

# 一种新的有源滤波器参考信号提取方法

吕干云,程浩忠,董立新,丁屹峰

(上海交通大学电气工程系,上海 200030)

**摘要:** 有源滤波器是改善电力系统电能质量的一种有效工具,参考信号的提取对其补偿性能有重要影响。提出了一种新的有源滤波器参考信号提取方法,采用交叉迭代数值逼近方法,提取单相畸变信号的参考信号,获得三个基本参数的估计:基波幅值、角频率和初相位;在此基础上,按照补偿功率最小的最优原则,推导出三相对称参考信号的表达式。算例结果显示了方法的有效性和准确性。

**关键词:** 参考信号提取; 交叉迭代; 数值逼近; 最优优化方法

**中图分类号:** TN713      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)16-0005-03

## 0 引言

近年来,电网中整流器设备、变频调速装置、电弧炉、电气化铁路以及各种电力电子设备的使用不断增加,由于这些负荷的非线性和不平衡的用电特性,使得供电质量污染日益严重。另一方面,现代工业、商业及居民用户的用电设备对电能质量更加敏感,对供电质量提出了更高的要求。仅靠过去无源滤波技术治理谐波已不能满足发展要求,有源滤波器则提供了很好的解决方法,它的结构如图1所示,其中,参考信号的提取是有源滤波技术一个重要组成部分<sup>[1-3]</sup>,而且它也是许多其他电力系统分析中所必须解决的。

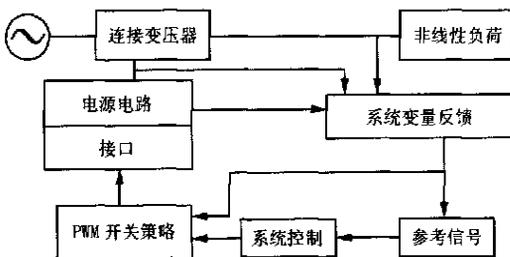


图1 有源滤波器(APF)原理方框图

Fig. 1 Block diagram of APF mechanism

到目前为止,针对有源滤波器参考信号的提取,研究者提出了基于小波变换、三相电路瞬时无功功率理论、神经网络、非线性自适应滤波等多种检测方法<sup>[4-9]</sup>。这些方法相对来说都比较复杂,本文提出了一种简单实用的单相参考信号数值求取方法,通过简单的交叉迭代进行数值逼近,提取出单相参考

信号,并按照补偿功率最小的最优原则,推导出三相参考信号的解析表达式。该数值逼近方法可较准确地提取单相畸变信号的参考信号,三个基本参数的误差均小于0.5%,且该法对于基波频率的变化是鲁棒的。

## 1 单相参考信号的提取

设待补偿的畸变电流实际表达式为:

$$i(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \%A_1 \text{rand}(t) \quad (1)$$

其中:  $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  为畸变信号的基波成分,也即待提取的参考信号;  $A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) (n=2,3, \dots)$  为各次谐波成分;  $\%A_1 \text{rand}(t)$  为随机噪声,它可以是系统本身含有的,也可能是外部引入的;  $\%$  表示它占基波幅值的百分比值。

要提取参考信号  $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ , 实际上就是获取它的三个基本参数:基波幅值  $A_1$ 、角频率  $\omega$  和初相位  $\varphi_1$ , 即对它们进行估计,使得  $i_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  与  $\hat{i}_1(t) = \hat{A}_1 \sin(\hat{\omega} t + \hat{\varphi}_1)$  最接近,其中  $\hat{A}_1, \hat{\omega}, \hat{\varphi}_1$  分别为基波幅值、角频率和初相位的估计值,也即使得式(2)最小:

$$E = \int_{t=0}^T (i_1(t) - \hat{i}_1(t))^2 dt \quad (2)$$

但是由于  $i_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  是未知的,无法直接根据上式进行估计值求解。这里采用式(3)代替式(2):

$$\min E = \int_{t=0}^T (i(t) - \hat{i}_1(t))^2 dt \quad (3)$$

式(2)和(3)是等效的,这是因为原始信号中的各次谐波成分和基波成分是正交的,而且随机噪声

基金项目:全国高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(ZDXM03006)

也不影响分析结果。

根据式(3),本文提出了一种  $\hat{A}_1$ 、 $\hat{\varphi}$ 、 $\hat{\alpha}_1$  的交叉迭代的数值求解方法,其具体步骤如下:

1)  $E_{\min}$ ,  $\hat{A}_1$ 、 $\hat{\varphi}$ 、 $\hat{\alpha}_1$  赋初值,其中  $w = 50$ 。

2) 根据给定的  $\hat{A}_1$ 、 $\hat{\varphi}$ 、 $\hat{\alpha}_1$  值,在  $[0, 2\pi]$  中搜索一个  $\alpha_1$ ,使得式(3)最小,保存此最小值  $E_{\min}$ ,并用新得到的  $\alpha_1$  代替式(3)中原来的  $\alpha_1$ 。

3) 由于电力系统的频率相对比较稳定,所以可在较小的搜索空间(这里取  $[0.95w, 1.05w]$ )中搜索一个  $\varphi$ ,使得式(3)最小,存此最小值  $E_{\min}$ ,并用新得到的  $\varphi$  代替式(3)中原来的  $\varphi$ 。

4) 由于电力系统的幅度变化较大,需在较大的搜索空间(这里取在  $[0.5A_1, 1.5A_1]$ )中搜索一个  $\hat{A}_1$ ,使得式(3)最小,存此最小值  $E_{\min}$ ,并用新得到的  $\hat{A}_1$  代替式(3)中原来的  $\hat{A}_1$ 。

5) 比较新得到  $E_{\min}$ 和上一轮得到的  $E_{\min}$ ,判断其差值是否大于等于给定允许误差值,如果是,则返回到第2)步,继续进行交叉迭代数值逼近;如果是小于,则进行下一步。

6) 输出  $A_1$ 、 $w$  和  $\alpha_1$  的最终估计值,并形成参考信号  $A_1 \sin(wt + \alpha_1)$ 。

这样就完成了单相参考信号的提取,它可直接应用于单相有源滤波器。

$$\begin{cases} A(1) = 0 \\ (1) = -\arctan \left[ \frac{-\sqrt{3}A_3 \sin(\alpha_c) + \sqrt{3}A_2 \sin(\alpha_b) + 2A_1 \cos(\alpha_a) - A_2 \cos(\alpha_b) - A_3 \cos(\alpha_c)}{-\sqrt{3}A_2 \cos(\alpha_b) + \sqrt{3}A_3 \cos(\alpha_c) + 2A_1 \sin(\alpha_a) - A_2 \sin(\alpha_b) - A_3 \sin(\alpha_c)} \right] \\ A(2) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} + \sqrt{3} [A_1 A_2 \sin(\alpha_a - \alpha_b) + A_2 A_3 \sin(\alpha_b - \alpha_c) + A_3 A_1 \sin(\alpha_c - \alpha_a)] \\ (2) = \arctan \left[ \frac{-\sqrt{3}A_2 \cos(\alpha_b) + \sqrt{3}A_3 \cos(\alpha_c) + 2A_1 \sin(\alpha_a) - A_2 \sin(\alpha_b) - A_3 \sin(\alpha_c)}{-\sqrt{3}A_3 \sin(\alpha_c) + \sqrt{3}A_2 \sin(\alpha_b) + 2A_1 \cos(\alpha_a) - A_2 \cos(\alpha_b) - A_3 \cos(\alpha_c)} \right] \end{cases} \quad (8)$$

显然  $\begin{cases} A(2) \\ (2) \end{cases}$  才是真正的最优解。

假设通过上节单相方法提取到的参考信号是三相对称的,即公式(4)中  $A_1 = A_2 = A_3$ , 并设  $\alpha_a = \alpha_b + 2\pi/3 = \alpha_c - 2\pi/3 = 0$ , 则三相对称参考信号(5)中应该为  $(A = A_1, \alpha = 0)$ 。而将上面两个条件代入公式(9)中,可得:

$$\begin{cases} A(2) = \left[ \frac{1}{3} \left( 3A_1^2 + \sqrt{3} \left[ \frac{3}{2} \sqrt{3} \right] A_1^2 + \frac{3}{2} A_1^2 \right) \right]^{1/2} = A_1 \\ (2) = \arctan(0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

## 2 三相参考信号的提取

同单相参考信号的提取相比,有源滤波器的三相参考信号不仅要求三相电流的各相参考信号只包含基波成分,而且它还必须是三相对称的。设三相系统的各单相参考信号已经通过上述的单相参考信号提取方法得到,如下:

$$\begin{cases} i_a(t) = A_1 \sin(\omega t + \alpha_a) \\ i_b(t) = A_2 \sin(\omega t + \alpha_b) \\ i_c(t) = A_3 \sin(\omega t + \alpha_c) \end{cases} \quad (4)$$

考虑电网的实际情况,可以认为各单相参考信号的角频率是一致的,都为  $w$ 。

另外,又假设三相对称参考信号为:

$$\begin{cases} \hat{i}_a(t) = A \sin(\omega t + \alpha) \\ \hat{i}_b(t) = A \sin(\omega t + \alpha - 2\pi/3) \\ \hat{i}_c(t) = A \sin(\omega t + \alpha + 2\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

为了使得补偿功率最小,需满足目标函数

$$\min E = \int_{t=0}^T [i_a(t) - \hat{i}_a(t)]^2 + [i_b(t) - \hat{i}_b(t)]^2 + [i_c(t) - \hat{i}_c(t)]^2 dt \quad (6)$$

其中:  $T = \frac{2\pi}{w}$  为一个基波周期。

$$\text{令} \quad \frac{\partial E}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \alpha} = 0 \quad (7)$$

求解上述方程,得到  $(A, \alpha)$  两组解:

$$\begin{cases} A(1) = 0 \\ (1) = -\arctan \left[ \frac{-\sqrt{3}A_3 \sin(\alpha_c) + \sqrt{3}A_2 \sin(\alpha_b) + 2A_1 \cos(\alpha_a) - A_2 \cos(\alpha_b) - A_3 \cos(\alpha_c)}{-\sqrt{3}A_2 \cos(\alpha_b) + \sqrt{3}A_3 \cos(\alpha_c) + 2A_1 \sin(\alpha_a) - A_2 \sin(\alpha_b) - A_3 \sin(\alpha_c)} \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A(2) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} + \sqrt{3} [A_1 A_2 \sin(\alpha_a - \alpha_b) + A_2 A_3 \sin(\alpha_b - \alpha_c) + A_3 A_1 \sin(\alpha_c - \alpha_a)] \\ (2) = \arctan \left[ \frac{-\sqrt{3}A_2 \cos(\alpha_b) + \sqrt{3}A_3 \cos(\alpha_c) + 2A_1 \sin(\alpha_a) - A_2 \sin(\alpha_b) - A_3 \sin(\alpha_c)}{-\sqrt{3}A_3 \sin(\alpha_c) + \sqrt{3}A_2 \sin(\alpha_b) + 2A_1 \cos(\alpha_a) - A_2 \cos(\alpha_b) - A_3 \cos(\alpha_c)} \right] \end{cases} \quad (9)$$

这个结果与上面的分析结果是一致的。

## 3 算例

通过 Matlab 仿真程序产生下面这样一个畸变电流信号:

$$i(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + a_2 a_1 \sin(5\omega_1 t + \alpha_5) + a_3 a_1 \text{rand}(t) \quad (11)$$

其中:  $a_1 = 1.152$ ,  $w = 100$ ,  $\alpha_1 = 0.992$  表示电力系统频率偏差;  $\alpha_5 = 0.550$ ,  $\alpha_2 = 0.05$ , 即5次谐波为基波的5%;  $a_3 = 0.01$ , 即取1%基波幅值的

随机白噪声。

对上述信号以 20 k 的采样速率进行离散化,这样在 0 s 到 0.1 s 共得到 2001 个采样点,进行仿真分析。

首先  $\hat{A}_1$ 、 $\hat{\omega}$ 、 $\hat{\alpha}_1$  分别赋初值为 1, 50, 0, 即  $a_1 = 1$ ,  $\omega_1 = 1$ , 经过 16 轮的交叉迭代数值逼近(如图 2), 最终得到三个基本参数的估计值:

$$a_1 = 1.1520, \omega_1 = 0.9921, \alpha_1 = 0.548 \quad (12)$$

$\hat{A}_1$ 、 $\hat{\omega}$  和  $\hat{\alpha}_1$  的估计误差分别为 0.01% 和 0.36%。

同样取上面的仿真信号,令  $a_1 = 0.782$ ,  $\omega_1 = 1.050$ ,  $\alpha_1 = 0.667$ , 再次进行仿真分析,经过 17 轮的交叉迭代数值逼近(如图 3), 最终得到三个基本参数的估计值:

$$a_1 = 0.7820, \omega_1 = 1.0501, \alpha_1 = 0.6650 \quad (13)$$

$\hat{A}_1$ 、 $\hat{\omega}$  和  $\hat{\alpha}_1$  的估计误差分别为 0.01% 和 0.30%。

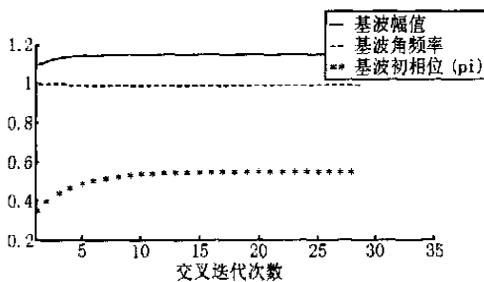


图 2 算例一的迭代逼近过程

Fig. 2 Iteration approaching of example one

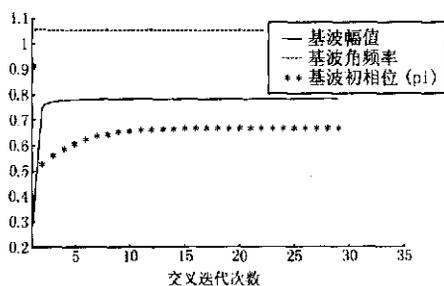


图 3 算例二的迭代逼近过程

Fig. 3 Iteration approaching of example two

上面两个算例的分析结果显示,本文提出的交叉迭代数值逼近方法,可以比较准确地获得基波幅值、角频率和初相位三个基本参数,三个基本参数的误差均小于 0.5%,从而有效提取出单相信号的参考信号。而且,该方法可以跟踪基波频率的变化,对于电力系统频率的变化是鲁棒的,这与标准的傅里叶方法相比,具有一定的优越性。另外,不难看出,该方法同样还可适用于分析各次谐波成分的含量和

初相位。

## 4 结论

本文对有源滤波器的参考信号提取进行了理论分析,提出了一种简单实用的单相参考信号的提取方法,采用交叉迭代的数值求解方法,较准确地得到了参考信号的基波幅值、角频率和初相位这三个基本参数。两个算例结果显示,该方法具有很高的准确度,且对基波频率变化具有一定的鲁棒性;另外,该方法还可以适用于分析各次谐波成分的含量和初相位,可以用于谐波的检测,这也具有一定的实用性。本文还在补偿功耗最小的最优化原则下,理论上推导出三相参考信号的提取方法。

## 参考文献:

- [1] EF Habrouk M, Darwish M K, Metha P. Active Power Filters: A Review[J]. IEEE Trans on Power Appl, 2000, 147(5):403-413.
- [2] 胡铭,陈珩(HU Ming, CHEN Heng). 有源滤波技术及其应用(Active Power Filter Technology and Its Application)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(3): 66-70.
- [3] 肖湘宁,徐永海,刘昊,等(XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Hao, et al). 混合型有源电力补偿技术与实验研究(Analysis of Hybrid Power Compensator and Its Experimental Study)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(5):39-44.
- [4] 杨晔,任震,唐卓尧(YANG Ye, REN Zhen, TANG Zhuo-yao). 基于小波变换检测谐波的新方法(A New Method for Harmonic Detection Based Wavelets Transform)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10): 39-42.
- [5] 杨君,王兆安,邱关源(YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan). 不对称三相电路谐波及基波负序电流实时检测方法的研究(A Study on Real-time Detecting Method for Harmonic and Fundamental Negative Sequence Currents in Unbalanced Three-phase Circuits)[J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1996, 30(3): 94-100.
- [6] 王群,吴宁,谢品芳(WANG Qun, WU Ning, XIE Pin-fang). 一种基于神经元的自适应谐波电流检测法(Neuron Adaptive Detecting System for Harmonic Current)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10):13-16.

(下转第 31 页 continued on page 31)

## 参考文献:

- [1] LI Wen-hua, LIU Guo-jin, LI Zhi-gang. Study and Reliability Analysis on Testing Instrument for Dynamic Contact Resistance on Contact[A]. The 46th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Chicago: 2000. 109-114.
- [2] LI Zhi-gang, JIANG Dong, Li Wen-hua, et al. Reliability Analysis and Failure Prediction Study of Dynamic Contact Resistance on Contact[A]. The 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Chicago: 2002. 61-65.
- [3] 程礼椿(CHENGLi-chun). 电接触理论及其应用(Electrical Contact Theory and Application) [M]. 北京:机械工业出版社

出版社(Beijing:China Machine Press),1988.

- [4] 宋俊杰(SONGJun-jie). 统计信息分析(Statistical Information Analysis) [M]. 天津:南开大学出版社(Tianjin: Nankai University Press),1986.

收稿日期: 2003-12-05; 修回日期: 2004-02-27

## 作者简介:

姚芳(1972-),女,在职博士研究生,主要从事电接触理论及其应用的研究; E-mail: afunny@sina.com

李志刚(1958-),男,博士生导师,主要从事电器可靠性与检测技术和电接触理论及其应用的研究。

## Research on failure prediction of relay contacts

YAO Fang, LI Zhi-gang, LI Ling-ling, LI Wen-hua

(College of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** The contact voltage-drop of counterpart contacts in the closing course of electromagnetism relay is observed and recorded in its failure test using dynamic contact resistance measurement system. It is found that the voltage drop varies with time, and its waveform takes on complicated variation and attenuation. Meanwhile, the contact goes through a process of dynamic bouncing, tiny vibration and static state with time. The analysis on test data shows that the contact failure of relay, to a certain extent, is related to the bouncing time and the maximum value of contact resistance in the closing course. Therefore, the curve variation law of bouncing time to operating times and contact resistance maximum can be considered synthetically for failure prediction of relay contacts.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Tianjin(No. 003603511).

**Key words:** electromagnetism relay; contacts; failure prediction

(上接第7页 continued from page 7)

- [7] 陈允平,彭春萍(CHEN Yun-ping, PENG Chun-ping). 一种基于最优化的标准波形提取方法(A Method of Extracting Standard Waveform Based on the Optimization) [J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 2003, 18(4): 132-135.
- [8] 徐永海,肖湘宁,杨以涵,等(XU Yong-hai, XIAO Xi-ang-ning, YANG Yi-han, et al). 基于dq变换和ANN的电能质量扰动辨识(Power Quality Disturbance Identification Using dq Conversion based Neural Classifiers) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 19(14): 24-28.

- [9] Karimi-Chartemani M, Iravani M R. A Nonlinear Adaptive Filter for Online Signal Analysis in Power Systems: Applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 617-622.

收稿日期: 2003-12-05; 修回日期: 2004-02-01

## 作者简介:

吕干云(1976-),男,博士研究生,主要从事电力系统电能质量、信号分析和高速磁悬浮列车供电方面的研究;

E-mail: stmc17@sina.com

程浩忠(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统规划、负荷预测、谐波分析等方面的研究。

## A new detecting method for reference signal of APF

L Ü Gan-yun, CHENG Hao-zhong, DONG Li-xin, DING Yi-feng

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A new detecting method for reference signal of active power filter (APF) is presented in this paper, which adopts the crossing iteration numerical approaching method to detect out the single-phase reference signal from a distorted signal, and gets three basic parameters of the reference signal, such as fundamental wave amplitude, angular frequency, and initial phase. According to optimal principle, the formula of three-phase reference signal is deduced. The results of examples show that the new method is efficient and accurate.

This subject is supported by the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, P. R. C. (No. ZDXM03006).

**Key words:** reference signal detecting; crossing iteration; numerical approaching; optimized principle