

## 自适应多调谐滤波器的研究

同向前, 薛钧义

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 提出了一种基于有源电抗器的新型自动调谐滤波器, 利用电感的非线性频率特性, 实现了单条  $LC$  串联支路抑制多次谐波的目标. 有源电抗器由一对耦合绕组和一个补偿电流发生器组成, 通过控制有源电抗器补偿绕组中的谐波磁通补偿电流, 可以独立且连续地调节电抗器在不同谐波频率下的电感量. 针对消除失谐或限制谐波电压含量的不同控制目标, 提出了谐波磁通补偿电流的两种生成方法, 补偿电流分别是滤波器电流或母线电压中各次谐波分量与调节系数的加权合成. 实验系统在不同运行方式下的测试结果表明, 这种滤波器能够同时抑制多次主要谐波分量并有效地消除失谐.

**关键词:** 谐波; 调谐滤波器; 失谐; 有源电抗器

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 987X(2005)10 1097 04

## Research on the Adaptive Multi-Tuned Power Filter

Tong Xiangqian, Xue Junyi

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

**Abstract:** To achieve the mitigation of multiple harmonics with a single  $LC$  series branch, a novel auto-tuning filter based on the nonlinear frequency characteristic of inductance of an active reactor is presented, where the active reactor consists of a pair of coupled windings and a generator of harmonic magnetic flux compensation current. By regulating the compensation current injecting into the compensation winding of the reactor, the reactor inductance at different harmonic frequencies can be independently and continuously adjusted. Two generating methods of compensation current are also proposed for the purpose of eliminating detuning or limiting harmonic voltage contents, in which the compensation current is the weighted superposition of filter harmonic currents or voltages and the regulating factor. The experimental results show that the proposed filter enables simultaneously to suppress multiple dominant harmonics and effectively eliminate the detuning.

**Keywords:** harmonics; tuned filter; detuning; active reactor

无源调谐滤波器仍是电力系统中抑制负荷谐波的首选设备<sup>[1]</sup>, 但是滤波器元件参数变化所引起的失谐将导致滤波性能严重下降.

针对  $LC$  无源滤波器的失谐问题, 许多文献提出了能够自动跟踪参数变化的自动调谐滤波器<sup>[2-4]</sup>. 文献[2]提出了一种自动调整电抗器分接头的方法, 根据失谐情况, 有级地改变调谐电抗器的电感量, 自动调谐于待滤谐波频率上; 文献[3]提出一种采用电子式连续可调电抗器的交流连续调谐滤波器, 实现

了滤波器的自动连续调谐; 文献[4]针对开关型电力变换器的滤波器装置, 提出自动调节开关频率, 从而采用使谐波频率与  $LC$  滤波器的谐振频率一致的控制策略来提高滤波效果.

但是, 上述方案只适用于单调谐滤波器, 一条  $LC$  滤波支路只能解决单次谐波的抑制问题, 要解决多次谐波, 需要多条滤波支路的并联, 这样无疑增大了滤波器的容量、占地面积及成本. 本文提出一种新型多调谐滤波器, 借助于一个有源调谐电抗器, 在

一条  $LC$  滤波支路上实现了多次谐波的调谐抑制,并具有自动消除失谐的功能。

## 1 有源调谐电抗器

如图 1 所示,有源电抗器由两个耦合绕组(主绕组与补偿绕组)和一个可控电流源组成<sup>[5]</sup>,主绕组 A-X 就是一个由等值电感可调的电抗器与滤波电容器串联形成的调谐滤波器,补偿绕组 a-x 作为电感调节的手段。

作为滤波器的主要元件,有源电抗器的主绕组中会流过各次谐波电流。利用谐波电流提取单元,从主绕组电流中提取出一种或多种谐波分量,经过调整放大形成补偿电流并注入到补偿绕组中,这样就可以调节有源电抗器在这些谐波频率下的等值电感。

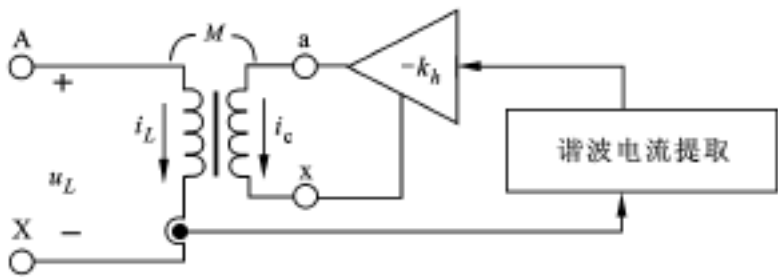


图 1 谐波电抗可控的有源电抗器的原理图

有源电抗器的谐波电感特性可用主绕组的端口伏安特性方程来表示

$$u_L = L_0 \frac{di_L}{dt} + M \frac{di_c}{dt} \quad (1)$$

式中:  $L_0$  为主绕组的自感;  $M$  为绕组间的互感。

设有源电抗器主回路电流为

$$i_L = i + i_h \quad (2)$$

式中:  $h$  为谐波次数 ( $h \geq 2$ );  $i$  和  $i_h$  分别为基波电流分量和  $h$  次谐波电流分量

$$i = 2^{1/2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$i_h = 2^{1/2} I_h \sin(h\omega t + \phi_h)$$

通过控制电流源,使注入到补偿绕组的补偿电流为

$$i_c = - \sum_{h \in H} k_h i_h \quad (3)$$

式中:  $H$  为拟补偿谐波次数的集合;  $k_h$  为  $h$  次谐波电流补偿系数。那么,有源电抗器的端电压为

$$u_L = L_0 \frac{di}{dt} + \sum_{h \in H} L_0 \frac{di_h}{dt} + \sum_{h \in H} (L_0 - k_h M) \frac{di_h}{dt}$$

于是,有源电抗器在拟补偿的  $h$  次谐波下的等值电感为

$$L_{h,eq} = L_0 - k_h M \quad (4)$$

式(4)表明,谐波等值电感取决于谐波电流补偿系数

$k_h$  的大小和正负。

为测取补偿电流对主绕组电感的调节作用,在主绕组中注入恒定的工频正弦电流,在补偿绕组中施加不同幅值但与主绕组电流同相或反相的工频补偿电流,测量并记录补偿电流和主绕组电压,可以求得主绕组等值电感与补偿电流的变化关系。图 2 为实验电抗器的工频等值电感与补偿电流的关系。

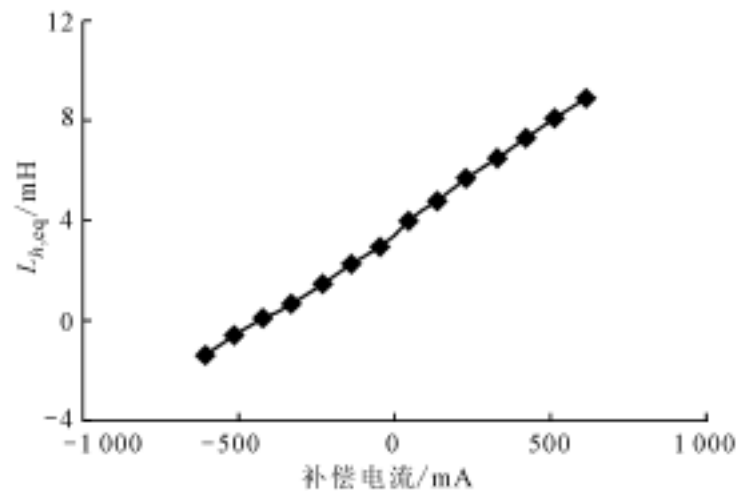


图 2 等值电感随补偿电流的变化关系

## 2 多调谐滤波器的基本原理

利用有源电抗器的电感与频率的可控非线性特性,可以在单个  $LC$  滤波器支路上实现多调谐滤波。如图 3 所示,在补偿绕组中,调节 5 次谐波补偿电流  $i_{c5}$  的极性和大小,使得电感与电容在 5 次谐波频率下发生谐振,同时调节 7 次谐波补偿电流  $i_{c7}$  的极性和大小,亦可使得电感与电容在 7 次谐波频率下也同时发生谐振,从而实现双调谐滤波。注入更多次谐波补偿电流,则可实现更多次谐波的滤波功能。

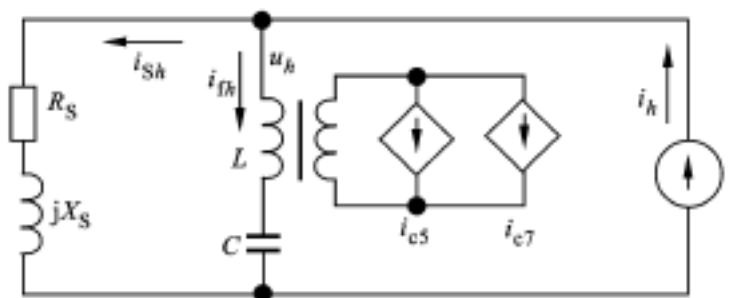


图 3 多调谐滤波器的原理图

## 3 自适应多调谐滤波器的控制

自适应调谐滤波器的目的在于自动连续调节滤波电感,使得在电源频率、滤波电容发生变化后能始终保持  $LC$  谐振于  $h$  次谐波频率上,即滤波器的失谐度或失谐电抗为 0

$$\sum_{h \in H} |X_{f,h}| = 0 \quad (5)$$

式中:  $H$  为拟滤除谐波的谐波次数集合。若  $H$  中仅

包含某单次谐波,则滤波器为自适应单调谐滤波器;若  $H$  中包含多个谐波次数,则滤波器为自适应多调谐滤波器。

由于完全谐振时,滤波器的失谐电抗为 0,滤波器支路对该次谐波呈现纯电阻,此时滤波器中该次谐波电流与母线谐波电压同相位,滤波器的谐波阻抗角为 0,因此式(5)等价于

$$\angle \theta_h = 0 \quad (6)$$

式中:  $\theta_h$  为滤波器的  $h$  次谐波阻抗角,即滤波器中  $h$  次谐波的电压分量与电流分量的相位差。

此外,在忽略滤波器滤波电阻的情况下,滤波器支路电抗为 0,近似等同于滤波器母线上谐波电压为 0,即

$$U_h = 0 \quad (7)$$

从理论上讲,式(5)~式(7)所述的 3 种控制目标是一致的,均可使滤波器装设点的谐波电压含量最小。控制系统的结构与控制目标有关,或者说与所采用的滤波器性能评价指标及其检测方式有关。因此,具体采用何种控制目标取决于该目标参数对失谐的映射关系以及参数检测的难易程度。

对于一个确定的滤波器,若失谐度(即等值频率偏差)控制在一定范围内,则滤波器的失谐电抗与其失谐度近似成正比

$$X_{f,h} = 2qR_f \quad (8)$$

式中:  $q$  为滤波器的品质因数;  $R_f$  为滤波电阻。由式(8)可得滤波器的谐波阻抗角与失谐度的关系

$$\tan \theta_h = \frac{X_{f,h}}{R_f} = 2q \quad (9)$$

式(9)表明,滤波器的失谐电抗和谐波阻抗角均能较好地反映滤波器的失谐程度,它们的极性反映了失谐的性质,而其数值则反映了失谐的大小。由于相位的变化范围是确定的,测定也比电抗容易,因此以消除失谐为目标的控制系统宜采用相位控制策略。如图 4 所示,实时检测滤波器的谐波相位差,根据相位差的正负和大小自动调节补偿电流的极性和幅值,可使滤波器始终处于无失谐状态。

在理想补偿情况下,滤波器中谐波电流与母线谐波电压同相位,由式(3)可知,谐波补偿电流也应与母线谐波电压同相。以控制谐波电压为目标的自适应调谐系统如图 5 所示,以谐波电压的波形作为补偿电流的波形,补偿电流的大小根据谐波电压的幅值来自动调节。

如图 4 和图 5 所示,由于补偿电流是一个与滤

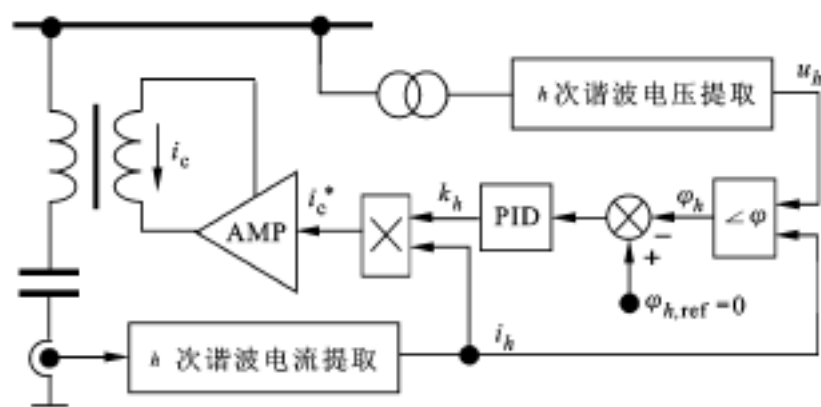


图 4 自适应多调谐滤波器的谐波相位控制原理

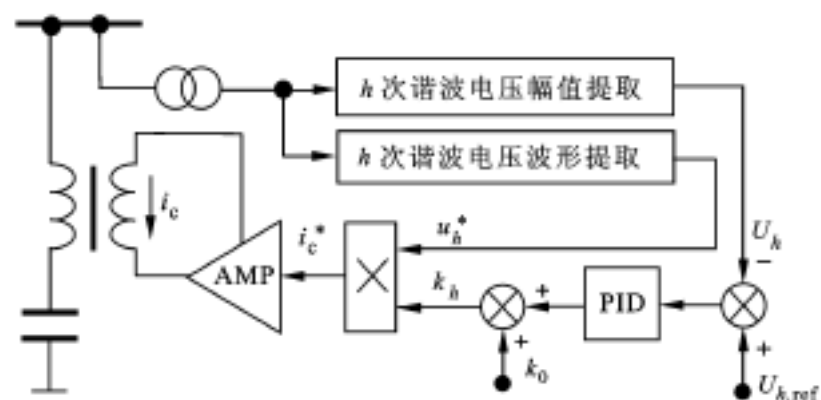


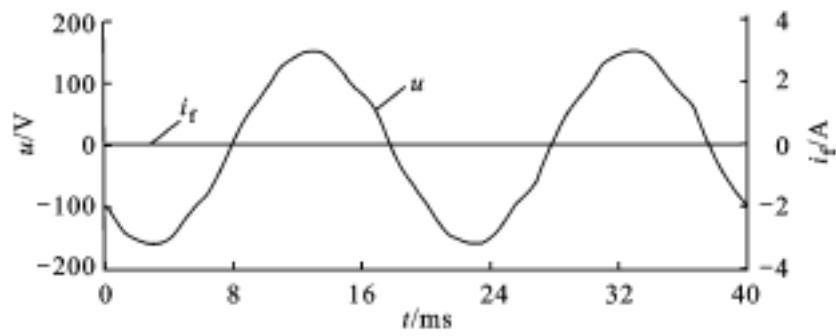
图 5 自适应多调谐滤波器的谐波电压控制原理

波器谐波电流或母线谐波电压同相位的交流电流,控制系统采用了比率(谐波补偿系数)控制方式。图 4 和图 5 给出了单次谐波的控制结构,对于多调谐滤波器而言,则需要多个独立的单次谐波控制单元,总补偿电流指令  $i_c^*$  是各单次谐波控制单元输出的补偿电流之和。

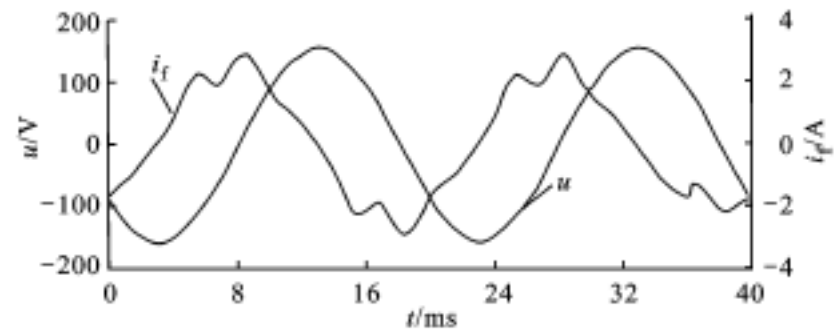
## 4 实验及结果

为了验证理论分析的正确性和控制策略的可行性,建立了一套自适应多调谐滤波器的实验系统。滤波器通过调压变压器接入到低压电网中,滤波器母线电压约为 100 V。实验系统中的滤波电容为 50  $\mu\text{F}$ ,电抗器主绕组自感为 8.5 mH,补偿绕组自感为 3.0 mH,电抗器互感为 3.2 mH。可控电流源采用带电流反馈的功率放大器来实现。

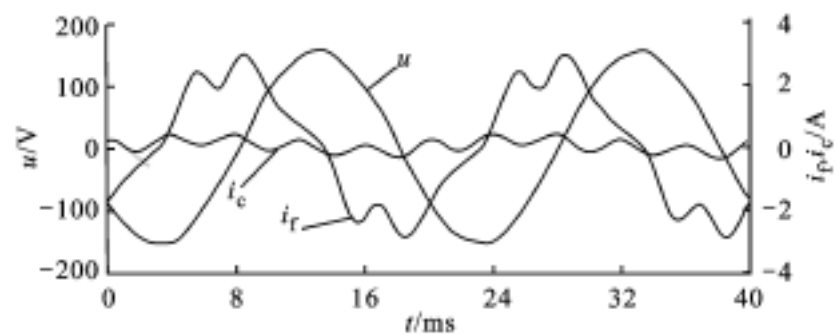
实验系统采用以控制谐波电压为目标的调谐控制策略,实验结果如表 1 和图 6 所示。从实验结果可以看出:当滤波器自动调谐于 5 次谐波时,补偿电流主要为 5 次谐波分量,母线 5 次谐波电压含量从调谐前的 1.03% 下降到调谐后的 0.19%;当滤波器自动调谐于 7 次谐波时,补偿电流主要为 7 次谐波分量,母线 7 次谐波电压含量从调谐前的 1.00% 下降到调谐后的 0.23%;当滤波器同时自动调谐于 5 次和 7 次谐波时,母线 5 次和 7 次谐波电压同时得到大幅度衰减。



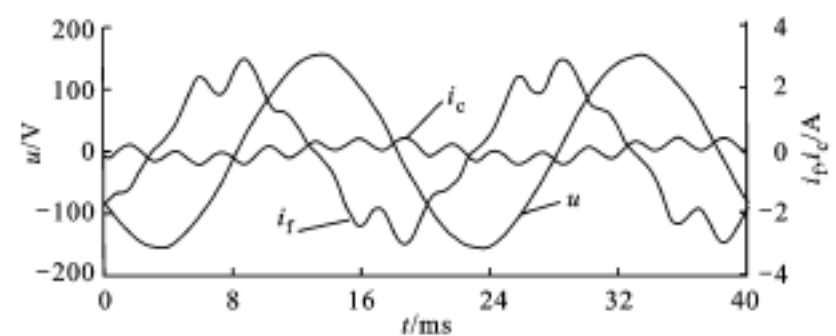
(a) 滤波器未投入时



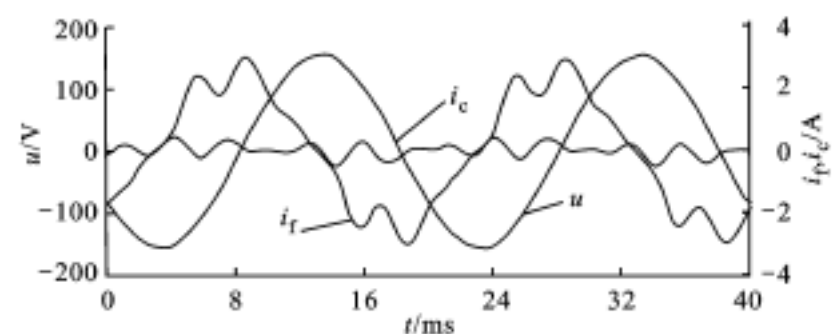
(b) 滤波器投入但无自动调谐时



(c) 滤波器自动调谐于5次谐波时



(d) 滤波器自动调谐于7次谐波时



(e) 滤波器同时自动调谐于5次和7次谐波时

图6 滤波器在不同运行方式下的电压电流波形

表1 多调谐滤波器运行于不同方式时的  
母线谐波电压

运行方式	$U_1/V$	$U_3/V$	$U_5/V$	$U_7/V$	总畸变率/ %
滤波器未投入	109.6	0.53	3.23	2.59	3.82
无自动调谐	110.9	0.48	1.14	1.11	1.51
5次自动调谐	110.5	0.59	0.21	1.21	1.25
7次自动调谐	110.6	0.43	1.10	0.25	1.10
5,7次自动调谐	110.3	0.46	0.28	0.26	0.63

## 5 结论

基于有源电抗器的自适应多调谐滤波器,可以在线连续调节谐振频率,自动适应滤波器元件参数的变化,消除失谐,提高滤波效果.利用有源电抗器的电感频率非线性可控特性,在单个LC串联支路上实现了多调谐滤波,简化了调谐滤波器的主电路结构,也避免了多个单调谐滤波器组合时的相互影响.实验结果表明,这种单支路多调谐滤波器可以有选择地抑制多次主要谐波分量.

对调谐滤波器而言,系统谐波阻抗特性和负载谐波特性(时变性、非整数次谐波、非特征谐波等)均会影响滤波器的滤波效果,甚至会危及滤波器的安全稳定运行.如何利用自适应多调谐滤波器的可调特性,优化滤波器参数,改进控制方法,提高滤波器的灵活性和安全可靠,是今后进一步研究的主要内容.

### 参考文献:

- [1] as J C. Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2002.
- [2] Epp N D. A self-tuning filter for the mitigation of power system harmonics[D]. Edmonton, Canada: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, 2000.
- [3] Lescale V F. Modern HVDC: state of the art and development trends [A]. 1998 International Conference on Power System Technology proceedings [C]. 北京: 万国学术出版社, 1998. 446-450.
- [4] Phinney J, Perreault D J. Filters with active tuning for power applications [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2003, 18(2): 636-647.
- [5] 李达义, 陈乔夫, 贾正春, 等. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.

(编辑 杜秀杰)