

基于 FFT 和小波变换的谐波分析策略

李战明, 刘 燕

(兰州理工大学, 兰州 730050)

摘要: 有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置,它能够对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿。该文提出了 FFT 变换与小波变换相结合的检测电路,小波变换分析将信号分成了稳态部分及非稳态部分,稳态部分采用傅里叶变换,非稳态部分采取模极大值分析。利用 Matlab 对其仿真很好的验证了该方法是可行的,可有效滤除谐波。

关键词: FFT; 小波变换; 模极大值分析; 有源滤波器

中图分类号: TM7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0682(2014)02-0096-03

The harmonic analysis strategy based on FFT and wavelet transform

LI Zhanming, LIU Yan

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: APF is a new power electronic devices that can suppress harmonics dynamic and compensate reactive power. It also can compensate the harmonics on the size and frequency of change and reactive power of change. In this paper, FFT transform and wavelet transform combined detection circuit, wavelet transform analysis divides the signal into a steady-state and non-steady-state part, steady-state part use the Fourier transform, non-steady-state use modulus maxima analysis. Using Matlab we conclude the method is feasible and can effectively filter out harmonics.

Key words: FFT; wavelet transform; modulus maxima analysis; active filter

0 引言

谐波危害一方面表现在它使电能在生产、传输和利用的效率降低,加速设备老化,缩短其使用寿命,甚至损坏设备;另一方面表现在它致使大多数的电力电子设备的功率因数降低,给电网造成额外负担,影响供电质量^[1]。有源滤波器系统是一种实时解决谐波污染的控制策略,它包含两部分,即指令运算电路和补偿发生电路。其中关键部分是指令电流运算电路,它的核心是检测补偿对象电流中的谐波和无功等电流分量,目前常用的谐波检测方法主要有:模拟滤波器法、基于瞬时无功功率的谐波检测法^[2]、基于傅里叶变换的谐波检测法及基于小波变换的谐波检测法等几种方法。其中傅里叶变换分析方法有很好的频率分辨率,它可以精确确定出各次谐波的幅值和相位,但是它无法给出某时段内信号的频谱分布情况以及无法确定振幅和频率间断点的位置和持续时间,只适用于稳定信号的分析处理。小

波变换具有很好的时频局部化特点,它的时频窗口大小将随着分析频率的变化而变化,它通过采用不同的分析尺度,可以聚焦到信号的细节,特别适合于对电能质量中电压幅值或频率随时间冲击性变化的畸变波形的分析,但它无法准确地确定信号所包含的真实频率及信号能量的分布情况。该文结合了傅里叶变换和小波变换各自的优缺点,用二者结合的检测方法,能很好地适用于各类谐波信号的分析,并将此检测算法应用于并联有源电力滤波器。

1 有源滤波器工作原理

有源滤波器是一种新的基于大功率逆变器的动态电能质量治理及电力节能装置。它将电力电子技术、计算机技术和现代控制技术应用于电力系统,通过对装置输出电压相位控制,对电力系统的网络参数和网络结构实施灵活、快速的控制;实现动态补偿谐波、无功、负序及频率变化的电能质量问题,减少网络损耗。对于增大有功输送能力,抑制谐波,提高电能质量都起到很好的作用。具有响应速度快,吸收无功连续,谐波电流小,损耗低等优点^[3]。图 1 为有源滤波器的工作原理图。

收稿日期:2013-10-07

作者简介:李战明(1962),男,陕西武功人,博士,教授,兰州理工大学电气工程与信息工程学院院长,主要从事控制理论与控制工程学科的教学与科研工作。

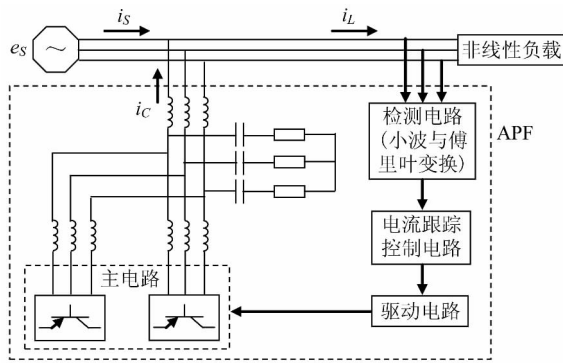


图 1 有源滤波器原理图

工作原理: 检测补偿对象的电压和电流, 经指令电流运算电路计算出补偿电流的指令信号, 该信号经补偿电流发生电路放大, 得出补偿电流, 补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流抵消, 最终变成纯净的只有基波成份的电源电流。

2 基于 FFT 和小波变换的谐波检测法

傅里叶变换是时域到频域相互转换的工具, 傅里叶变换实质是把信号 $f(t)$ 这个波形分解为许多不同频率的正弦波之和, 进而对各次谐波分量进行分析。小波变换^[4]是一种时间频率分析方法, 它将时域信号分解为频域信号。它在对数尺度上将信号频谱分解为互不重叠的频带, 这个分解通过把信号转换为一系列正交基, 称之为小波基。

对于函数 $\Psi(t)$, 当且仅当其傅里叶变换满足条件 $C_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 时, 才能被认为是一小波, C_Ψ 就是小波函数。其中 $\Psi(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换, $\Psi(t)$ 是一个能量有限的信号函数, $\Psi(t) \in L^2(R)$ 称 Ψ 为一个基小波或母小波。将母小波经伸缩和平移后, 可得到

$$\Psi_{a,\tau}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$$

$$a, \tau \in R; a \neq 0$$

称 a 为伸缩因子, τ 为平移因子。定义

$$(W_\Psi f)(a, \tau) = \langle f, \Psi_{a,\tau}(t) \rangle =$$

$$|a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt$$

为关于基小波 Ψ 的连续小波变换, 其中 $\Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ 表示为 $\Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ 的共轭运算。变换后的函数是二维的。通常, 使用计算机实现小波变换时, 将尺度参数 a 和平移参数 τ 进行离散化, 即 $a = 2^j, \tau = 2^k$, $j = 0, 1, 2, \dots, k \in Z$; 从而得到二进离散正交基, 定义为 $\Psi_{j,k}(t)$

$$= 2^{-\frac{j}{2}} \Psi(2^{-j}t - k), \quad j = 0, 1, 2, \dots, k \in Z.$$

3 基于 FFT 和小波变换的有源滤波器分析策略

当电力设备发生异常时必然会存在大量噪声、突变信号或高频谐振干扰。此时, 小波变换作为突变、瞬变信号的有力工具, 可以对突变或高频振荡进行分析。在 MATLAB 环境下, 首先利用离散小波变换分解和重构将信号分解为低频(概貌)部分和高频(细节)部分进行处理。由于高频部分一般含有非稳态谐波及突变、间断点等奇异点信号分量, 对此部分信号进行模极大值小波分析, 得到突变或间断点出现的时刻和噪声信号; 对变换后的低频部分采用 FFT 变换进行分析, 提取稳态谐波分量的幅值。谐波检测算法如图 2 所示。

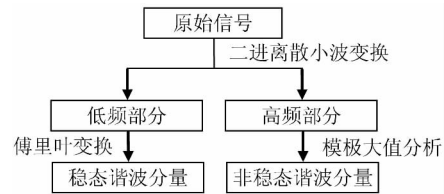


图 2 谐波检测算法框图

为了使有源滤波器更准确跟踪速度和鲁棒性, 采取前馈补偿和重复控制的方法, 如图 3 所示, 其中 DWT 和 FFT 代表小波变换和傅里叶变换的检测算法, i_{ref} 表示负载电流, i_{out} 表示补偿后的电流^[5]。

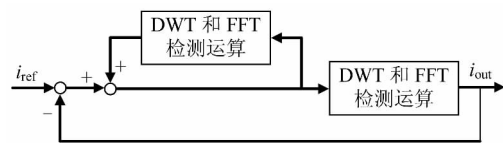


图 3 检测运算框架图

有源滤波器谐波检测模块如图 4 所示, 首先利用 $d-q$ 模型将三相负载电流 i_a, i_b, i_c 转化为两相电流 i_α, i_β , α 和 β 坐标轴不包含零序电流。然后两相电流 i_α, i_β 减去两相基波电流 $i_{\alpha f}, i_{\beta f}$ 就是两相谐波电流 $i_{\alpha h}, i_{\beta h}$, 最后两相谐波电流和零序电流又利用 $d-q$ 模型转换为三相电流。在滞环电流控制器中, 变换后的三相电流作为产生 IGBT 开关信号的参考信号。

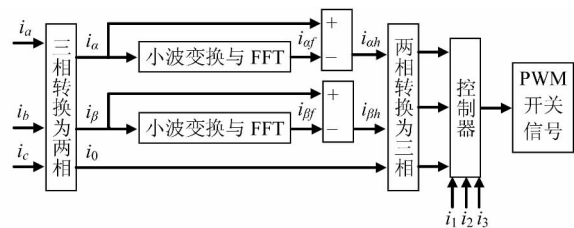


图 4 小波变换与 FFT 变换检测控制模块图

4 利用 MATLAB 进行仿真分析

在电网系统中,由于其平衡的三相系统,偶次谐波已经被消除,故而只有奇次谐波对系统造成影响。在三相整流负载中,会出现 $6n \pm 1$ (5、7、9...) 次谐波。在现实中,还会出现一些噪声突变信号和噪声干扰信号,故而实验构建了一个复杂信号,其含有基频、3、5、11、13 次稳态谐波信号,按指数规律衰减的 15 次谐波以及高斯白噪声信号。其原始信号如图 5a 所示。对该谐波信号进行 FFT 变换得到信号频谱图,如图 5b 所示,由图不仅可以看出信号含有基波以及 3、5、11、13、15 次谐波信号,还可以看出 FFT 变换分析的局限性,它不能对非稳定信号分析处理,无法确定振幅和频率间断点的位置和持续时间。

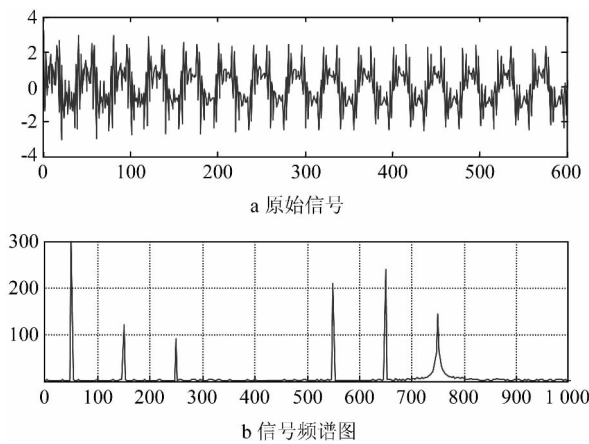


图 5 噪声信号

原始信号仿真时,采用 2 000 Hz 采样频率,那么采样信号的最高频率为 1 000 Hz。在对各小波类型进行对比后,采用 db20 对小波进行 4 层分解,各频带频率分布如表 1 所示。处理后的小波变换的高频信号与低频信号如图 6、图 7 所示。由于 50 原始信号的稳态谐波分量的最大频率为 650 Hz,恰好在低频系数 a_2 的频带范围内,故 a_2 包含了其所有的稳态谐波分量。利用上述策略,将 a_2 进行傅里叶变换,得到信号的稳态部分的幅值,如图 8 所示。

表 1 频率分布图

a_1	a_2	a_3	a_4
0 ~ 1000	0 ~ 500	0 ~ 250	0 ~ 125
d_1	d_2	d_3	d_4
1 000 ~ 2 000	500 ~ 1 000	250 ~ 500	125 ~ 250

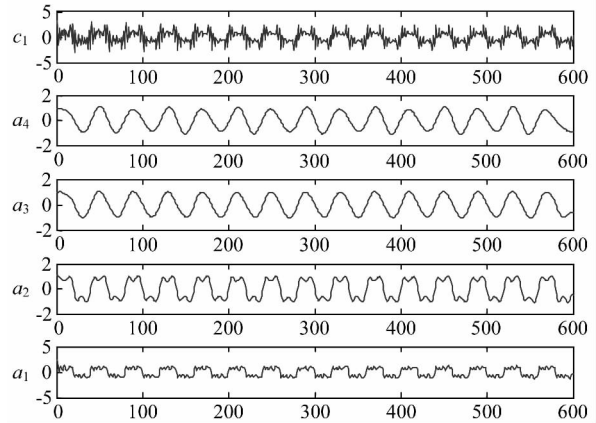


图 6 小波变换处理后的高频信号

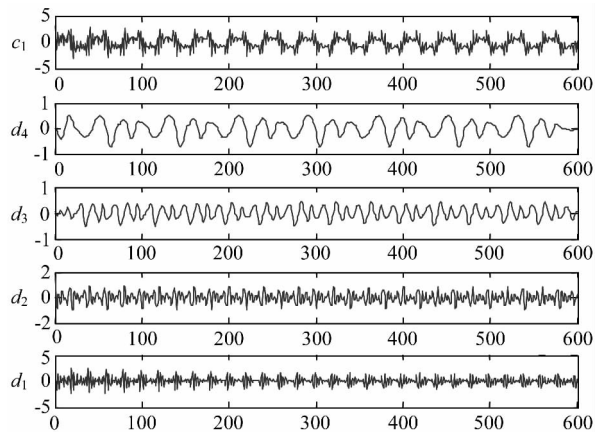


图 7 小波变换处理后的低频信号

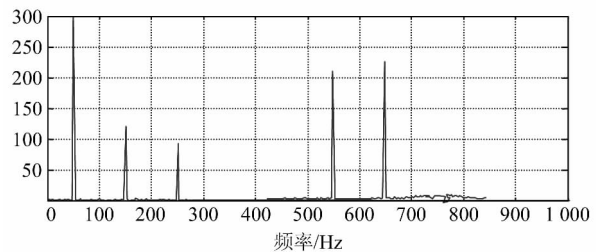


图 8 稳态部分 FFT 变换

由于经 db20 分解和重构后,信号的高频部分包含了信号的所有奇异点及其突变点等非稳态谐波部分,故在此对信号的高频部分采取了模极大值分析方法。在试验中可以判断模极大值就是信号的奇异点。依据图 7 中高频部分 d_1 ,可以看出在信号采样点 25 有模极大值点,由此判断采样时刻为 0.012 5 s。

5 结论

有源滤波器可以实时地检测并消除系统的各次谐波,其检测电路运用了 FFT 变换和小波变换,不仅利用了 FFT 变换很好的频率分辨率,可精确得到稳态谐波分量的各次谐波幅值,而且利用了小波变换很好的时频特性,可对原信号分解为高频部分与

(下转第 104 页)

传感器系统为例,进行仿真试验。传感器的测试数据如表 1 所示。

表 1 传感器测量数据

传感器 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.40	1.30	1.58	0.65	1.34	1.12	1.22	1.50
2	1.39	1.29	1.58	0.66	1.34	1.11	1.22	1.50
3	1.40	1.31	1.58	0.67	1.33	1.13	1.23	1.50

设定阈值 $\varepsilon = 0.60$, 得到邻接矩阵 R 和简化矩阵 \tilde{R} :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

按照式 (8) 和式 (9) 得出:

$$S_r [1] = S_r [2] = 4,$$

$$S_r [3] = S_r [4] = 2,$$

$$S_r [5] = S_r [6] = 1,$$

$$S_r [7] = S_r [8] = 0$$

当 $i = 1$ 时, $S_1 = \{1, 2, 3, 5, 8\}$, 满足式 (9); 当 $i = 2$ 时, $S_2 = \{2, 3, 5, 7, 8\}$, $r_{3,7} = 0$ 不满足式 (11),

故实际的最大一致组为 $\{1, 2, 3, 5, 8\}$ 。根据上述分析, 该文算法的时间复杂度为 $O(P)$ ($1 \leq P \leq 8$)。

若采用文献 [3] 方法, 依次搜索含 n ($n = 8, 7, \dots, 1$) 个传感器的子图, 直至找到最大一致传感器组为止, 则共要分析 P 个传感器组, 即运算的时间复杂度为 $O(\tilde{P})$, 其中:

$$\tilde{P}_{\min} = C_8^8 + C_8^7 + C_8^6 + 1 = 38,$$

$$\tilde{P}_{\max} = C_8^8 + C_8^7 + C_8^6 + C_8^5 = 93$$

通过对比可以发现: 通过矩阵预处理和矩阵元素分析的方法, 大大缩小最大一致传感器组的搜索范围, 降低运算的复杂性, 节约程序执行时间, 提高运算效率。

4 结论

针对最大一致传感器组算法复杂的问题, 该文首先使用对称的置信距离, 然后得出初始邻接矩阵并进行简化运算, 最后分析简化后的矩阵元素得出最大一致传感器组。实验结果表明: 该方法可以准确、快速地判断出最大一致传感器组, 方法简单可靠, 运算量小。

参考文献:

[1] Lou R C, Lin M, Scherp P S. Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(4): 386-396.

[2] 陈忠德, 蒋静坪. 一致性多传感器数据融合方法的改进 [J]. 传感器技术, 1995(5): 52-55.

[3] 车录锋, 周晓军, 程耀东. 考虑传感器失效的多传感器加权数据融合算法 [J]. 工程设计, 1999(1): 38-40.

[4] 赵志刚, 赵伟. 基于动态不确定度理论的多传感器系统传感器失效检测方法 [J]. 传感技术学报, 2006(6): 2723-2726.

[5] 王华, 邓军, 王连华, 等. 改进的一致性数据融合算法及其应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2009(4): 590-594.

(上接第 98 页)

低频部分, 分辨出稳态部分及非稳态部分信号, 进而采用模极大值分析到具体的突变点发生的位置及时间。在二者的相互结合下, 有源滤波器可即时地消除谐波成分, 达到系统的稳定运行。

参考文献:

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 中国电力出版社, 2010: 175-180.

[2] 陈文杰. 基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波和无

功电流检测 [J]. 机电信息, 2013(3): 140-142.

[3] 谢运祥. 电力有源滤波器及其应用技术的发展 [J]. 电工技术杂志, 2000(4): 1-3.

[4] 周林. 基于小波变换的谐波测量方法综述 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 67-74.

[5] Tzann-Shin Lee. A repetitive control approach for three-phase shunt active power filter with real-time wavelet transform [C]. PEDS 2009.