

# 基于迭代算法的有源电力滤波器谐波电流实时检测新方法

李自成, 孙玉坤

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**[摘要]** 目前, 已经提出了多种有源电力滤波器谐波及无功电流检测方法, 尽管这些方法各有特点, 但都存在着难以克服的问题, 如计算量大, 实时性差, 检测精度不高等。文章在负载电流分析的基础上, 提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器谐波电流实时检测方法, 该方法具有计算量非常小, 实时性好, 检测精度高等特点。理论分析与仿真研究证实了该方法的正确性。

**[关键词]** 有源电力滤波器; 谐波电流; 有功电流; 无功电流

**[中图分类号]** TM1; TM714; TM93 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2006) 01-0046-05

## 1 引言

随着各种半导体变流装置在电力系统中的应用, 谐波干扰和无功增加的问题日益严重, 电力谐波治理已经成为一个广泛关注的课题。电力滤波分为无源和有源两种, 它们的工作原理完全不同, 有源电力滤波器是近年来研究较多的、一种很有希望的方法, 是一种主动式的谐波电流补偿装置, 其性能的好坏与它所采用的谐波及无功电流检测方法有很大的关系。现有的谐波及无功电流检测方法主要有带阻选频法, 有功和无功分量分解法, 基于瞬时无功功率理论的虚实功率合成法<sup>[1]</sup>, 基于神经元的自适应法<sup>[2, 3]</sup>以及基于补偿电流最小原理的谐波电流检测方法<sup>[4~6]</sup>等。尽管这些方法各有特点, 但都存在着难以克服的问题, 如计算量大, 实时性差, 检测精度不高。笔者在负载电流分析的基础上, 提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器谐波电流实时检测方法, 这是一种具有较大实用价值的谐波电流实时检测方法。

## 2 检测原理

补偿电流实时检测的理论基础为: 当负载电流为周期电流时, 负载电流与负载基波有功电流差的绝对值在一个周期内积分值最小。

### 2.1 检测原理

有源电力滤波器的工作原理如图1所示。

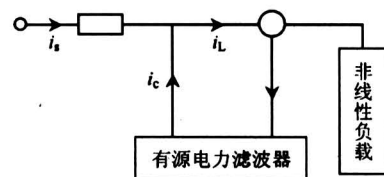


图1 有源电力滤波器工作原理图

Fig.1 Diagram of work principle for active power filter

设单相电路中电源电压为

$$u_s(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

非线性负载电流为

$$i_L(t) = i_1(t) + i_h(t) = i_{1p}(t) + i_{1q}(t) + i_h(t) = i_{1p}(t) + i_c(t) \quad (2)$$

**[收稿日期]** 2004-10-15; **修回日期** 2005-01-17

**[基金项目]** 江苏省高新技术资助项目 (GB2004024)

**[作者简介]** 李自成 (1967-), 男, 四川眉山市人, 江苏大学讲师, 博士研究生

式中  $i_1(t)$  为  $i_L(t)$  中的基波电流,  $i_h(t)$  为谐波电流,  $i_{1p}(t)$ ,  $i_{1q}(t)$  分别为基波电流的有功分量和无功分量,  $i_c(t)$  为需要补偿的谐波及无功电流之和, 称为畸变电流。

为了使电网电源仅向负载提供基波有功电流  $i_{1p}(t)$ , 有源电力滤波器应提供的补偿电流的期望值为

$$i_a^* = i_L(t) - i_{1p}(t) = i_c(t) \quad (3)$$

设基波有功电流幅值为  $A^*$ , 则  $i_{1p}(t)$  可表示为

$$i_{1p}(t) = A^* \sin \omega t \quad (4)$$

为了确定  $A^*$ , 先假设补偿电流

$$\begin{aligned} i_a &= i_L(t) - A \sin \omega t = \\ i_c(t) + i_{1p}(t) - A \sin \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $A$  为可调待定参数。

当  $i_{1p}(t) - A \sin \omega t \neq 0$  时, 补偿电流不仅包含全部畸变电流, 而且包含部分基波有功电流。若能通过调节  $A$  值, 使得  $i_{1p}(t) - A \sin \omega t = 0$ , 则补偿电流仅提供全部畸变电流, 此时  $A = A^*$ ,  $i_{1p}(t) = A^* \sin \omega t$ , 从而达到分离畸变电流的目的。

由于  $i_{1p}(t)$  和  $i_c(t)$  为待测量, 因此无法由式 (5) 判断  $A$  应取何值, 方可使

$$i_{1p}(t) - A \sin \omega t = 0 \quad (6)$$

故先考虑补偿电流的绝对值积分

$$\begin{aligned} &\int_{t_1-T}^{t_1} |i_a(t)| dt = \\ &\int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t) + i_{1p}(t) - A \sin \omega t| dt \end{aligned} \quad (7)$$

因为  $i_{1p}(t)$  与  $A \sin \omega t$  为同频同相正弦波, 若调节上式中的  $A$  值, 使补偿电流的绝对值的积分值最小, 此时有

$$\begin{aligned} &\min \int_{t_1-T}^{t_1} |i_a(t)| dt = \\ &\int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t) + i_{1p}(t) - A^* \sin \omega t| dt = \\ &\int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t)| dt, \\ &i_{1p}(t_1) - A^* \sin \omega t_1 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

得到  $t_1$  时刻的基波有功电流  $i_{1p}(t_1) = A^* \sin \omega t_1$ , 从而可以求出  $t_1$  时刻补偿电流的瞬时值为

$$\begin{aligned} i_a(t_1) &= i_c(t_1) = i_L(t_1) - i_{1p}(t_1) = \\ &i_L(t_1) - A^* \sin \omega t_1 \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.2 原理证明

**命题** 若负载电流  $i_L(t)$  为周期电流, 当  $A$  等于基波有功电流的幅值时,  $\int_{t_1-T}^{t_1} |i_L(t) - A \sin \omega t| dt$  最小。

**证明**  $i_L(t)$  为周期电流, 则

$$i_L(t) = i_L(t + kT) \quad (10)$$

式中  $T$  为  $i_L(t)$  的周期,  $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

$i_L(t)$  一般满足狄里赫利条件, 它可展开为一个收敛的傅立叶级数, 即

$$\begin{aligned} i_L(t) &= a_0 + [a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t] + \\ &[a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t] + \dots + \\ &[a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t] + \dots = \\ &a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t] \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dt = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} i_L(t) dt \quad (12)$$

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T i_L(t) \cos(k\omega t) dt = \\ &\frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} i_L(t) \cos(k\omega t) dt \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T i_L(t) \sin(k\omega t) dt = \\ &\frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} i_L(t) \sin(k\omega t) dt \end{aligned} \quad (14)$$

上式中  $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

要使  $\int_{t_1-T}^{t_1} |i_L(t) - A \sin \omega t| dt$  最小, 考虑

$$f(A) = \int_{t_1-T}^{t_1} (i_L(t) - A \sin \omega t)^2 dt \quad (15)$$

当  $f(A)$  最小时, 必有  $\int_{t_1-T}^{t_1} |i_L(t) - A \sin \omega t| dt$  最小, 而

$$\begin{aligned} f(A) &= \int_{t_1-T}^{t_1} [i_L(t) - A \sin(\omega t)]^2 dt = \\ &\int_{t_1-T}^{t_1} [i_L(t)^2 - 2A i_L(t) \sin(\omega t) + A^2 \sin^2(\omega t)] dt = \\ &\int_{t_1-T}^{t_1} i_L(t)^2 dt - 2A \int_{t_1-T}^{t_1} i_L(t) \sin(\omega t) dt + \\ &A^2 \int_{t_1-T}^{t_1} \sin^2(\omega t) dt \end{aligned} \quad (16)$$

$$f(A)' = -2 \int_{t_1-T}^{t_1} i_L(t) \sin(\omega t) dt +$$

$$2A \int_{t_1-T}^{t_1} \sin^2(\omega t) dt =$$

$$-2 \int_{t_1-T}^{t_1} i_L(t) \sin(\omega t) dt + TA \quad (17)$$

由  $f(A)' = 0$  得到

$$A = \frac{2}{T} \int_{t_1-T}^{t_1} i_L(t) \sin(\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T i_L(t) \sin(\omega t) dt = b_1 \quad (18)$$

时  $f(A)$  最小,那么  $\int_{t_1-T}^{t_1} |i_L(t) - A \sin \omega t| dt$  最小,原理得证。

### 3 基于迭代算法的谐波电流检测方法

#### 3.1 基于迭代算法的谐波电流检测方法

根据检测原理,提出了一种基于迭代算法的谐波电流实时检测方法。

设负载电流  $i_L(t)$  在一个周期  $T$  中的  $N$  个采样(周期采样,采样周期为  $T/N$ ) 值为  $i_L(1), i_L(2), \dots, i_L(N), i_L(N)$  对应  $t_1$  时刻的采样值);对应的与电源电压  $u_s(t)$  同相的  $N$  个幅值为1的正弦值为  $\sin \omega t(1), \sin \omega t(2), \dots, \sin \omega t(N)$ 。

设  $A^{(n)}$  为在  $t_1$  时刻将要迭代计算出的负载电流基波有功电流幅值,  $A^{(n-1)}$  为在  $t_1$  时刻前一个采样周期中迭代计算出的负载基波有功电流幅值。当负载电流处于稳定状态时,  $A^{(n)}$  将在  $A^{(n-1)}$  的基础上逼近负载基波有功电流的真实幅值  $A^*$ , 在经过若干个采样周期后,  $A^{(n)}$  最终逼近  $A^*$  进入误差允许的范围,此时认为  $A^{(n)} = A^*$ 。当负载电流处于变化状态时,此时  $A^{(n)}$  将在  $A^{(n-1)}$  的基础上跟踪负载基波有功电流的真实幅值  $A^*$  的变化。由于无法确定  $A^{(n-1)}$  是大于  $A^*$  还是小于  $A^*$ , 因此,根据检测原理,应采用试探比较法。

设迭代步长为  $h$ , 则

$$P_0 = \{i_L(1) - A^{(n-1)} \sin \omega t(1)\}^2 + \{i_L(2) - A^{(n-1)} \sin \omega t(2)\}^2 + \dots + \{i_L(N) - A^{(n-1)} \sin \omega t(N)\}^2 \quad (19)$$

$$P_1 = \{i_L(1) - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t(1)\}^2 + \{i_L(2) - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t(2)\}^2 + \dots + \{i_L(N) - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t(N)\}^2 \quad (20)$$

$$P_2 = \{i_L(1) - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t(1)\}^2 + \{i_L(2) - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t(2)\}^2 + \dots + \{i_L(N) - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t(N)\}^2 \quad (21)$$

计算:

$$\Delta P' = P_1 - P_2 = 4h \Delta P \quad (22)$$

其中

$$\Delta P = - \sum_{i=1}^{N-1} i_L(i) \sin \omega t(i) - i_L(N) \sin \omega t(N) + A^{(n-1)} \sum_{i=1}^N (\sin \omega t(i))^2 \quad (23)$$

$\Delta P$  与  $\Delta P'$  具有相同的符号。

$$\Delta P_1 = P_1 - P_0 = 2h \Delta P + h^2 \sum_{i=1}^N \sin^2 \omega t(i) \quad (24)$$

$$\Delta P_2 = P_2 - P_0 = -2h \Delta P + h^2 \sum_{i=1}^N \sin^2 \omega t(i) \quad (25)$$

根据检测原理,首先计算出  $\Delta P$  的值。

如果  $\Delta P > 0$ , 则计算  $\Delta P_2$  的值,如果  $\Delta P_2 \geq 0$ , 则  $A^{(n)} = A^{(n-1)}$ ; 如果  $\Delta P_2 < 0$ , 则  $A^{(n)} = A^{(n-1)} - h$ 。

如果  $\Delta P < 0$ , 则计算  $\Delta P_1$  的值,如果  $\Delta P_1 \geq 0$ , 则  $A^{(n)} = A^{(n-1)}$ ; 如果  $\Delta P_1 < 0$ , 则  $A^{(n)} = A^{(n-1)} + h$ 。

由迭代算法计算出  $t_1$  的基波有功电流幅值  $A^{(n)}$ , 使用式(9)可计算出  $t_1$  时刻需要补偿的谐波及无功电流的值。

#### 3.2 计算量分析

从迭代算法知道: 算法计算量主要为计算  $\Delta P$  和  $\Delta P_1$  或者  $\Delta P$  和  $\Delta P_2$  的计算量, 而  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_2$  的计算量相同。迭代计算使用微处理器比较合适。存储单元与计算过程如图2所示。

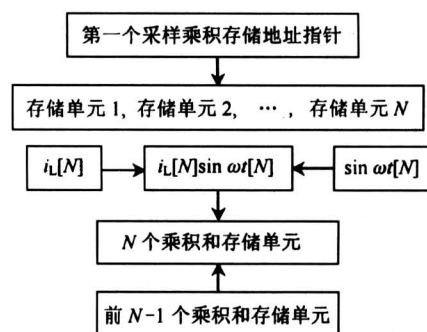


图2 存储单元与计算过程示意图

Fig.2 The sketch map of location and calculating process

存储单元1, 存储单元2, ..., 存储单元  $N$  为连续的  $N$  个存储单元, 它们具有相同的字数, 用于存

放  $i_L(i) \sin \omega t(i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的  $N$  个数。第一个采样乘积存储地址指针用于存储  $i_L(1) \cdot \sin \omega t(1)$  所在存储单元的起始地址。计算过程为：由此时的离散采样值  $i_L(N)$  和  $\sin \omega t(N)$  相乘得到  $i_L(N) \sin \omega t(N)$ 。由  $i_L(N) \sin \omega t(N)$  加上前  $N - 1$  个乘积和存储单元的数：
$$\sum_{i=1}^{N-1} i_L(i) \sin \omega t(i)$$
 得到  $\sum_{i=1}^N i_L(i) \sin \omega t(i)$  存放于  $N$  个乘积和存储单元中。当步长  $h$  和负载电流在一个周期内的采样个数  $N$  设定为常数时， $2h, -2h, \sum_{i=1}^N \sin^2 \omega t(i), h^2 \sum_{i=1}^N \sin^2 \omega t(i)$  都是常量，因此， $\Delta P$  的计算量为 4 次即 2 次乘法运算，1 次加法运算，1 次减法运算； $\Delta P_1$  的计算量为 2 次即 1 次乘法运算，1 次加法运算。因此，在一个采样周期内，迭代算法主要的计算量为 6 次即 3 次乘法运算，2 次加法运算，1 次减法运算。计算量非常小，而且这个计算量恒定不变，它不随负载电流  $i_L(t)$  在一个周期内的采样个数  $N$  的变化而变化。最后由  $\sum_{i=1}^N i_L(i) \sin \omega t(i)$  减去  $i_L(1) \cdot \sin \omega t(1)$  得到新的  $\sum_{i=1}^{N-1} i_L(i) \sin \omega t(i)$  存放在前  $N - 1$  个乘积和存储单元中，将  $i_L(N) \sin \omega t(N)$  存放于第一个采样乘积存储地址指针所指向的存储单元中，将第一个采样乘积存储地址指针指向下一个存储单元，若此时指向的是存储单元  $N$ ，则将第一个采样乘积存储地址指针指向存储单元 1。

### 3.3 计算精度分析

由于在每个采样周期中都进行迭代计算，所以，当负载电流处于稳定状态时， $A^{(n)}$  能够迅速逼近负载基波有功电流的真实幅值  $A^*$  并进入误差允许的范围，此时认为  $A^{(n)} = A^*$ ，具有很高的精度；当负载电流处于变化状态时， $A^{(n)}$  能够快速跟踪负载基波有功电流的真实幅值  $A^*$  的变化。

## 4 仿真研究

在以上分析的基础上，对此检测方法进行了计算机仿真研究。仿真时负载电流  $i_L$  在一个周期内的采样个数  $N$  取 500。图 3 为负载电流幅值突然从 10 A 上升到 20 A 时的基波有功电流幅值  $A$ ，基波有功电流  $i_{1p}$  和补偿电流  $i_a$  的仿真曲线；图 4 为负载电流幅值从 10 A 在一个周期内线性增加到 20 A 时的

基波有功电流幅值  $A$ ，基波有功电流  $i_{1p}$  和补偿电流  $i_a$  的仿真曲线；图 5 为负载电流幅值从 10 A 在一个周期内按指数规律减小到零时的基波有功电流幅值  $A$ ，基波有功电流  $i_{1p}$  和补偿电流  $i_a$  的仿真曲线。仿真结果表明：当负载电流处于稳定状态时， $A$  非常地接近  $A^*$ ，具有较高的精度；当  $i_L$  发生变化时， $A$  曲线比较平滑地跟踪  $A^*$  的变化，具有较好的跟踪能力。仿真实验验证了该方法的正确性。

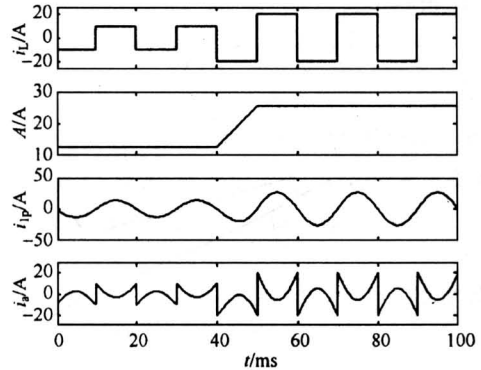


图 3 负载电流突变时的仿真曲线

Fig.3 Simulation waveforms with Load current step changes

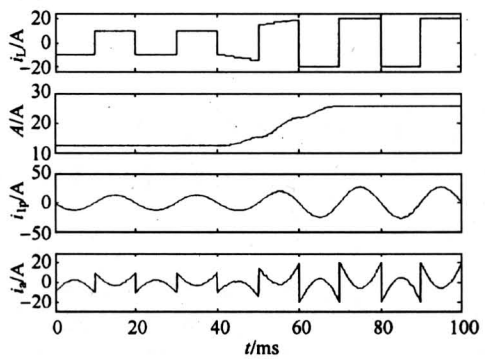


图 4 负载电流线性增加时的仿真曲线

Fig.4 Simulation waveforms with load current linear increase

## 5 结论

1) 根据检测原理，提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器谐波电流实时检测方法，该方法具有计算量非常小，实时性好，检测精度高等特点。

2) 仿真研究表明：当负载电流处于稳定状态时， $A$  非常地接近  $A^*$ ，具有较高的精度；当  $i_L$  发生变化时， $A$  曲线能够比较平滑地跟踪  $A^*$  的变化，

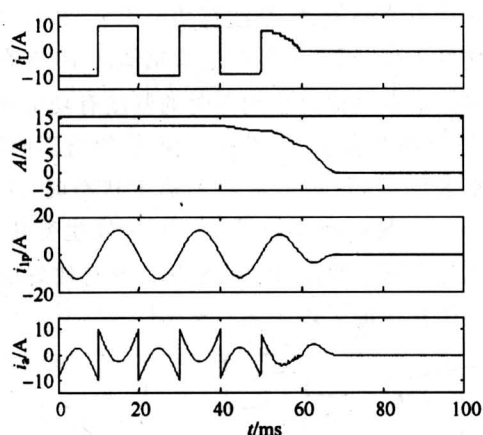


图 5 负载电流按指数规律减小时的仿真曲线

Fig.5 Simulation waveforms with load current exponential decrease to zero

具有较好的动态性能和跟踪能力。

3) 步长的设定比较困难,但是该方法可以方便地进行计算机仿真,因此可以根据实际应用的需要,通过计算机仿真确定出最佳步长。

4) 此方法可以不断完善。它可以方便地通过数学方法完善和发展此方法,如引入可变步长等。

5) 此方法不仅适用于单相电路,而且适用于

三相电路,它具有普遍的适用性。

#### 参考文献

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive compensators comprising switching devices without energy components [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1984, 20 (3): 625~633
- [2] 王群,周维维,吴宁.一种基于神经网络的自适应谐波电流检测法[J].重庆大学学报,1997,20(5):6~11
- [3] 王群,吴宁,苏向丰.有源电力滤波器谐波电流检测的一种新方法[J].电工技术学报,1997,12(1):1~5
- [4] 周维维,江泽佳,吴宁.基于补偿电流最小原理的谐波与无功电流检测方法[J].电工技术学报,1998,13(3):33~36
- [5] 周维维,李自成,吴宁.有源电力滤波器谐波及无功电流的一种检测方法[J].重庆大学学报,2000,23(1):53~55
- [6] Zhou Luowei, Li Zicheng. A novel active power filter based on the least compensation current control method [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2000, 15 (4): 655~659

## A New Real-time Detecting Method for Harmonic Current Based on Iterative Algorithm in Active Power Filter

Li Zicheng, Sun Yukun

(Electrical and Information Engineering College of Jiangsu University,  
Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] At present, many detecting methods for harmonic and reactive currents have been put forward. Though having their characteristics respectively, they have insurmountable problems, such as vast calculating work, bad real time performance, low measurement precision and so on. Based on the foundation of load current analysis, a new real-time detecting method for harmonic current based on iterative algorithm in active power filter is proposed. It has the characteristics of very little calculating work, nice real time performance and high measurement precision. The correctness of the method is verified by theory analysis and computer simulation research.

[Key words] active power filter; harmonics current; active current; reactive current