

基于小波自相关函数的电磁干扰 有源滤波方法研究

陈文洁, 杨旭, 王兆安

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电力电子电路在换流过程所产生高频开关噪声的各项特征, 提出了基于小波自相关函数的电磁干扰有源滤波新方法. 该方法运用小波多分辨分析实现了电网侧开关噪声的快速提取, 再根据复小波变换获得噪声的有效幅度谱和相位谱信息, 并结合自相关函数辨识出干扰信号的主频, 从而建立了一种多层次处理和多层次描述的噪声辨识方法. 研究表明, 该方案能够克服传统干扰抵消抑制技术中频谱泄露的问题, 提高检测精度, 检测信号的最大绝对误差不超过 2%, 噪声的衰减平均达 20 dB 以上, 因而有源抑制为高频开关噪声提供了新的思路.

关键词: 有源滤波; 小波变换; 电磁干扰

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)04-0459-04

Noise Suppression Method for Improvement of Power Quality Using Wavelet Transforms

Chen Wenjie, Yang Xu, Wang Zhao an

(School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: To reduce the high frequency switching noise generated by power electronics equipment, a novel noise suppression method using wavelet transforms and auto-correlation function is proposed. The switching noise is extracted by wavelet multiresolution analysis, the enough features of signal in frequency and time domains are obtained by using arguments and magnitudes of complex wavelet transform as well as main frequency evaluation of auto-correlation function, thus the multi-level process and multi-level description method for disturbance identification is established. The simulation results show that the proposed method can not only overcome the defect of classical noise cancellation method that may has the spectrum leakage and fence effect, but also improve the precision of noise measurement, and the maximum absolute error is no more than 2%, meanwhile, the average noise attenuation is larger than 20 dB. This new method provides another concept for the active cancellation of high frequency switching noise.

Key words: active filter; wavelet transform; electromagnetic interference

目前,为了有效地抑制开关器件产生的电磁噪声,提出了多种不同类型的电磁干扰有源滤波器^[1](AEF).根据补偿信号的不同,AEF可以分为电流型补偿^[2-5]和电压型补偿^[1,5-7].根据控制方法的不

同,可以分为前馈控制型^[8,9]、反馈控制型^[1,7]以及前馈/反馈混合控制型^[9,10].近来,又出现了与无源滤波器相结合的混合型 AEF^[9,11].

但是,上述各种 AEF 噪声信号的检测均采用基

收稿日期: 2005-09-29. 作者简介: 陈文洁(1974~),女,在职博士生,讲师;王兆安(联系人),男,教授,博士生导师.
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50237030).

于频域分析的模拟高通滤波器检测法,其缺点在于,为了将电网侧 50 Hz 工频信号与微弱的噪声信号完全分离,传感器的下限截止频率必须足够高,致使其有效频带变窄,造成取样噪声信号的频率丢失。另外,滤波器中心频率对元件参数十分敏感,受外界环境影响较大,难以获得理想的幅频和相频特性,检测精度无法保证。目前,尚没有在电磁干扰有源滤波器中采用数字技术进行电磁干扰(EMI)信号检测以及有源补偿的报道。

本文首先比较了傅里叶变换与小波变换分析处理 EMI 信号的差异,其次阐述了基于小波分析的 EMI 信号辨识和重构算法以及 AEF 的实现过程,最后通过仿真软件对实际含噪声信号的分析 and 处理,证明了该方法的有效性。

1 傅里叶分析与小波分析处理 EMI 信号的比较

电磁兼容标准规定的传导 EMI 的频率范围在 9 kHz ~ 30 MHz 之间,目前绝大多数电力电子装置的开关频率在 50 kHz ~ 1 MHz 之间,它们的正常工作频率就在传导 EMI 的范围之内,加之寄生电容、电感等各种寄生参数的存在,导致在开关开通和关断的同时产生前、后沿很陡的脉冲并附加高频寄生振荡。因此,就电磁干扰的性质而言,电力电子装置产生的 EMI 主要是由 IGBT、MOSFET 等功率器件开关噪声造成的,在时域内表现为与开关周期同步的尖峰振荡。分析处理此类 EMI 信号,运用傅里叶变换和小波变换的差别体现在以下几个方面。

(1) 傅里叶分析是最为经典的频率分析算法,目前许多高档数字示波器都配备傅里叶分析单元模块。小波分析也能进行频域分析,但是必须根据具体问题选择合适的小波基,否则难以达到满意的效果。

(2) 傅里叶分析可处理的最高信号频率为采样频率的一半,小波分析可处理的最高信号频率等于其采样频率,因此对于高频信号,小波分析的优势更加明显。针对本文所研究的 EMI 信号,小波分析比傅里叶分析更适用。

(3) 傅里叶分析的缺点是,当把信号转换到频域时,时域的信息完全丢失,当重现某信号的傅里叶分析结果时,无法知道该 EMI 是何时产生的。小波分析保留了信号的时、频信息,不仅包括信号的幅度而且包括其相位,这才有可能在 AEF 中重构一个与原信号大小相等、方向相反的信号,并最终抵消干扰。

因此,小波分析比傅里叶分析更适用于处理电力电子电路中的开关噪声。

2 利用小波自相关函数消除开关噪声

2.1 小波分析算法

从数学角度看,能量函数 $f(t)$ [即 $f(t) \in L^2(R)$] 的小波变换就是将 $f(t)$ 分解为不同尺度(频率)的信号,其定义为函数族 $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为积分核的积分变换,即

$$W_x(f(t); a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

式中: a 为尺度参数; b 为定位参数。改变 a , 对函数具有伸展和收缩的作用,改变 b , 会影响函数在时间轴上的平移。

设 $\psi_{a,b}$ 的中心为 t_0 , 半径为 a , 则可知 $\psi_{a,b}$ 的中心为 $b + at_0$, 半径为 a 。由式(1)可知,小波变化给出了信号 $f(t)$ 具有一个时间窗

$$t_w = [b + at_0 - a, b + at_0 + a] \quad (2)$$

的局部信息。由于小波基函数快速衰减的特性,时窗范围之外的部分可以被忽略。同理,可以计算出频窗 f_w 为

$$f_w = \left[\frac{0}{a} - \frac{1}{a}, \frac{0}{a} + \frac{1}{a} \right] \quad (3)$$

如果把 $0/a$ 作为频率变量,把平面 t 作为时间-频率平面,则在平面 t 上具有一个矩形的时间-频率窗,即

$$[b + at_0 - a, b + at_0 + a] \cdot \left[\frac{0}{a} - \frac{1}{a}, \frac{0}{a} + \frac{1}{a} \right] \quad (4)$$

当分析高频分量时,时窗自动变窄,频窗高度增加;当分析检测低频特性时,时窗自动变宽,频窗高度减少。时-频窗面积受 Heisenberg 测不准原理限制,为一常数 4 ,从滤波的观点看, $\psi_{a,b}(\cdot)$ 相当于一个带通滤波器,其中心频率和带宽之比为

$$\frac{0/a^{-1}}{2/a^{-1}} = \frac{0}{2} \quad (5)$$

它与中心频率的位置无关。

2.2 基于小波自相关函数的 AEF 的实现

EMI 有源滤波器的实质就是要产生一个与被测信号幅度相等、相位相反的补偿信号,以抵消噪声,采用小波分析法实现 AEF 的流程如图 1 所示。噪声源为一台功率 500 W、开关频率 100 kHz 的开关电源。原始信号由 100 MHz 带宽 Tektronix

3012 数字存储示波器观察并纪录,经 Matlab6.5 仿真软件完成小波分析与计算。

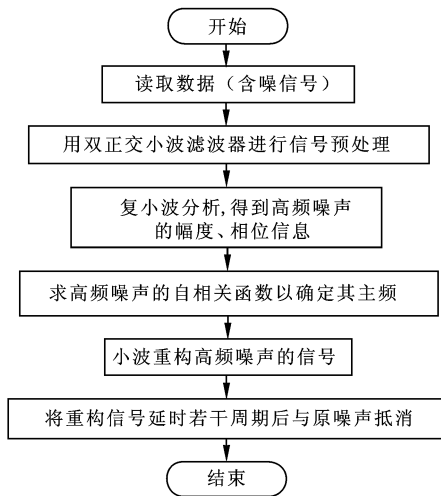


图1 利用小波分析实现 AEF 的设计流程

与传统的模拟检测技术相比,小波分析可以方便地将待分析的高频噪声从电网中分离、重构出来。另一方面,信号处理的延时则成为需要考虑的新问题。如前所述,耦合到电网侧的开关噪声呈现与开关周期同步的高频寄生振荡,即高频噪声分量存在一个主频,它集中了开关噪声的大部分能量,主频以外的其他分量可以忽略不计。因此,只要估计出开关噪声的主频,结合前面小波分析得到的信号幅值和相位信息,就能够保证经过运算的延时之后,仍可以在正确的时刻将重构信号以合适的相位补偿回去。

开关噪声的主频估计是基于自相关函数法,这是一种统计方法。时间序列信号 $x(n)$ 在不同滞后时间 m 下的相关量称为该时间序列信号的自相关函数

$$r_X(m) = E\{x^*(n)x(n+m)\} \quad (6)$$

如果观测值的点数为 N ,则估计 $r_X(m)$ 的方法为

$$\hat{r}_X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n)x_N(n+m) \quad (7)$$

由于 $x(n)$ 只有 N 个观测值,因此对于每一个固定的延迟 m ,可以利用的数据只有 $N-1-|m|$ 个,且在 $0 \sim N-1$ 的范围内, $x_N(n) = x(n)$ 。考虑乘积项的长度,自相关序列的估计为

$$\hat{r}_X(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x_N(n)x_N(n+m) \quad (8)$$

通过计算超出一定门限的极大值点,测得相邻两个极大值间的时间间隔,即可得到开关噪声的周期,具体步骤如下:

(1) 把小波变换后的结果作为被处理信号,取足够长的数据,计算其自相关函数;

(2) 通过遍历查找,确定若干局部极大值点 $N_i (i=1, 2, \dots, n)$,计算相邻两个极大值之间的时间;

(3) 对各点所对应的周期取平均值,排除误差最大点;

(4) 对剩余各点所对应的周期取平均值,其结果即近似为开关噪声的周期,对其求倒数,即为开关噪声的主频。

获知了噪声信号的主频,才有可能对其进行精确定位,实现延时逐点补偿,从而达到噪声有源抑制的目的。

3 分析结果

由于待分析的噪声信号与基波和各种低次谐波同时被取样,因此首先需要进行信号预处理。考虑到频率在 1 MHz 以上的噪声较容易用小型无源滤波器消除,为了分析问题方便,也将其从待分析的信号中滤除。图 2 所示为原始信号通过各子带滤波器后输出的小波分解图。

图 3a 为提取的高频开关噪声信号,图 3b、图 3c 分别为信号的局部放大图以及用复值小波分析得到该信号的特征幅度谱和相位谱图。幅度谱上每一条窄带的宽度反映了信号在对应时间区域的周期,可以看出,信号幅度呈现规律性的变化,对应时域内的尖脉冲,每个脉冲信号伴随着一次开关通断的过程。分析相位谱发现,每次开关由开通到关断的过程其脉冲振荡波形都具有超前的初始相角,即相位谱上频率低于 50 kHz 的部分表现为小波系数由大到

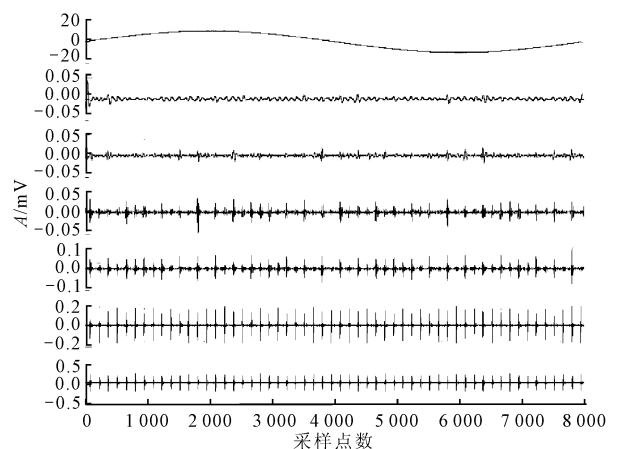
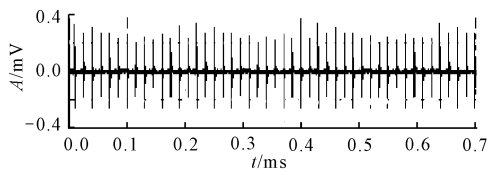
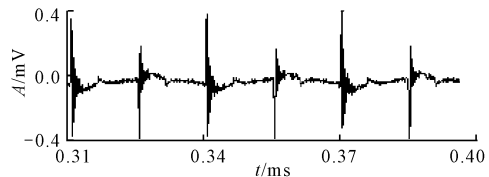


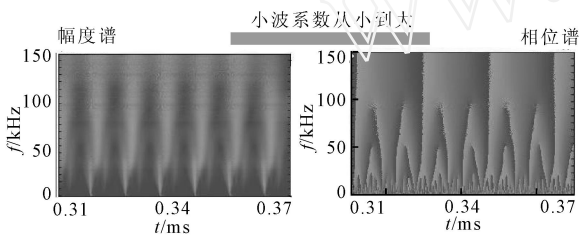
图2 原始信号通过各子带滤波器后的分解图



(a) 开关噪声



(b) 噪声片断



(c) 特征信息

图3 采用小波分析提取的开关噪声及其特征信息

小的变化.反之,谱图上小波系数由小到大的突变则意味着滞后的初始相位,即开关每次由关断到开通的过程.随着频率的升高,寄生振荡加剧,从相位谱上可见系数变化频次加速,意味着开关周期整数倍的高频振荡.

图4为通过特征信息小波重构出来的噪声信号,可以看出,重构信号较好地再现了原始信号的各项特征指标.图5为原始信号与重构信号相比较得到的误差值,可知重构信号的最大绝对误差不超过2%.

图6为将重构信号延时若干周期后,与原噪声信号相抵消,得到的补偿之后的信号.可以看出,在0.11 ms之前,补偿信号尚未叠加进去,此时的噪声幅度与原始噪声一致.在0.11 ms之后,由于引入经小波重构的补偿信号,噪声幅度明显衰减,平均衰减幅度达20 dB以上.

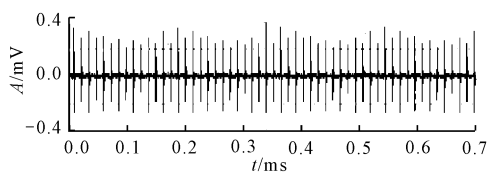


图4 经小波重构的噪声信号

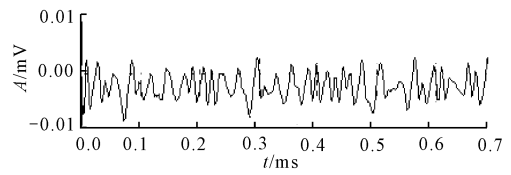


图5 原始信号与小波重构信号的误差

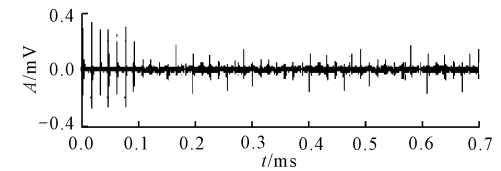


图6 经过有源补偿后的噪声信号

4 结论

(1) 针对电力电子装置的功率开关器件产生的高频电磁干扰,小波分析能够在短时间内确定信号的幅度、相位等特征信息,实现噪声的精确重构,以便于用 AEF 进行噪声的有源抵消.

(2) 基于小波分析的电磁干扰数字化有源滤波算法克服了传统 AEF 中检测精度不高、传感器带宽不易控制的缺点,能够准确实现高频开关噪声的延时逐点补偿,达到净化电网的目的.

(3) 本文首次将数字算法应用于 AEF 的噪声检测和信号重构,仿真分析表明该方法准确、高效,所设计的滤波器工作特性稳定,滤波效果优良.

(4) 虽然补偿结果为仿真所得,实时性尚需进一步通过实验验证,但是本文所提出的基于小波自相关函数的分析方法为开关噪声的有源抑制提供了新的思路.

参考文献:

- [1] La White L, Schlecht M F. Design of active ripple filters for power circuits operating in the 1-10 MHz range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 310-317.
- [2] Chow A C, Perreault D J. Active EMI filters for automotive motor drives [A]. IEEE Power Electronics in Transportation, Detroit, USA, 2002.
- [3] Cantillon-Murphy P, Neugebauer T C, Brasca C, et al. An active ripple filtering technique for improving common mode inductor performance [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(2): 45-50.

(下转第 467 页)

IPPSO 具有良好的收敛性能。

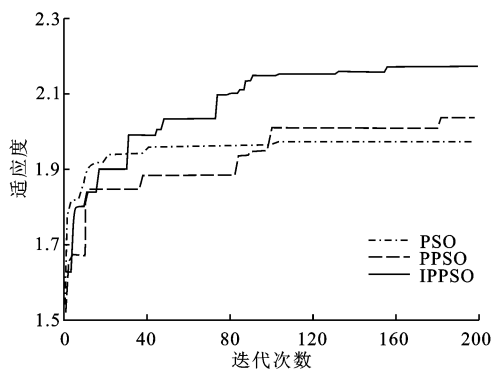


图3 计算 IEEE30 节点系统收敛过程曲线图

5 结论

提出了基于改进多粒子群算法的无功优化方法,该算法在增强各个粒子群间的合理协同作用,引入惯性变量以及扰动策略等方面进行了改进.通过对 IEEE 6 节点和 IEEE 30 节点系统的计算表明,将该算法应用于电力系统无功优化是正确有效的,具有较稳定的收敛性能和较高的计算精度.其主要的缺点是,随着粒子群个数的增加,优化过程所需时间也随之增加.所以,应开发其内在算法的并行计算特性来弥补这个不足,使其在无功优化等领域具有更广阔的应用前景.

参考文献:

[1] Zhang Haibo, Zhang Lizi, Meng Fanling. Reactive power optimization based on genetic algorithm [J]. IEEE Trans on Power System, 1998, 2(18): 1448-1453.

- [2] 王宏章,吴耀武. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 15-18.
- [3] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y, et al. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment [J]. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [4] 唐剑东,熊信银,吴耀武,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 81-84.
- [5] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. The IEEE International Conference on Power System, Perth, Australia, 1995.
- [6] 李爱国. 多粒子群协同优化方法[J]. 复旦学报(自然科学版), 2004, 43(5): 923-925.
- [7] Shi Y H, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [A]. The Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001.
- [8] 赵涛,熊信银,吴耀武. 基于混沌优化算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2003, 31(3): 20-25.
- [9] Lee K Y, Park Y M, Ortis J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch [J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(5): 1147-1153.
- [10] 马晋韬, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353.
- [11] 王建学,王锡凡,陈皓勇,等. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 124-129.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 462 页)

[4] Ogasawara S, Ayano H, Akagi H. An active circuit for cancellation of common mode voltage generated by a PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(5): 835-841.

[5] Poon N K, Liu J C P, Tse C K, et al. Techniques for input ripple current cancellation: classification and implementation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(6): 1144-1152.

[6] Takahashi I, Ogata A, Kanazawa H, et al. Active EMI filter for switching noise of high frequency inverters [A]. The Power Conversion Conference, Nagao-ka Japan, 1997.

[7] Farkas T, Schlecht M F. Viability of active EMI filters for utility applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(3): 328-337.

[8] Zhu Mingjuan, Perreault D J, Caliskan V, et al. De-

sign and evaluation of an active ripple filter with Rogowski-coil current sensing [A]. 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Charleston, USA, 1999.

- [9] Chow A C, Perreault D J. Design and evaluation of a hybrid passive/active ripple filter with voltage injection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 471-480.
- [10] Hamill D C. An efficient active ripple filter for use in DC-DC conversion [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3): 1077-1084.
- [11] Son Y C, Sul S K. A new active common-mode EMI filter for PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1309-1314.

(编辑 杜秀杰)