

# 基于可控电抗器的单调谐滤波器

于明涛,陈建业,王赞基

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

**摘要:**介绍了一种基于可控电抗器的单调谐滤波器,通过将普通的无源滤波器进行有源化的改造,改善传统无源滤波器易受参数影响而失谐的缺点,实现当系统其他参数变化时,可以通过调节电感值使滤波器在原来的频率处保持谐振状态,从而保持较好的滤波效果。对检测滤波支路  $n$  次谐波电压、电流同相位法和滤波后系统侧  $n$  次谐波电流幅值最小法 2 种闭环控制策略的可行性和特点进行了分析,并利用基于自寻最优的控制方法进行了 7 次单调谐滤波器的实验,结果证明了基于可控电抗器的单调谐滤波器具有良好的滤波效果和对系统参数变化的自调谐功能。

**关键词:**可控电抗器;单调谐滤波器;自调谐

**中图分类号:** TM 47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)01-0039-03

相对于有源滤波器,传统的无源滤波器具有投资少、结构简单、运行可靠及维护方便等优点,但其滤波效果依赖于系统阻抗特性,并且容易受到电网谐波污染程度、温度漂移、滤波电容老化以及非线性负荷变化的影响,产生失谐甚至震荡,严重影响滤波效果<sup>[1]</sup>。而有源滤波器的应用又受到其较高价格的限制。为了兼顾滤波器的成本与效果,本文研究了一种通过用可控电抗器取代固定参数电抗器,从而对无源滤波器进行有源化改造的方法,并通过实验获得了较好的滤波效果和自调谐特性。

## 1 单调谐滤波器

单调谐滤波器利用  $R/L/C$  电路串联谐振原理构成<sup>[2]</sup>,电路结构如图 1 所示,其阻抗  $Z$  与电网频率  $\omega$  之间的关系为

$$Z=R+j(\omega L-\frac{1}{\omega C}) \quad (1)$$

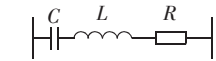


图 1 单调谐滤波器  
Fig.1 Single tuned filter

阻抗频率特性如图 2 所示。横轴为电网频率,纵轴是该频率下滤波器支路阻抗值  $Z$ 。谐振频率<sup>[3]</sup>为

$$\omega_n=\sqrt{1/LC} \quad (2)$$

滤波器在此频率阻抗值最小,从而在与系统并联后,可通过分流作用减小注入交流系统的谐波电流,实现滤波。

由式(2)可以看出,使用固定参数器件的单调谐滤波器谐振频率会因电容、电感参数的偏差或变化而改变。电网频率也会有一定波动,这都可能导致滤波器失谐。为保证正常失谐情况下滤波器仍能满足各项技术要求,就必须牺牲滤波效果。而且电网阻抗变化有可能导致滤波装置与其发生并联谐振,对电网产生危害。这些都使单调谐滤波器的应用受到了很大限制。

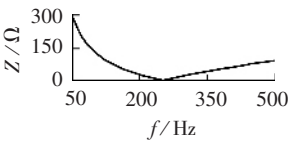


图 2 单调谐滤波器  
阻抗频率特性  
Fig.2 Single tuned  
filter impedance  
versus frequency

## 2 可控电抗器

可控电抗器作为一种新型的动态感性无功补偿设备已经或将要得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>,其实现形式多种多样。除作为无功补偿设备外,也可以利用其电感值可调的特性在无源电力滤波器中作为电感应应用<sup>[6]</sup>,根据系统参数变化,通过调节电感值,使滤波器始终谐振在给定频率点,从而实现高质量的滤波。而且其品质因数  $Q$  可以选取较大值,这样既提高了滤波效果,又降低了滤波器损耗。由于可控电抗器是有源器件,所以基于可控电抗器的无源滤波器也将变成有源的,但与单纯采用谐波补偿型有源滤波器相比,它结构相对简单、易实现且成本低。

由于可控电抗器大多利用铁磁质磁化曲线的非线性和饱和特性<sup>[7]</sup>,所以会导致谐波的产生,应用在滤波器时,可控电抗器本身产生的谐波将对滤波器的性能产生很大的影响。不同结构形式的可控电抗器工作原理不同,谐波产生的原理也有差异。所以在为滤波器选择可控电抗器时,应尽量选择谐波含量小的。对于同一可控电抗器,合理地选取工作点也有助于减少自身谐波的产生。对基于磁化曲线非线性原理的可控电抗器,工作点通常意味着磁饱和程度的大小,也即非线性的程度,而谐波正是由于非线性产生的,所以要合理选择可控电抗器工作点所在的非线性区域。在设计制造所需可控电抗器时,也应充分考虑使用时的工作点问题。

## 3 闭环控制方法

由式(2)可见,单调谐滤波器的谐振频率只与电感和电容值有关,所以当电容参数或电网频率变化时,可以通过调节电感值使谐振频率始终保持在给定值;对于电网阻抗变化可能导致的与系统谐振问题,也可通过及时调节电感值避免。

基于可控电抗器的  $n$  次单调谐滤波器主要有 2 种可能的控制策略。

### 3.1 滤波支路 $n$ 次谐波电压、电流同相位

由谐振特性,当且仅当在谐振频率  $\omega_n$  处,滤波器的阻抗值为最小且为纯阻性,滤波支路电压的该频率分量与电流的该频率分量是同相位的。因此,可以设计控制器的控制目标为使谐振频率点的电压信号  $n$  次谐波分量和电流信号  $n$  次谐波分量的相位差为最小。具体的实现方法是利用电压、电流互感器分别得到滤波器支路的电压、电流信号,利用带通滤波器滤出  $n$  次谐波分量,比较电压和电流信号的相位,将其差值送入 PI 调节器,输出为可控电抗器控制量,从而实现闭环控制。这种控制策略控制目标明确,PI 调节可以获得较高的精度和较快的响应时间;存在的问题是,由于滤波支路的谐波是电网谐波和可控电抗器自身谐波的叠加,而后的幅值和相位会随工作点而改变<sup>[8-9]</sup>,会造成一定的误差。

### 3.2 滤波后系统侧 $n$ 次谐波电流幅值最小

滤波后系统侧  $n$  次谐波电流幅值最小的方法直接以滤波效果作为目标。由于滤波器和系统并联分流,当谐波源恒定、电容值固定时,滤波支路和系统侧  $n$  次谐波电流幅值与滤波器电感值的关系示意曲线如图 3 所示。图中,横轴为电感值  $L$ ,纵轴为电流幅值,2 条曲线分别为滤波后系统侧电流  $i_s$  和滤波支路电流  $i_f$ 。

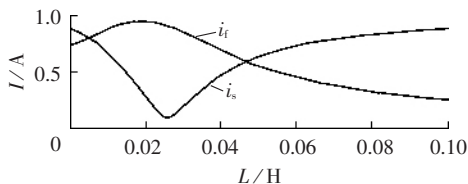


图 3 滤波支路和滤波后系统侧  $n$  次谐波电流幅值与滤波器电感值的关系示意图

Fig.3  $n$ -th harmonic currents of filter branch and system side(after filtering) versus filter inductance

由图 3 可看出,应用单调谐滤波器时,随电感变化,滤波后  $n$  次谐波电流有且只有一个最小值,所以将滤波效果直接作为控制目标是可行的。具体实现方式是用电流互感器检测系统侧电流信号,利用带通滤波器得到  $n$  次谐波分量,通过自寻最优控制方法寻找到滤波效果最好的工作点<sup>[10]</sup>。这种控制策略思路简单直观,不必考虑可控电抗器自身产生的谐波以及电路参数造成的干扰等问题,自适应能力更强;缺点在于自寻最优控制的响应时间和控制精度不如 PI 控制,而且也还需要设置其他监测环节,以保证可控电抗器正常工作。

由图 3 也可以看出,把滤波支路所需滤除的谐波电流值最大作为控制目标是不可行的。这是因为系统侧的电感使两支路电流产生了相位差,使得此时滤波后系统侧  $n$  次谐波电流幅值并不是最小,这也是图 3 中 2 条电流曲线  $i_f$  的最大值与  $i_s$  的最小值不在同一个工作点的原因。

## 4 实验

实验主电路如图 4 所示。整流桥接感性负载作为谐波源,产生谐波电流,注入电力系统,  $R$  用来模拟线路阻抗,电容  $C$  和可控电抗器  $L$  串联构成 7 次单调谐滤波器。实验中滤波器参数为  $C=6 \mu\text{F}$ ,  $L$  是可控的。需要被滤波的电流为  $i_1$ , 滤波后是  $i_2$ ,  $i_3$  是滤波支路电流。实验中通过 DSP 控制可控电抗器,具体方案是首先用电流互感器采集  $i_2$ , 用带通滤波器得到  $i_2$  中的 7 次谐波含量,经放大后,送入 DSP, 计算其幅值后通过构成闭环反馈的自寻最优算法,搜索并输出使  $i_2$  中 7 次谐波含量最小的可控电抗器的控制电压。由于这种方法的控制目标并不十分明

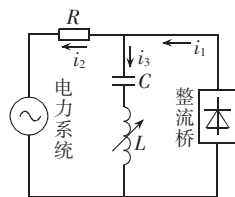


图 4 实验主电路图

Fig.4 Circuit for experiment

确,所以算法中要通过加入适当判断环节保证其稳定性,在此基础上设置合适的搜索环节来提高滤波器的动态响应速度。算法并不复杂,可以用低成本的单片机实现,对于工业应用很有意义。

实验结果波形如图 5 所示。7 次谐波电流值滤波前为 76.5 mA,滤波后为 6.12 mA,即约有 92 % 的 7 次谐波电流被滤除。基波电流值滤波前后分别为 721 mA 和 701 mA,相差约 2 %~3 %,说明滤波器对基波的分流作用很小。滤波后电流波形不是正弦是因为还含有较大的 3、5 次谐波。从稳态多次测量结果可以发现,此实验条件下,滤波效果良好,始终保持在滤除 90 % 以上。

通过改变电容参数检验基于可控电抗器的单调谐滤波器对元件参数变化的自调谐效果。通过开关投切,使电容参数从 6  $\mu\text{F}$  变为 12  $\mu\text{F}$ ,然后利用 DSP 闭环控制自动改变可控电抗器的控制电压。图 6 中曲线 1 是可控电抗器控制电压的变化过程,曲线 2 是滤波后 7 次谐波幅值(经过放大)。

投入电容瞬间,由于谐振点改变,滤波器滤波效果变差,谐波值增大;经过一段时间的闭环调节,可控电抗器控制电压改变,电感值改变,使得滤波器重新对 7 次谐波谐振,谐波值减小。由于参数变化较大,铁芯材料固有时间常数大以及对稳态性能的考虑,调节过程需要一定时间,约在秒级。以上实验证明当线路其他参数改变时,在可控电抗器的作用下,通过自调谐,单调谐滤波器仍能保持良好的滤波效果。

## 5 结论

基于可控电抗器的单调谐滤波器有着良好的滤波效果和自调谐特性。通过调节可控电抗器,理论上

可以使滤波器在任何频率谐振,改变可调谐滤波器的谐振频率使其作为所需次数的滤波器过程非常简单。通过闭环控制,可以使滤波器自动工作在谐振状态,自适应系统的各种变化,克服了传统无源滤波器的缺点,提高了滤波器效率;另一方面,与单纯采用有源滤波器相比,它结构相对简单,易实现且成本低。

## 参考文献:

- [1] 解子威. 基于磁阀式可控电抗器的可调谐滤波装置的研究[D]. 北京:清华大学,2004.  
XIE Zi-wei. Analyse of tunable filter based on magnetic valve controllable reactor[D]. Beijing:Tsinghua University,2004.
- [2] 吴亮昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] ARRILLAGA J,BRADLEY D A,BODGER P S. Power system harmonics[M]. Chichester,West Sussex,UK:Wiley,1985.
- [4] 周腊吾,徐勇,朱青,等. 新型可控电抗器的工作原理与选型分析[J]. 变压器,2003,40(8):1-5.  
ZHOU La-wu,XU Yong,ZHU Qing,et al. Type selection analysis and principle of new controllabel reactor[J]. Transformer,2003,40(8):1-5.
- [5] 陈柏超,田翠华,梁柏华,等. 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):63-67.  
CHEN Bai-chao,TIAN Cui-hua,LIANG Bai-hua,et al. Principle and implementation of a harmonic depression approach for single phase controlled saturable reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(3):63-67.
- [6] HOLMGREN T,HIDMAN P,JONSSON U. A test installation of a self-tuned AC filter in the Konti-Skan 2 HVDC link[C]// IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference. Stockholm,Sweden: [s.n.],1995:64-67.
- [7] 高联辉. 磁路和铁磁器件[M]. 北京:高等教育出版社,1982.
- [8] 王长善,张卫星,范文涛. 新型电抗器在电力系统中的应用[J]. 电气开关,2004(6):41-44.  
WANG Chang-shan,ZHANG Wei-xing,FAN Wen-tao. Application of a new type reactor in electric power system[J]. Electric Switchgear,2004(6):41-44.
- [9] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [10] 戴绪愚. 自寻最优控制[M]. 北京:科学出版社,1986.

(责任编辑:康鲁豫)

## 作者简介:

于明涛(1982-),男,北京人,硕士研究生,从事电能质量、滤波器方面的研究(E-mail:yymt00@mails.tsinghua.edu.cn);

陈建业(1946-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,从事电力电子方面的研究。

## Single tuned filter based on controllable reactor

YU Ming-tao, CHEN Jian-ye, WANG Zan-ji

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A kind of single tuned filter based on controllable reactor is introduced, which is reformed from passive into active to avoid the influence of parameter change on resonance frequency. When system parameters change, the filter keeps resonance condition at original frequency by adjusting inductance and remains better filtering performance. Features of two closed-loop control methods and their applicability are analyzed; the  $n$ -th harmonic voltage and current in-phase check method for filter branch and the minimal  $n$ -th harmonic current method for system side. Experiments on 7 th harmonic filter using optimal control validate the good filtering performance and self-tuning characteristics.

**Key words:** controllable reactor; single tuned filter; self-tuning