, 它特别适合在线分类的学习系统。PNN 网络结构包括输入层、隐含层、累加层和输出层如图 3 所示。特别地, 其中, W_{in}^{ab} 为输入层和隐含层的联接加权; W_{hj}^{by} 为隐含层和输出层的联接加权。在训练网络时, 网络直接存储训练样本为网络的模式样本向量, 而不做任何的修改, 只需对高斯函数的平滑因子进行经验式统计的估计。在网络测试时, 待识别样本由输入层直接送到模式层的各个单元中, 进行向量与加权的点积。完成非线性处理后, 再送入求和层中; 求和层中各单元只与相应类型的模式相连, 并且依据 Parzen 方法求和估计各类的概率; 在决策层中, 根据对输入向量的概率估计, 按 Bayes 分类规则将输入向量分到具有最大后验概率值的类别中去。在进行电能质量扰动分类时, 求和层单元对模式层中同一模式输出求和, 并乘以代价因子; 决策层则选择求和层中输出最大者对应的扰动类型为分类结果。当电能质量扰动样本增加时, 模式层的神经元将随之增加。随着扰动经验的积累, 概率神经网络可以不断横向扩展, 分类的能力也将不断提高。PNN 的训练采用有监督的学习方法, 在 Parzen 密度估计中的多个标准偏差 σ 需要训练学习。并且 σ 的阈值和误差阈值都设为 $2.0e^{-10}$ 。

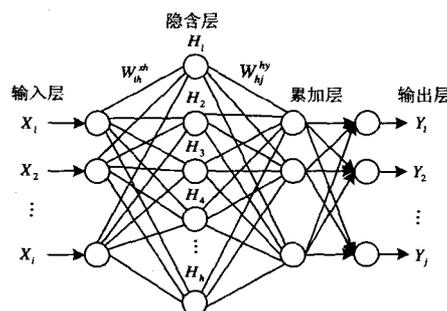


图3 概率神经网络的结构

Fig. 3 Structure of PNN

4 扰动信号的生成、特征提取和分类

为了得到具有普遍意义的电能质量扰动数据以用于训练和测试 PNN 分类器的性能, 基于文献 [12] 的模型采用 Matlab 仿真生成数据如表 1 所示。得到正弦信号、电压骤降、电压陡升、谐波、中断、脉冲、瞬时振荡等 7 种类型信号依次用 C1, C2, ..., C7 表示。其中每种电能质量扰动各生成了 200 个样本, 其中的 100 个用于训练 PNN 网络, 另外的 700 个用于测试系统的分类性能。所有的扰动信号都以相同

的采样率 256 点/周期采样, 总共采样点数是 4096 个点。该采样率可以用于检测高达 6.4 kHz 频率的分量。为了避免混叠, 瞬时振荡的最高频率上限设定为 4 kHz。为了生成不同的扰动样本, 不同扰动类型的一些特征参数可以随机改变。如扰动的开始时间、幅度、间隔、振荡频率和阻尼比等都采用随机函数生成。既然实时电力系统中没有那一类扰动具有固定的特征, 因此信号的随机生成可以更加充分的证明特征提取和扰动分类的可靠性。本文提出的系统分类结果采用混淆矩阵^[13]表示如表 2 所示。

为了评估提出的方法的性能, 我们同文献[14]的分类结果进行了比较, 该文献采用 DB4 小波分解为 13 层的细节信号并将其不同尺度下的能量分布作为特征矢量的 13 个分量, 同时还提取了扰动持续的间隔作为特征矢量的第 14 个分量。时间间隔利用第一层分解尺度下的小波系数的变化确定扰动起始时间 t_s 和扰动终止时间 t_e 。于是电能质量扰动的持续时间 t_t 由下式决定:

$$t_t = |t_e - t_s| \quad (11)$$

采用 14 维特征矢量用于 PNN 分类的结果其混淆矩阵如表 3 所示。

表 2 小波与分形方差维数和神经网络分类结果

Tab.2 Classification results of disturbances based on wavelet, variance fractal dimension and PNN

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	100	0	0	0	0	0	0
C2	0	94	0	0	6	0	0
C3	0	0	95	0	0	5	0
C4	0	0	0	100	0	0	0
C5	0	4	0	0	96	0	0
C6	0	0	1	0	0	95	4
C7	0	0	2	0	0	7	91
所有的平均分类率		95.86%					

表 3 小波和神经网络分类的结果

Tab.3 Classification results of disturbances based wavelet and PNN

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	100	0	0	0	0	0	0
C2	0	91	0	0	9	0	0
C3	0	0	90	0	0	8	2
C4	0	0	0	99	0	0	1
C5	0	6	0	0	94	0	0
C6	0	0	1	0	0	95	4
C7	0	0	4	0	0	9	87
所有的平均分类率		93.71%					

5 结果与讨论

表 3 是采用小波分解不同尺度上的能量分布和电能质量扰动持续时间间隔作为 14 维特征矢量, 采

用概率神经网络分类的结果, 其平均分类率为 93.71%。表 2 是本文提出的采用小波多分辨率分解 11 层近似信号和其细节信号的能量分布作为特征矢量的前 12 维分量, 然后采用方差分形方法计算得到的 30 个局部方差分维数作为特征矢量的后 30 维分量, 输入概率神经网络分类的结果其平均分类率 95.86%。

比较表 2 和表 3 的分类结果可以看出, 采用小波多分辨率分解的能量分布和局部方差分维数组合作为特征矢量虽然相对于文献[14]小波提取的特征矢量的维数增加了, 但相对于目前计算机的运行速度, 两者的训练时间相差约为 0.08 s, 测试时间仅仅增加了 0.3 s 左右, 不影响该算法的在线实时实现, 但其分类精度却提高了 2.15%。

参考文献

- [1] Heydt G T, Fjeld P S, Liu C C, et al. Applications of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999: 1411-1416.
- [2] Santoso S, Powers E J, Grady W M, et al. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996,(11):924-930.
- [3] Santoso S, Grady W M, Powers E J, et al. Characterization of Disturbance Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,(15):247-254.
- [4] Gaouda A M, Salama M M A, Sultan M A, et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-multiresolution Signal Decomposition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,(14):1469-1476.
- [5] Ghosh A K, Lubkeman D L. The Classification of Power System Disturbance Waveforms Using a Neural Network Approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,(10):109-115.
- [6] Santoso S, Powers E J, Grady W M, et al. Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-based Neural Classifier[J]. I Theoretical Foundation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,(15):222-228.
- [7] Dash P K, Mishra S, Salama M M A, et al. Classification of Power System Disturbances Using a Fuzzy Expert System and a Fourier Linear Combiner[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,(15):472-477.
- [8] Chen J, Kinsner W. Multifractional Analysis of Transients in Power Systems[A]. In: IEEE CCECE 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2000.307-311.
- [9] Mallat S. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2002.

(下转第 53 页 continued on page 53)

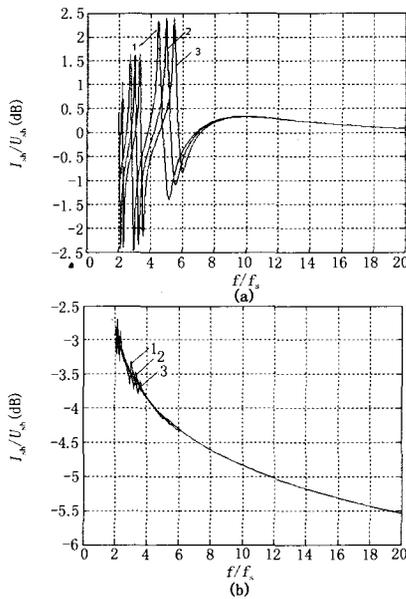


图9 PPF失谐对电网谐波抑制函数的影响

Fig.9 Influence of PPF detuning on harmonic-inhibited function of electric network

3 结论

综上所述, 可以得出以下结论:

1) PPF的谐波补偿特性受电网阻抗和PPF的失谐影响都较大, 基本不受FSRC失谐的影响。电网阻抗越小, PPF的滤波效果越差, 电网阻抗越大, PPF的滤波效果越好; PPF失谐将使得PPF的谐波补偿特性变差, 甚至导致谐波放大。

2) RITHAPF的谐波补偿特性基本不受电网阻抗变小和FSRC失谐的影响; 但受电网阻抗变大的影响, 当电网阻抗变大时其补偿特性更好。PPF失谐对RITHAPF的谐波补偿特性的影响较小。

3) 通过调整 L_r 来改变 Q 将会较为明显的影响补偿特性, Q 越大, 补偿特性越好。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Fujita H, Akagi H.A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems Series Connection of Passive and Active Filters[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1991, 27(6): 1020-1025.
- [3] Peng F Z, Akagi H, Nabae A. Compensation Characteristics of the Combined Systems of Shunt Passive and Series Active Filters[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1993, 29(1): 144-152.
- [4] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [5] 常永亮, 蒋外文, 涂春鸣. 基于谐振阻抗型有源滤波的谐波分析与治理装置[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 76-81.
CHANG Yong-liang, JIANG Wai-wen, TU Chun-ming. Harmonic Analysis and Eliminating Device Based on Resonant Impedance Type Hybrid Active Filter[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 76-81.
- [6] 穆永保, 张建成. 基于电流源控制策略的并联混合型有源滤波器的研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(增刊): 4-7.
MO Yong-bao, ZHANG Jian-cheng. Research of the Current Source Control Strategy on Parallel Active Power Filter[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(S): 4-7.

收稿日期: 2007-06-21; 修回日期: 2007-07-31

作者简介:

陆秀令(1969-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术的研究; E-mail: luxiuling4870@126.com

周腊吾(1965-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用方面的研究;

曹才开(1951-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为信号检测与处理。

(上接第48页 continued from page 48)

- [10] Kinsner W. A Unified Approach to Fractal Dimensions[A]. In: Fourth IEEE Conference on Cognitive Informatics[C]. 2005.58-72.
- [11] Haykin S. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] Galil T K A, Kamel M, Youssef A M, et al. Power Quality Disturbance Classification Using the Inductive Inference Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004: 1812-1818.
- [13] Marquesdesa J P. 模式识别——原理方法及应用[M]. 吴逸飞, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] Gaing Zee-Lee. Wavelet-based Neural Network for Power

Quality Disturbance Recognition and Classification[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004: 1560-1568.

收稿日期: 2007-07-19; 修回日期: 2007-09-04

作者简介:

胡为兵(1969-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究领域为电能质量检测以及现代电力电子技术在改善电能质量方面的应用; E-mail: huweibing1217@yahoo.com.cn

李开成(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事测控技术及智能仪器、光纤电流电压互感器、电能质量分析等方面的研究。