

小波分析在电力系统谐波治理中的应用

赵广超,汤金华,黄继锋,葛飞龙

(中国人民解放军 63880 部队,河南 洛阳 471003)

摘要: 针对电力系统中谐波的危害,通过分析小波多分辨率分析思想,找到了多分辨率分析与电力谐波治理的共同点,并通过仿真实验对含有谐波的模拟电力信号进行测试。利用小波变换对信号中的高频部分进行滤除,实现电力信号谐波的治理。仿真测试表明,小波分析在电力系统谐波治理中切实有效。

关键词: 谐波;小波分析;多分辨率分析;Matlab

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)02-0109-03

Application of wavelet analysis in the power system harmonic suppression

Zhao Guangchao, Tang Jinhua, Huang Jifeng, Ge Feilong

(PLA of 63880, Luoyang 471003, China)

Abstract: The existence of harmonic is harmful to the power system, the paper studies the wavelet multi-resolution deeply, finds the common ground of multi-resolution and the power system harmonic. Then the paper does some computer simulations test on the analog signals, which contains harmonic. The test shows: wavelet analysis is fully effectual in the power system harmonic suppression.

Key words: harmonic; wavelet analysis; multi-resolution; Matlab

目前,随着电力行业的迅猛发展,各种非线性负载的大量投入使用,使得电力系统的谐波含量日益增加,严重影响着电力系统的稳定性和各类用电设备的稳定运行,同时造成大量的电能损耗。因此,如何降低电力系统谐波量,提高供电质量,降低故障隐患,是目前电能质量管理需要高度重视的问题。

本文针对上述情况,对小波分析理论进行了深入分析,并将多分辨率分析理论引入电力系统谐波治理中,通过仿真分析表明:小波多分辨率分析思想对于电力谐波中的高阶谐波治理具有明显的效果。

1 谐波的产生及危害

谐波产生的根本原因是由于电源本身的电压偏移和非线性负载所致。当电流流过负载时,与其所加电压呈现非线性关系,从而产生非正弦电流,造成电路中的电流和电压畸变,称之为谐波。含有谐波的非正弦周期函数的交流电压/电流信号可以展开为三角函数形式的傅里叶级数:

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t + \theta_1) + A_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + A_3 \sin(3\omega t + \theta_3) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 表示含有谐波分量的交流电压/电流的时间函数; ω 为交流基频(50 Hz); A_1 为基波幅值, $A_i(i \geq 2)$ 为*i*次谐波的幅值; θ_1 为基波相角, $\theta_i(i \geq 2)$ 为*i*次谐波的相角。

谐波是正弦波,每次谐波都有不同的频率、幅度与相角,但每次谐波频率均为基波频率的整数倍;在平衡的三相系统中,由于对称关系,偶次谐波已经被消除了,只有奇次谐波存在,对于三相整流负载,出现的是 $6n \pm 1$ 次谐波,例如5、7、11、13等,17次及更高次数的谐波在电力系统中含量很少,基本上可以忽略。

谐波的存在对整个电力网络是一种污染,近年来,随着各种电力电子装置的迅速发展,电力网络的谐波污染日趋严重,由谐波引起的各种故障和事故也不断发生。其危害主要有:使电网中的元件产生了附加的谐波损耗,降低了发电、输电及用电设备的效率,大量的3次谐波流过中性线时会使线路过热甚至发生火灾;影响各

种电气设备的正常工作,谐波对电机的影响除引起附加损耗外,还会产生机械振动、噪声和过电压,使变压器局部严重过热;也会使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短,以至损坏;导致继电保护和自动装置的误动作,并会引起电力测量仪表计量误差^[1];对邻近的通信系统产生干扰,轻者产生噪声,降低通信质量;重者会导致通信系统无法正常工作;引起电网中局部的并联谐振和串联谐振,从而使谐波放大,使上述危害大大增加,甚至引起严重事故。

2 小波多分辨率分析

小波分析作为一种数学理论和方法在科学技术和工程界引起了越来越多的关注和重视,尤其在工程应用领域(信号处理、图像处理、模式识别、语音识别、量子物理、地震勘测、流体力学、电磁场、CT成像、机器识别、机械状态监控与故障诊断、分形、数值计算等)被认为是近年来在工具和方法上的重大突破^[2]。

2.1 小波分析

小波变换是一种采用窗口面积固定但形状可变、时间窗和频率窗都可改变的时频局域化分析方法^[3]。其基本思想是用一组函数序列表示或逼近待分析信号,该组函数被称为小波函数系,它是通过一个小波母函数的尺度伸缩和时间平移,产生其“子波”来构成。

小波分析的主要优点是在时、频两域都具有表征信号特征的能力,通过平移和伸缩能够聚焦信号的任意细节进行时频域处理,既可以看到信号的全貌,又可以分析信号的细节,并保留数据的瞬时特性,因此有“数字显微镜”之称。例如可以发现叠加在一个非常规范的正弦信号上的一个非常小的畸变信号的出现时间、信号的趋势,信号的高阶不连续点、自相似特性等;此外,在“二维”情况下,小波分析除具有“显微”能力外,还具有“极化”能力(即方向选择性)。

2.2 多分辨率分析

多分辨率分析思想是整个小波分析的精髓所在^[4],其在小波分析中的地位与快速傅里叶变换在傅里叶分析中的地位相当。主要思想是用不同分辨率来逼近待分析的函数 $f(t)$:将空间 $L^2(R)$ 分解为一串具有不同分辨率的子空间序列,并将 $f(t)$ 描述为具有一系列近似函数的逼近极限,其中每一个近似函数都是 $f(t)$ 在不同分辨率子空间上的投影,通过这些投影可以分析研究 $f(t)$ 在不同分辨率子空间上的特征。多分辨率分析只对低频部分进一步分解,而对高频部分则不予考虑。分解关系为 $f(t)=A_n+D_{n-1}+\dots+D_1$,其中 A 代表低频近似部分, D 代表高频细节部分, n 代表分解层数。以三层分解为例,分解过程如图1所示。

2.3 多分辨率分析与电力谐波治理

对于多数信号而言,通常分解为低频和高频两部分。其中,低频部分往往是最重要的^[2],它包含了信号的基

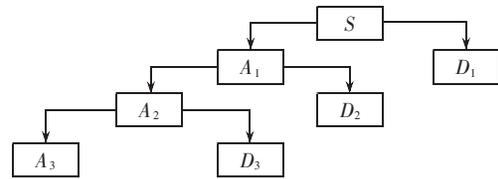


图1 三层分辨率分析树结构图

本特征。而高频部分通常与噪声和扰动联系在一起,去除高频部分,信号的基本特征仍可保留。

多分辨率分析通过对低频部分的一步步分解,提高了频率分辨率。含有谐波的电力信号可以展开为如式(1)所示的三角函数形式,除了基波频率外,还有频率是基波频率整数倍的高次谐波。从谐波治理的理论角度考虑,需要将系统中的某几次特征谐波或除基波以外的谐波进行抑制,这种抑制谐波的方法与多分辨率思想不谋而合^[5],从而使得多分辨率分析理论利用到电力系统谐波分析中成为可能。

以4层分析为例,各层小波分解可看成是带通或低通滤波器,若将整个信号所含最高频率看作1,则每层所占具体带宽如表1所示^[5]。

表1 小波分解后各层所占带宽比例

Approximation	谐波次数	频率带	Detail	谐波次数	频率带
A_1	0~8	0~0.5	D_1	8~15	0.5~1
A_2	0~4	0~0.25	D_2	4~8	0.25~0.5
A_3	0~2	0~0.125	D_3	2~4	0.125~0.25
A_4	0~1	0~0.0625	D_4	1~2	0.0625~0.125

利用多分辨率分析思想实现电力信号中高次谐波的滤除,其算法流程如下:

(1)分解。选择合适的小波函数和分解层数 N ,对待分析的信号进行 N 层分解。

(2)重构。重构主要包括对小波系数的插值与滤波,通过将某些系数置零等方式,实现信号的滤波、抑制或消除。

3 谐波治理仿真分析

含有高次谐波的电力信号中,基波构成了信号的主体,各次谐波叠加在基波上,利用小波变换对信号进行处理,分离出信号的高频部分,实现了对某个高次谐波区间或某次谐波的直接抑制或提取。

3.1 测试仿真

本文利用 Matlab R2007 对模拟的电力信号进行仿真测试,利用小波变换实现信号低频和高频部分的分离,通过将相关系数置零的方式滤除信号中的高次谐波,从而达到谐波治理的目的。

仿真测试1:测试信号由一个正弦波叠加在基波上构成: $S=25\sin(\omega x)+2\sin(13\omega x+12)$,如图2中的 S 所示,信号区间为 $[0,1000]$, ω 为0.02,在 Matlab 中,利用小波变换对信号进行 coif3 分解,4层分解后得到低频部分如图2中 a_4 所示。

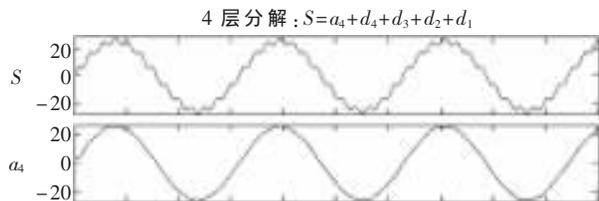


图2 仿真测试1中的原始信号和分解结果

仿真测试2: 实际测试信号由多个正弦波叠加在基波上构成, 信号如下:

$$S=25\sin(\omega x)+2\sin(5\omega x+3)+\sin(7\omega x+6)+3\sin(11\omega x+2)+2\sin(13\omega x+12)$$

信号区间为 $[0, 2000]$, ω 为 0.02, 其波形如图3中的 S 所示。利用小波变换对该信号进行 coif3 小波分解, 分解层数为 4, 得到低频部分如图3中的 a_4 所示。

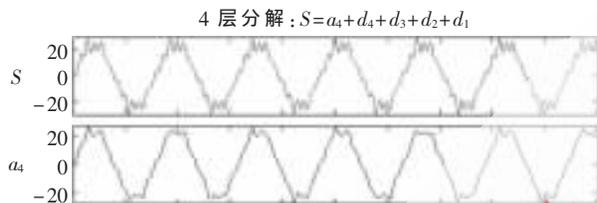


图3 仿真测试2中的原始信号和4层分解结果

选用的小波函数不变, 当分解层数为 5 时, 得到低频部分如图4中的 a_5 所示。

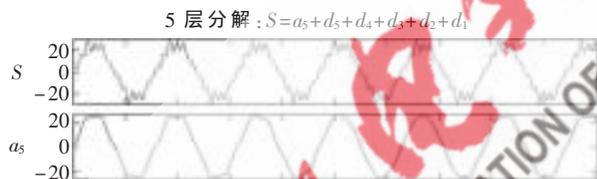


图4 仿真测试2中的原始信号和5层分解结果

选用的小波函数不变, 当分解层数为 6 时, 得到低频部分如图5中的 a_6 所示。

3.2 结果分析

仿真测试1中, 原始信号中含有的谐波分量单一, 结合表1, 选用4层小波变换分解, 通过将高频系数 D_1 置零, 直接滤除原始信号中的13次谐波, 从而实现基波的近似还原。

仿真测试2中, 原始信号中含有5、7、11、13次谐波, 各次谐波分量比较复杂, 且各次谐波的相角均不同于基波。理论上, 可以通过4层分解, 并将相关层数 D_1 、 D_2 置零的方式滤除各次谐波, 但从图3、图4、图5可以

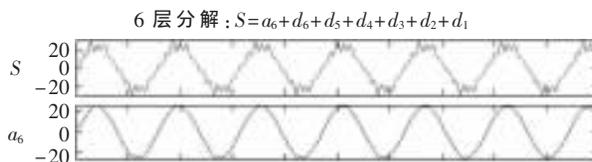


图5 仿真测试2中的原始信号和6层分解结果

得出: 4层分解的结果和信号中的基波部分 $25\sin(\omega x)$ 还存在较大差距, 效果并不理想; 继续对该信号进行分解, 5层的分解效果也存在较大差距, 6层分解得到的结果和基波较为一致, 停止继续分解。

在电力系统中, 各次谐波分量都是有害无益的, 通过小波变换、相关系数置零等方式, 可以轻松实现各次谐波的滤除, 达到谐波治理的目的。但是, 由于多分辨率分析只对低频部分进行分解, 对高频部分弃之不顾, 因此对于高频部分分辨率比较低, 若要对高频部分某一次的谐波分量进行细化, 多分辨率分析思想就显得无能为力了。

随着各类电器设备的大量投入使用, 对电力可靠性的要求越来越高, 而电力系统固有的谐波问题对整个电力网络和各种设备的稳定运行带来严重的威胁, 同时也造成大量额外的电能损耗。本文将小波分析理论引入谐波的治理中, 利用多分辨率分析思想, 对电力信号中的高次谐波进行滤除和抑制, 达到治理高次谐波的目的。通过仿真分析, 证明该方法切实有效, 为利用小波分析进行谐波治理提供了理论依据。

参考文献

- [1] 谢易澎. 电力系统谐波及其抑制技术的研究[D]. 大连理工大学硕士论文, 2008.
- [2] 飞思科技产品研发中心. Matlab 6.5 辅助小波分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 田苗苗. 小波分析和小波包在图像压缩中的应用[J]. 安徽科技学院学报, 2009, 23(5): 32-34.
- [4] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与 Matlab R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [5] 武晓冬, 朱燕芳. 小波分析在高次谐波抑制上的应用研究[J]. 电力学报, 2009, 24(2): 125-127.

(收稿日期: 2010-07-23)

作者简介:

赵广超, 男, 1983年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 通信工程, 计算机科学与技术。