

# 基于 DWT 的自适应电能质量信号压缩及消噪

李鹏, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 应用信息论的 AMDL (Approximate Minimum Description Length) 判据, 针对动态电能质量扰动 (DPQD) 信号压缩和消噪问题, 提出了一种新的利用离散小波变换 (DWT) 的数据压缩和消噪算法。针对不同噪声水平和不同信号类型, 这种算法具有数据自适应能力, 其不需要进行任何先验的参数设置 (例如阈值设置) 和主观判断就能确定保留小波系数的最佳个数, 并能根据信号动态选择小波基。计算实例表明 MDL 判据能够在信号保真度与信号压缩效率之间找到最佳的契合点。

关键词: 数据压缩; 消噪; MDL; 电能质量

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)20-0005-04

## 0 引言

随着经济技术的发展, 大量微处理器、数控设备、芯片制造等敏感负荷投入运行, 由于动态电能质量扰动 DPQD (Dynamic Power Quality Disturbance) 有可能影响设备正常运行并带来严重后果, 因此供用电各方逐渐把注意力转向对 DPQD 的监测上。目前电力部门在部分区域电网甚至全省电网建立的电能质量管理中心 (PQ Management Center) 除了完成依据现行国家标准考核 PQ 统计指标外, 增加了对 DPQD 事件的实时监测以及综合分析。DPQD 信号通常包含较宽的频谱, 因此电能质量监测仪 (PQ Monitor) 通常采用较高的采样频率, 这造成数据存储和传输成本剧增, 而且采样信号通常包含测量白噪声及系统白噪声, 因此本文作为 PQM 的功能模块开发, 提出了一种能够提取信号时频特征的压缩消噪算法。

传统小波数据压缩算法由于需要预先进行阈值设置, 而针对不同的信号类型、不同的应用目的以及不同的噪声水平需要采用不同的阈值策略, 因此缺乏自适应性, 为此本文引入信息论中的 AMDL 判据<sup>[1,2]</sup>, 提出了一种自适应小波数据压缩和消噪算法, 其不需要进行参数和阈值设置, 具有信号自适应性, 能够自主寻找保真度与信号压缩效率之间的平衡点, 可用于不同噪声水平的 DPQD 信号。

## 1 信号模型

为了对 DPQD 进行分析, 本文引入信号模型:

$$d_i = f(i/N) + i, \quad i(i. i. d.) \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, N$  且  $d, f, \mathbf{R}^N, d$  代表实际测量的包含加性噪声的 DPQD 信号;  $f$  代表需要估计的

真实信号;  $i$  为高斯白噪声,  $\sigma^2$  未知。

## 2 DWT 和数据压缩及消噪

小波变换有良好的时-频局域性, 因此小波级数能够用很少的项来逼近 DPQD, 对于平方可积函数  $f$ , 按照多分辨率分析理论可知都有唯一分解<sup>[3]</sup>:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{2^j-1} a_{j0,k} \phi_{j0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^j \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

实际应用中通常采用“Mallat”快速算法, 把原始信号作为近似系数  $a_k^j$ , 连续应用分解算法:

$$\begin{cases} a_l^{j-1} = 2^{-1} \sum_k p_{k-2l} a_k^j \\ d_l^{j-1} = 2^{-1} \sum_k (-1)^k p_{1-k+2l} a_k^j \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $a$  是概貌系数, 而  $d$  是细节系数,  $p$  是小波滤波器系数。根据式 (3), 对信号的降阶分解的过程如图 1 所示, 图中  $M$  为小波分解的最大水平,  $A$  和  $D$  为小波分解系数,  $A^0$  为采样信号。



图 1 小波分解示意图

Fig. 1 Illustration of wavelet decomposition

通过 DWT 把原始信号按不同分辨率分解到不同的尺度水平上, 由于 DPQD 信号通过 DWT 后其信号能量发生“聚焦”效应, 因此能够把绝大多数信号的能量集中在少量的小波系数中, 大量的小波系数很小, 通过置零可以达到数据压缩目的。

由于 DPQD 信号和高斯白噪声信号通过 DWT 后, 系数能量反映到不同的小波分解水平上, 因此利用小波变换“分拣”噪声的特性, 可以把原始信号在

小波域中分解为“真实信号”发生模型和噪声信号发生模型,估计真实信号发生模型最简单和快速的方法就是保留部分小波分解系数的阈值方法,其余的系数可以认为是噪声信号的发生模型,不对其进行编码自然达到消噪目的,如何选择小波分解系数的子集是本文的研究重点。

### 3 应用 AMDL 函数选择小波分解系数

MDL 判据具有以下特点: 不需要进行参数设置,如不需要预置阈值、不需要选择阈值行为方式; 有数据自适应性(data - adapted),模型选择判据能够根据信号进行动态变化; 由于 DPQD 信号不满足一致正则条件,而 MDL 判据作为非线性逼近方法相对线性逼近能够获得更高的精确度; 和消噪目标紧密联系,能够同时完成数据压缩和噪声抑制两个目标; MDL 判据可以用于多种正交变换下的模型选择,其平台具有通用性; 能够从概率统计的角度对所选模型给出具体的信任指标; 和编码紧密联系,模型选择过程即是数据编码过程。

因此本文引入 MDL 判据进行信号模型的选择,即是选择保留小波分解系数的子集。相关理论基础请参阅文献[4,5]。

MDL 判据的表达形式有很多,本文采用它的近似表达式(Approximate MDL)如下<sup>[6]</sup>:

$$AMDL = \min_{k < N} \left[ \frac{3}{2} k \log_2 N + \frac{N}{2} \log_2 \left( I - \binom{k}{k} \right) W_m d^{-2} \right] \quad (4)$$

其中:  $k$  代表保留的小波分解系数的个数;  $\binom{k}{k}$  代表阈值运算,保留小波分解系数绝对值最大的  $k$  个系数不变,而把其余的置为零,  $W_m$  代表应用索引号为  $m$  的小波基对信号进行 DWT。

AMDL 函数是两项对立目标函数的和,第一项为模型描述长度,描述模型为原始信号通过 DWT 变换后其分解系数经过阈值运算  $\binom{k}{k}$  得到的子集,集合容量为  $k$ ,记为  $\hat{\Lambda}^{(k)}$ ,其随着保留的分解系数  $k$  的增加而线性增加,第二项代表实际信号与估计模型产生的估计信号的偏差,其随着  $k$  的增加而减小。通过给定某母小波由 AMDL 遍历  $k$ ,通过计算两项和并取最小(对应概率最大),就能找到真实信号的最优化估计模型  $\hat{\Lambda}_m^{(k)}$ ,如图 2。

### 4 压缩性能评价指标 (CEI)

为了验证 AMDL 函数的性能,同时用来构造模型选择判据,本文引入了如下 3 个评价指标:

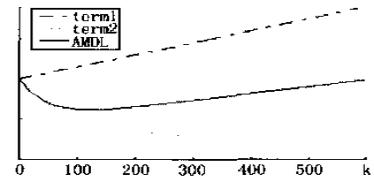


图 2 当  $0 < k < 700$  时的 AMDL 函数值

Fig. 2 AMDL value under  $0 < k < 700$

1) 压缩比 (CR), 定义为:

$$CR(\%) = \{1 - S_c / S_0\} \times 100\% \quad (5)$$

其中:  $S_c$  代表压缩后的模型编码文件大小,  $S_0$  代表原始信号的数据文件大小。

2) 均方误差百分值 (MSE), 定义为:

$$MSE(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} (d_j - f_j)^2}}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} d_j^2}} \times 100\% \quad (6)$$

其中:  $d$  代表原始信号,  $f$  代表由压缩数据重构的信号,  $MSE$  反映了误差估计的大小。

3) 信噪比, 定义为:

$$SNR(\text{dB}) = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{N-1} d_j^2}{\sum_{j=0}^{N-1} (d_j - f_j)^2} \right\} \quad (7)$$

### 5 利用 AMDL 判据进行信号模型的选择

由于每一种小波基都有不同的特性,因此对特定信号的最佳小波变换对另一个信号不一定具有最佳效果。为此本文提出利用各种正交小波基构造完备的变换模型库,采用算法根据具体信号进行小波基的自适应选择。

满足 DWT 的小波基有很多,由于小波函数的许多性质是相互关联和制约的,结合对 DPQD 数据压缩及消噪目的,本文在考虑正交性、紧支撑、去噪能力以及运算速度的基础上通过实验选用 Daubechies 小波族 ('db3', 'db4', ..., 'db8'), Coiflets 小波族 ('coif3', ..., 'coif5') Symlets 小波族 ('sym3', ..., 'sym8') 共 15 个小波基构成变换模型库 ( $M = 15$ )。记  $m$  代表模型索引,上述正交基不但具有紧支撑(奇异点的影响锥小)消失距也能够满足 DPQD 信号处理的要求。研究表明针对不同类型 DPQD 信号,均可以在上述正交模型库中找到能稳定地表示原信号的相应小波基。

针对不同的实测信号,算法首先进行基于某一小波基的信号模型估计,通过遍历  $k$ ,以数据压缩和信号保真度为双重目标,求得使得 AMDL 函数值最小的保留分解系数的个数  $k$ ,从而获得基于一个小

波基的一个信号模型。

为了在所有模型(共  $M$  个)中选出最佳的信号模型,本文提出以压缩性能指标构造辅助模型选择判据。这里借助统计学关于假设检验的原理,使用  $CR$  和  $MSE$  两个压缩性能指标作为置信因子,首先把  $\{CR(j)\}$  和  $\{MSE(j)\}$  看成两个服从正态分布的样本(样本容量为  $M$ ),分别计算两种指标的期望(中位数)和方差;通过计算每种模型对应的压缩性能指标评价水平( $EVA$ ),由于  $EVA(CR_i)$  越大越好,而  $EVA(MSE_i)$  越小越好,因此借用累计概率公式(8)就可以得到对每个指标的“欣赏”程度。

$$EVA(x) = F(x/\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2}} dt \quad (8)$$

显然,最佳信号模型为:

$$\arg \max_j \{ \alpha EVA(CR(j)) + [1 - EVA(MSE(j))] \} \quad (9)$$

其中:  $\alpha$  代表权重,反映用户的趋向,本文取 1,  $\arg$  代表使得。

## 6 算例分析

### 6.1 噪声抑制及信噪比

本文采用在纯正弦信号中人为添加不同水平的白噪声信号,来检测本文算法的消噪性能,图 3 反映了不同程度的真实噪声和使用本文方法“剔除”噪声的能量分布情况,以及真实的信噪比和本文方法计算的信噪比。可以看出 AMDL 函数能够有效的抑制噪声信号,并且没有出现将真实信号作为伪噪声滤除的情况。

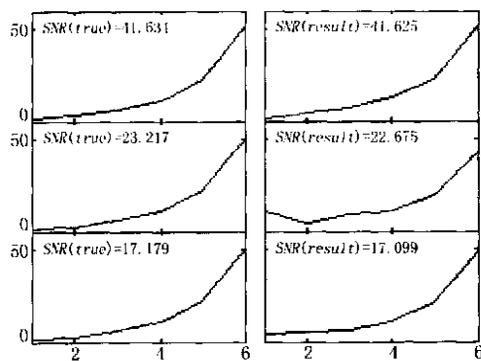


图 3 AMDL 消噪性能

Fig. 3 Performance of noise suppression using AMDL

### 6.2 实际应用

本文采用实际测量信号验证上述算法的性能。

信号 1 为电压凹陷信号,计算所得结果如表 1 和图 4。可以看出虽然采用 db3 和 sym3 小波的压缩效果很好,但均方误差较大;与之对应,使用 coif4 小波产生的均方误差小,但是压缩效果不理想。算法通过执行辅助模型选择模块选出 db4 小波并保留 128 个小波分解系数作为信号发生模型,表 1 数据显示所选信号模型不但压缩比和均方误差的综合指标优越,而且没有出现一项指标优越而导致其它指标恶化的情况。

表 1 基于 AMDL 和 DWT 的压缩质量评价因子

Tab. 1 Results of compression efficiency indicators based on AMDL & DWT

小波基	索引 $m$	AMDL	$k$	CR(%)	MSE(%)	SNR
db3	1	-3 614.29	113	88.33	2.98	30.5
db4	2	-3 856.02	128	86.87	2.33	32.67
db5	3	-3 660.38	124	87.26	2.94	30.62
db6	4	-3 816.19	139	85.79	2.45	32.21
db7	5	-3 608.21	137	85.99	2.91	30.73
db8	6	-3 625.77	153	84.42	2.65	31.54
coif3	7	-3 680.22	152	84.52	2.79	31.1
coif4	8	-3 823.24	195	80.32	2.2	33.16
coif5	9	-3 778.40	196	80.22	2.82	31.01
sym3	10	-3 614.29	113	88.33	2.98	30.5
sym4	11	-3 757.46	120	87.65	2.91	30.72
sym5	12	-3 855.36	132	86.47	2.58	31.76
sym6	13	-3 725.35	131	86.57	3.01	30.43
sym7	14	-3 825.61	138	85.89	2.71	31.34
sym8	15	-3 978.17	147	85.01	2.61	31.68

从图 4 可以看出重构信号很好地保留了原始信号的时域信息,电压凹陷发生的起止时刻、凹陷幅度以及起止时刻伴随的系统振荡,显然 PQMC 可以使用重构信号所携带的时域信息进行故障分类、量化计算。

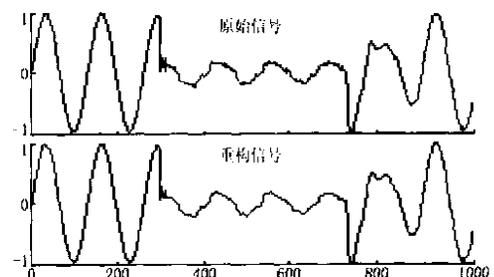


图 4 电压凹陷信号及重构效果

Fig. 4 Voltage dip signals and the reconstructed result

信号 2 是包含电磁暂态的电压扰动信号,算法选择‘sym6’小波并保留 183 个小波分解系数作为最佳信号模型,图 5 为压缩前后的时域重构效果,可以看出压缩前后信号的奇异点的位置在时间轴上没有

变换,即压缩信号较好地保留了原信号的特性,压缩性能指标为:  $CR(\%) = 87.66$ ;  $MSE(\%) = 4.16$ ;  $SNR = 27.62$ ;  $AMDL = -4295.09$ 。

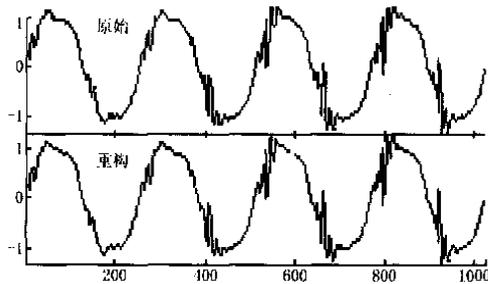


图5 电压扰动信号及压缩效果

Fig.5 Voltage disturbance signals and the compression result

图6重点说明了算法估计的信号模型对原始信号频域信息的传递情况。观察重构信号的频谱可以看到重构信号保持了原信号含有的5、9、11、14、18、21次谐波,同时算法滤除了大量的小数值非特征次谐波以及间谐波成分,因此重构信号更能凸现原信号的发生机理以及故障发生时刻的系统状态,更便于电能质量集中管理者的进一步数据挖掘,比如故障分析以及定位。这个算例也反映了本文算法与传统小波数据压缩或消噪方法的不同。一方面,传统的消噪算法只是以剔除噪声信号为目标,其并未减少对电力部门无用的信息的传递,因此压缩效果并不总是很理想;另一方面,传统压缩算法通常会抛弃大量的时域特别是频域信息,同时由于传统方法只使用一种小波基,因此对某些信号难免会造成扭曲和相位失真,由此所得的重构信号很难被用来进行事件分析、故障定位以及量化计算。本文算法在正确去除信号2所含白噪声的基础上,同时抛弃了那些无利用价值的时频信息,体现了算法压缩和消噪目标的统一。

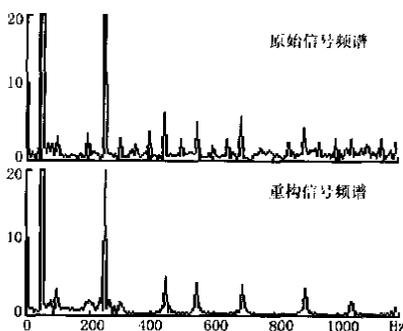


图6 原始信号和重构信号频谱

Fig.6 Spectrum of original and reconstructed signal

## 7 结论

本文从应用的角度出发,利用AMDL判据在信息论和统计学之间的紧密联系,将其引入数据压缩,能够同时完成信号的压缩和消噪两个目标。使用AMDL判据不需要进行任何参数设置,具有很强的实用性。保留尽量少的小波分解系数和减少信号的重构误差这对目标是矛盾的,AMDL判据能够在信号保真度与信号压缩效率之间找到最佳的契合点。通过算例分析可以看出该数据压缩和消噪算法,不但技术指标优越而且实用性强。

作为在编码技术和统计学交叉领域发展起来的新的分支,MDL判据广泛的应用于回归分析、非参数曲线估计(密度函数估计)、聚类分析以及时间序列分析,相信在不久的将来此类方法必然能够在电力系统中得到更多的应用。

## 参考文献:

- [1] Hansen M H, Yu B. Model Selection and the Principle of Minimum Description length[J]. JASA, 1998, 96(454): 746-774.
- [2] Bron A, Rissanen J. The Minimum Description Length Principle in Coding and Modeling[J]. IEEE Trans Inform, 1998, 44(6): 2743-2760.
- [3] Boggess A, Narcowich F. 小波与傅立叶分析基础(A First Course in Wavelets with Fourier Analysis) [M]. 北京:电子工业出版社(Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2002.
- [4] Mallat S. 信号处理的小波导引(A Wavelet Tour of Signal Processing) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 2002.
- [5] Antoniadis A. Wavelets in Statistics: A Review[J]. Ital Statist Soc, 1997, 6: 97-149.
- [6] Saito N. Simultaneous Noise Suppression and Signal Compression Using a Library of Orthonormal Bases and the Minimum Description Length Criterion [J]. Wavelets in Geophysics, 1994, 299-324.

收稿日期: 2004-02-18; 修回日期: 2004-05-18

作者简介:

李鹏(1974-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量监测与信号处理技术;

杨洪耕(1949-),男,教授,长期从事电能质量与谐波的研究工作。E-mail: mjm66@vip.sina.com

# 转速因素影响暂态稳定机理分析

张恒旭

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 发电机模型是影响暂态稳定仿真结果的重要因素之一,其转矩方程中转速变化的简化处理在某些情况下会对暂态稳定计算产生较大影响。通过分析比较指出扩展等面积准则 (EEAC) 在此问题研究中的独特优势;指出了转速因素影响暂态稳定的两种表现途径;提出依据等值两群转速与同步转速的关系将受扰系统进行分类的方法,清晰地揭示了转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内在机理。算例仿真验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 暂态稳定; 量化分析; 扩展等面积准则; 发电机模型

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)20-0009-04

## 0 引言

电力系统数字仿真已成为规划、运行与控制的主要工具,相应的决策无不以数字仿真为依据。大区域互联、远距离大容量输电以及电力工业体制的转变使系统运行条件越来越接近稳定极限,从而对电力系统数字仿真的精确度提出了更高的要求<sup>[1,2]</sup>。

1996年美国西部电网事故分析和东北-华北联网计算都表明,发电机和负荷模型对稳定计算结果影响甚大<sup>[3,4]</sup>。就某种程度而言,模型的选择已成为制约电网计算分析乃至电网运行发展的关键性问题。文献[5]通过大量算例仿真研究了发电机模型中转速的简化处理对暂态稳定计算的影响,指出转速因素某些情况下会对计算结果带来不可忽略的影响,并给出暂稳计算中选取转速简化处理方式的建议。

在文献[5]基础上,基于 EEAC 理论,从等值两

群转速与同步转速的关系入手,本文进一步揭示了转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内部机理。实例仿真验证了理论分析的正确性。

## 1 研究工具

电力系统暂态功角稳定性研究的是由代数微分方程组描述系统的运动有界性问题<sup>[1]</sup>,常用的分析方法有数值积分法、暂态能量函数 (TEF) 法和 EEAC。

数值积分法通过全程数值积分来研究系统稳定性,可以处理任何非线性因素和复杂场景;但其稳定判断紧密依赖于专家经验,且只能给出稳定与否的定性判断,无法给出稳定的充要条件,也无法量度受扰轨迹的稳定程度。由于物理概念和内部机理都被掩盖在数值运算中,故难以用来细致地分析模型或参数对稳定性的影响。

不同的 TEF 法都建立在各自的假设下,当这些假设与实际情况不符时,可能造成非常大的误差。

## Adaptive power quality signals compression and denoising based on DWT

LI Peng, YANG Hong-geng

(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This paper introduces a new data compression and denoising technique for short time voltage change signal via discrete wavelet transform (DWT) and information-theory based approximate minimum description length criterion (AMDL). This algorithm has data-adapted capability for different noise levels and signal sorts. Without any parameter setting (such as thresholding) or subjective judgments, it can select the "best" number of wavelet-retained coefficients and "best" wavelet basis according to dynamic signals. Results of computation prove that the MDL criterion can give the best compromise between the fidelity of the signal and the efficiency of signal compression.

**Key words:** data compression; denoise; MDL; power quality