

# 基于级联原子库的谐波分析方法

唐承志<sup>1</sup>,代云华<sup>2</sup>,何国军<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;

2. 西南交通大学信息科学与技术学院,四川 成都 610031)

**摘要:**提出一种基于级联原子库的谐波分析算法,该方法首先构造包含余弦原子和冲击原子的级联原子库,然后用该级联原子库对谐波信号进行稀疏分解,从而得到各个谐波信号分量的稀疏表示。该方法用余弦原子来表示谐波信号,用冲击原子来表示脉冲噪声,因此该方法能将噪声和谐波信号分离开,对脉冲噪声具有一定的鲁棒性。仿真实验结果显示,在信号受到脉冲噪声严重干扰时,仍能较好地分析出谐波信号的各个参数。

**关键词:**级联原子库;基追踪;谐波分析

**Abstract:** A harmonic analysis algorithm based on cascade atom dictionary is presented. The cascade atom dictionary including cosine atom and pulse atom is built by the proposed method, and then the harmonic signal is decomposed using the cascade atom dictionary, thereby the sparse representation of each harmonic signal component is obtained. In this method, the cosine atom is used to represent the harmonic signal and the pulse atom is used to represent the impulse noise. Consequently, the harmonic signal and the noise can be separated by this method, impulse noise has the robustness. The simulation and experimental results show that the various parameters of harmonic signals can still be analyzed by the proposed method when the signal is interfered by impulse noise seriously.

**Key words:** cascade atom dictionary; basis pursuit; harmonic analysis

中图分类号:TM714 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2011)06-0043-03

## 0 引言

由于各种电力电子器件和其他非线性负荷在电力系统的应用,导致电网中产生大量的谐波<sup>[1]</sup>。谐波造成电能质量严重恶化,危及电力系统的安全<sup>[2,3]</sup>。对谐波进行治理的重要前提是对谐波进行准确的分析。目前最常用的谐波分析方法是FFT,但是该方法会受到非周期截断的影响,出现频谱泄露和栅栏效应,影响谐波分析准确度<sup>[2]</sup>。而且当谐波信号受到脉冲噪声干扰时,该方法会把脉冲噪声也分解成谐波分量,影响分析结果。脉冲噪声是电力系统现场中常见的一种<sup>[4]</sup>,其他研究者并在研究谐波分析时,并没有考虑脉冲噪声造成的影响。

稀疏分解是一种新的信号处理方法,该方法提出以后,其在信号去噪、特征提取中应用已被广泛研究<sup>[5]</sup>。该方法是一种根据信号特点进行信号自适应的分解方法,即将信号自适应分解在一组高度冗余的过完备基(即原子库)上,用一系列的原子线性叠加来表示信号<sup>[5]</sup>。文献[6]采用稀疏分解方法对谐波进行分

析,得出谐波信号无交叉项干扰的时频图,从而分析出谐波的成分,但是该方法只分析出了谐波的频率,并没有给出计算谐波的幅值和相位的方法。构造出适合分解谐波信号的级联原子库,该原子库包含余弦原子库和冲击原子库。用余弦原子库稀疏表示谐波信号,用冲击原子库表示脉冲噪声,由此分离出基波和各个谐波分量以及脉冲噪声,计算出谐波的幅值和相位。

## 1 稀疏分解的基追踪实现

稀疏分解即将信号在过完备的原子库上进行分解,在一定的允许误差下得到信号的最稀疏表示<sup>[5]</sup>。由于原子库是过完备的,因此可以得到该信号的多个表示,而最稀疏的表示则只有一个。稀疏分解就是为了寻找信号在该原子库下最稀疏的表示,即用最少的原子来表示该信号。相当于求解

$$\min \|c\|_0 \text{ subject to } s = \sum_{r \in I} c_r g_r \quad (1)$$

该问题是一个NP难问题,CHEN等提出一个新的方法来解决上面的问题,将上面的问题进行修改,把求 $l_0$ 最小化变为求 $l_1$ 最小化<sup>[8]</sup>

$$\min \|c\|_1 \text{ subject to } s = \sum_{r \in I} c_r g_r \quad (2)$$

通过这一修改,就可以使用线性规划的方法进行求解<sup>[7,8]</sup>。

## 2 适合分解谐波信号的级联原子库构造

谐波信号完全由正弦信号构成,所以这里采用余弦原子来表示谐波信号;由于噪声只有统计规律,其结构不可预知,且脉冲噪声幅度大,持续时间短,因此这里采用冲击原子库来表示噪声。

### 2.1 余弦原子库

余弦原子库由一系列的余弦函数构成,其表达式如下。

$$g = \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

对参数  $\omega$  和  $\theta$  进行离散化就可以得到所需要的余弦原子库。

### 2.2 冲击原子库

冲击原子库由一系列的 Dirac 函数构成,对于采样点数为  $N$  的信号,冲击原子库如下。

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

## 3 谐波分析实验及结果分析

### 3.1 无噪声谐波信号分析

为了验证该方法,首先对没有噪声的谐波信号进行分析,设信号表达式为

$$x(n) = \sum A_i \sin(2\pi i \frac{f_i}{f_s} n + \theta_i) \quad (4)$$

式中,波频率  $f_i$  为 50 Hz; 采样频率为 4 000 Hz; 采样点数为 256;  $A_i$  和  $\theta_i$  分别为基波和各次谐波的幅值和初相位,具体值如表 1,信号时域波形如图 1 所示。

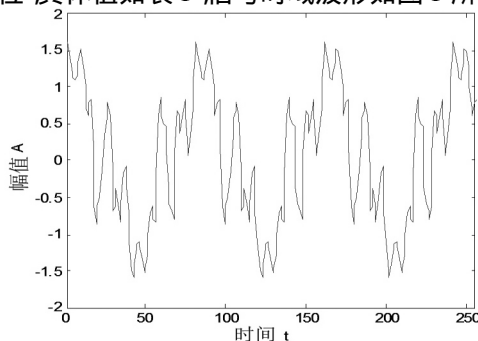


图1 无噪声信号时域波形

采用前面构造的级联原子库对谐波信号进行稀疏分解,得到图 2 所示的稀疏表示结果。从图 2 可以清晰的看到信号包含 10 个分量。根据这些分量多对应的原子参数,可以知道其频率和相位;图 2 中第 3 个分量和第 9 个分量对应的幅度值为负,这是由于其相位是负的;在设计余弦原子库的时候初始相位为  $[0, \pi]$ ,所以当某个谐波分量的相位为  $\theta \in [-\pi, 0]$  时,它的波形与同样幅值和频率,而相位为  $\pi + \theta$  的正弦波完全相反,因此得到的幅值为负。由此关系可以得到相位为负谐波正确的相位。

表 1 仿真信号参数值

谐波次数	$A_i$	$\theta_i / ^\circ$
1	1	73
3	0.45	30
5	0.3	-120
7	0.4	37
9	0.2	127
11	0.15	60
13	0.10	3
15	0.15	156
19	0.10	-75
21	0.10	55

由图 2 中每个分量的幅度值除以其对应原子的归一化之前的模即可得到对应分量的幅值。幅值和相位误差由表 2 给出,可以得知,各个分量的幅值和相位误差均比较小。

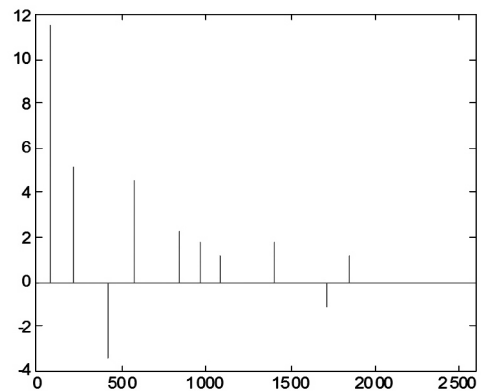


图2 无噪声信号稀疏分解结果

### 3.2 有噪声谐波信号分析

为了验证该方法对冲击噪声的鲁棒性,对 3.1 中采样的数字信号序列加入脉冲噪声。脉冲噪声的模型按文献[4]所描述,具体模型为

$$n_i(t) = \begin{cases} n_\omega(t) & |n_\omega(t)| \geq 2a \\ 0 & |n_\omega(t)| < a \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $n_\omega(t)$  是均值为 0、均方差为  $a$  的白噪声。实验

表 2 幅值和相位相对误差(无噪声)

谐波次数	幅值误差/%	相位误差/%
1	0.0011	0
3	0.0024	0
5	0.0036	0
7	0.0027	0
9	0.0054	0
11	0.0072	0
13	0.0111	0
15	0.0073	0
19	0.0110	0
21	0.0110	0

中去均方差  $a$  为 1.5。加噪声后的信号时域波形如图 3。

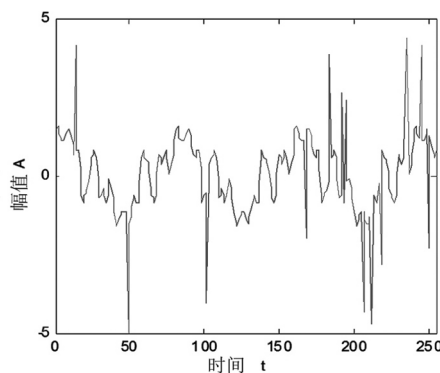


图 3 有噪声信号时域波形

对加噪声后的谐波信号进行 FFT, 得到如图 4 的信号频谱图。从频谱图可以看出除了基波分量和 3、5、7 次谐波比较明显外, 其他的谐波都和噪声混杂在一起, 很难清晰的分辨出。

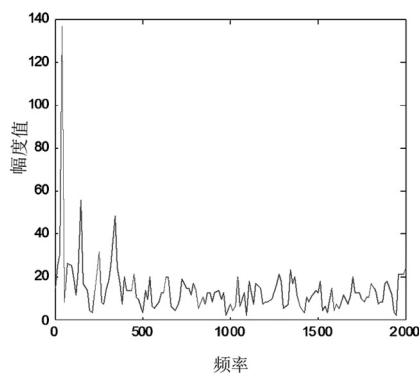


图 4 有噪声信号频谱

对加噪声后的谐波信号使用其构造的原子库进行稀疏分解, 得到图 5 所示的稀疏表示结果。可以清晰的看出信号包含 10 个分量。由 4.1 中的方法计算各个分量的幅值和相位。表 3 给出了幅值和相位的相对误差, 可以看出幅值和相位误差仍然比较小; 仍能清楚的表示出各个谐波分量, 提供比较可靠的分析

结果。而且由图 5 能定位出脉冲噪声出现的时间点。

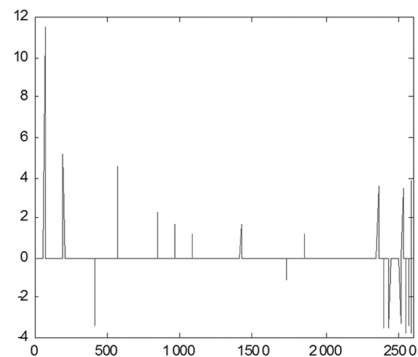


图 5 有噪声信号稀疏分解结果

表 3 幅值和相位相对误差(有噪声)

谐波次数	幅值误差/%	相位误差/%
1	0.001 2	0
3	0.002 6	0
5	0.003 9	0
7	0.002 9	0
9	0.005 9	0
11	0.007 9	0
13	0.012 0	0
15	0.007 9	0
19	0.012 1	0
21	0.012 1	0

## 4 结 论

所构造出的一种适合分解谐波信号的级联原子库, 并使用该原子库对谐波信号进行稀疏分解, 获得谐波信号的稀疏表示, 从而分析出各个谐波分量。分别对谐波信号不加噪声和加噪声两种情况进行稀疏分解, 根据分解的结果计算出谐波信号各分量的幅值和相位, 实验结果表明该方法能较准确的分析出各分量谐波的幅值和相位, 而且该方法对脉冲噪声具有鲁棒性, 在信号受到严重脉冲噪声干扰时, 本方法能获得比 FFT 更好的分析结果。

## 参考文献

- [1] 曾博, 滕召胜, 温和, 等. 莱夫-文森特窗插值 FFT 谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 115-120.
- [2] 高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43-48.
- [3] 王松, 石双双, 李德和, 等. 一种基于小波的电网谐波检测新方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3): 814-817.

(下转第 80 页)

制回路中设置了防跳回路。一般而言,保护防跳是电流启动、电压保持的“串联防跳”,而机构防跳则是电压启动和保持的“并联防跳”。在实际工作中,根据不同要求单独使用某一套防跳或者两套防跳同时启用的情况均有发生。

### 2.2 两套防跳配合使用时可能遇到的问题

因为保护操作箱的防跳和断路器机构箱的防跳基于各自目的考虑,在同时启用两套时往往会在使用的衔接上产生问题。

以图1为例,在断路器合闸回路中有一个跳位监视回路,由图1可以看出,如果断路器在分闸位置,那么正常情况下断路器机构内的合闸回路导通,在保护屏柜上设有跳位监视灯,对断路器的合闸回路的完好性起着监视的作用。如果机构防跳回路直接和跳位监视回路接通,中间没有断开点,那么当断路器合闸后由于防跳继电器 K01 有自保持,将会导致跳位继电器 K01 不返回使得机构防跳一直作用,出现只能合闸一次,无法再次合闸的问题。

笔者在 220 kV 镇江下蜀变电站二次施工时就遇到过此类问题,由于断路器机构防跳回路直接使用在远方合闸回路中,当跳位监视回路(TWJ)和机构防跳器参数不匹配时,TWJ 的阻抗分压使得机构防跳继电器达不到动作电压,从而发生了断路器只能合闸一次的问题。

为了解决这一问题,经过征求设计及使用单位的意见,取消了机构箱内的防跳,仅仅使用操作箱内的防跳,结果开关可以正常分合闸。

在 500 kV 龙王山变电站扩建工程中,断路器厂

家对其产品的防跳回路进行了改进,使得断路器控制回路中的两套防跳都可独立使用,也增加了产品的灵活性,图2中只要解除跳线即可取消就地防跳。从而可以满足用户的不同防跳组合需要。

## 3 结 论

防止断路器跳跃对保障电力系统的安全运行,防止设备损坏和事故扩大有着重要的意义,因此防跳回路动作的正确可靠性必须得到保证。在不同的变电站采用的防跳往往是不一致的,在具体工作中单独使用某一套防跳或者两套防跳同时使用均曾经采用过,而且不同的断路器机构和保护操作箱其二次回路往往不同。因此,作为二次安装和调试人员,必须在工作中不断学习、总结、提高,具体问题具体分析,以保证断路器的正确动作,以此来正确实现设计和使用者的意图。

### 参考文献

- [1] 许正亚. 电力系统自动装置[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [2] 熊为群, 陈继森. 电力系统继电保护[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1996.
- [3] 王铁成, 刘波. 断路器防跳回路的典型接线及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 69-70.
- [4] 郑立新, 王聪. 断路器防跳功能缺陷及处理[J]. 电气传动自动化, 2005, 27(2): 59-60.

(收稿日期:2011-05-04)

(上接第45页)

- [4] 徐志钮, 律方成, 李和明. 存在脉冲噪声情况下的介损角算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 45-48.
- [5] G. X. Zhang. Time-frequency Atom Decomposition with Quantum-inspired Evolutionary Algorithms[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2010(29): 209-233.
- [6] 李明, 张葛祥, 王晓茹. 时频原子方法在间谐波分析中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 81-85.
- [7] Chen S, Donoho D, Saunders M. Atomic Decomposition by Basis Pursuit[J]. SIAM J Sci Comput, 1999(20): 33-61.
- [8] Tropp J. Greed is Good: Algorithmic Results for Sparse Approximation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(10): 2231-2242.
- [9] WRIGHT, YANG, GANESH, etc. Robust Face Recognition

- via Sparse Representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2): 210-227.
- [10] 贾清泉, 于连富, 董海艳, 等. 应用原子分解的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 61-65.

作者简介:

唐承志(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气系统控制, 信号处理;

代云华(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为信号处理;

何国军(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能信号处理, 电力系统自动化。

(收稿日期:2011-08-28)