

# 并联有源滤波器中输出滤波器的设计研究

王银乐, 刘振华, 李波, 章华

(华东交通大学, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 输出滤波器 OF (Out Filter) 对并联有源滤波器的谐波补偿能力有不可忽略的影响, 然而目前对这方面的研究较少。文章在对 OF 的结构和工作原理进行分析的基础上, 提出一种 OF 参数设计及优化方法, 通过对非线性负载补偿特性的仿真和实验分析, 验证了该方法的正确性。采用该方法设计的 OF, 能有效地滤除高次谐波, 提高了 APF 的工作效率。

**关键词:** 有源滤波器; 输出滤波器; 拓扑结构; 参数设计; 谐波含量

## Design and study on output filter of parallel active power filters

WANG Yin-le, LIU Zhen-hua, LI Bo, ZHANG Hua

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Although the output filter(OF) influences the compensating ability of active power filters(APF), few study focused on it. The paper presents a parameter design and optimization method of OF based on the analysis on its structure and principle. The simulation and experiment result of non-linear load compensation performances has verified that the proposed design method is feasible. OF selected by this method can eliminate effectively high frequency harmonics and enhance the efficiency of APF.

**Key words:** active power filters(APF); output filter(OF); topology structure; parameter design; THD(Total Harmonic Distortion)

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0046-04

## 0 引言

随着电力电子技术的发展, 有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 得到了越来越广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。APF以其良好的动态响应速度和补偿特性, 有效地抑制了谐波, 并在理论研究和实际应用方面取得了很大的进展。但是APF主电路的电力半导体器件在通断过程中会在其工作频率附近产生一些次数较高的谐波, 为了防止谐波对电网造成新的污染, 必须采用输出滤波器OF (Output Filter)<sup>[6]</sup>, 以滤除逆变器的开关分量。OF对逆变器输出的补偿谐波的幅值同样有着很大的影响。如果设计不当, 一方面会使高频开关谐波注入公用电网和用户受电端, 影响到控制、通讯设备以及精密仪器等的正常工作, 另一方面可能会降低逆变器在补偿谐波频段的工作效率, 从而影响APF的补偿能力。然而, 目前APF的研究主要集中在谐波检测方法和控制策略两方面, 而往往忽略了对OF补偿谐波能力的研究<sup>[3,6]</sup>。本文结合OF的工作原理, 提出一种新的OF参数设计及优化方法。

## 1 并联型有源滤波器中OF的拓扑结构和优化设计

### 1.1 并联型有源滤波器中OF的拓扑结构<sup>[1,2]</sup>

由于二阶LC滤波器便于实施电压闭环控制, 因此本文并联有源滤波器中采用二阶LC滤波器作为逆变器的输出滤波器OF。如图所示, 图1为并联型有源滤波器的主电路结构图, 图中以LC构成的低通滤波器作为OF, 用于滤除高于逆变器输出谐波频段的开关谐波。图2为输出滤波器的单相等效电路。

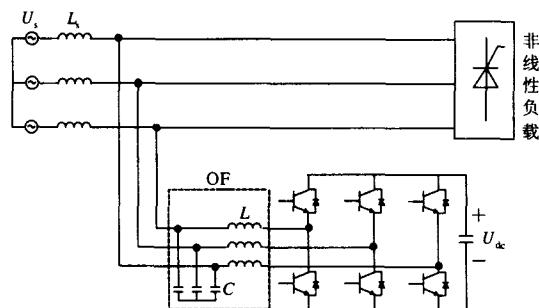


图1 APF的主电路结构图

Fig.1 Main circuit structure of APF

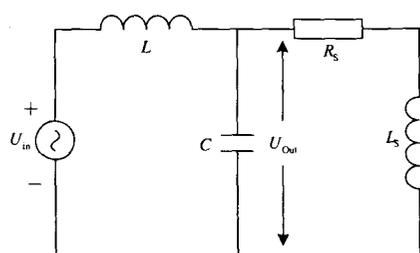


图2 OF的单相等效电路

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of OF

图2中输出滤波器OF的传递函数为:

$$G(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{SL_s + R_s}{s^3CLL_s + s^2CLR_s + s(L + L_s) + R_s} \quad (1)$$

其中:  $C$ ,  $L$  为 OF 的电容值和电感值;  $R_s$  为电网等效电阻值;  $L_s$  为电网等效电感值。

### 1.2 输出滤波器的设计原则

设计输出滤波器主要就是确定其各个参数, 首先应确定电容器的电容量  $C$ , 然后根据初选的电容量  $C$  计算电感  $L$ 。在实际工程中, 电容量  $C$  的确定需要考虑电容的电压条件、电流条件、容量条件等条件。对输出滤波器参数进行设计, 应满足下列性能指标:

① 输出特性最佳, 即保证在主要谐波输出频率段上  $F_0(\omega)$  取最大值。设  $\omega_p$ 、 $\omega_q$  分别为有源滤波器输出最小次数和最大次数补偿谐波的频率, 则应有:

$$\max F = \max \left[ \frac{1}{\omega_q - \omega_p} \int_{\omega_p}^{\omega_q} F_0(\omega) d\omega \right] \quad (2)$$

将  $F$  转化为离散形式, 得  $F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_0(\omega_i)$  (3)

② 高频谐波输出足够小。APF 输出开关频率谐波满足国标要求的条件为:

$$F_0(\omega_c) \leq \lambda \quad (4)$$

其中:  $\omega_c$  为开关频率;  $\lambda$  为国标确定的阈值。

③ APF 满足动态电流跟踪要求, 即确保式:

$$L \leq \frac{2V_{dc}}{3I_m \omega} \quad (5)$$

其中:  $I_m$  为负载谐波电流  $I_x$  的幅值;  $V_{dc}$  为逆变器直流侧电压。

④ 在系统无源部分相关参数不变的前提下, 确保由系统电压闪变产生的反相整流现象不会导致功率器件的损坏, 即满足下式的要求:

$$L \geq \frac{\sqrt{3}A_1 + U_{kmax}}{2\omega_0^2 CU_{kmax}} \quad (6)$$

其中:  $U_{kmax}$  为逆变器直流侧能承受的最高电压;  $\omega_0$  为系统基波频率;  $A$  为系统基波电流幅值。

## 2 输出滤波器参数的计算

### 2.1 电容初值的确定

设计 OF 参数时应考虑开关谐波频段和补偿频段两个频段的特性。首先可根据要滤除的开关谐波频率和对  $C$  的无功要求初步设计 OF 的参数, 然后以初步设计的参数为初值。以满足 APF 补偿频段的幅频和相频特性要求为目标, 对电路参数进行优化。最后, 由于电网容量会在一定的范围内变化, 所以需考虑 OF 特性受电网等效阻抗变化的影响程度来最终确定 OF 的参数。根据 OF 的图 2 中的传递函数和期望的开关谐波含量(通常为 3%), 可以写出  $C$  的不等式:

$$\left| \frac{(j\omega_c)L_s + R_s}{(j\omega_c)^3CLL_s + (j\omega_c)^2CLR_s + (j\omega_c)(L + L_s) + R_s} \right| \leq 3\% \quad (7)$$

其中:  $\omega_c$  为开关频率。

用 OF 的空载传递函数和期望开关谐波的含量进行简化计算, 得:

$$\left| \frac{1}{(j\omega_c)^2CL + 1} \right| \leq 3\% \quad (8)$$

在实际工程应用中, 对电路的设计还需考虑效率和成本。在 APF 主电路中,  $C$  值越大, 对逆变器的容量要求也越大, 从而降低了系统的效率;  $C$  值越小, 则其特性受负载的影响就越大。因此, 在设计中, 取电容的无功容量为逆变器容量的 15%<sup>[2]</sup> 来确定  $C$  值:

$$C \leq \frac{P}{3 \times 2\pi f_r U_c^2} \times 15\% \quad (9)$$

式中:  $f_r$  为 APF 补偿谐波频段中幅值最大的谐波的频率;  $P$  为逆变器的容量;  $U_c$  为电容  $C$  的额定电压。

### 2.2 电感初值的确定

电感值的确定, 应满足以下要求:

① 当电流过零时, 此时电感足够小, 以满足快速跟踪电流的要求;

② 当电流处于峰值时, 电感应足够大, 以满足抑制开关谐波电流的要求。

根据上述要求, 电感值  $L$  为:

$$L = \frac{m}{\omega_c^2 C} \quad (10)$$

其中： $m$ 为一个与滤波器的调谐锐度有关的参数，由参考文献[1, 2]可知， $m$ 一般在 0.5~2 之间。当  $m=2$  时，滤波器具有较高的品质因数，此时滤波器具有最好的滤波效果。

### 3 系统优化及仿真

利用PSIM软件对OF参数进行仿真优化，仿真模型如图3所示。其中仿真参数为：电网等效电阻  $R_s=0.5 \Omega$ ，电网等效电感  $L_s=0.5 \text{ mH}$ ，直流侧电压  $U_{dc}=600 \text{ V}$ ，采样频率为10 kHz。

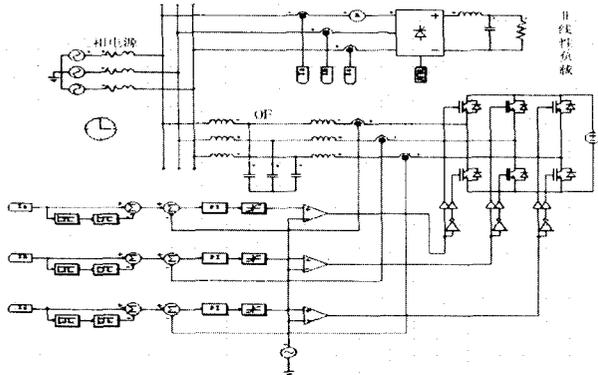
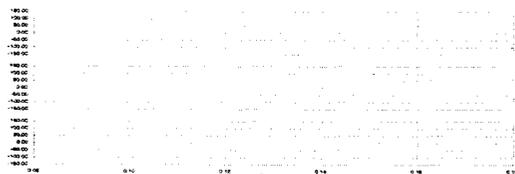


图3 APF仿真模型

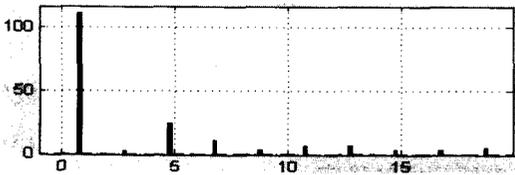
Fig.3 Simulation model of APF

#### 3.1 未投入OF时的仿真结果及分析

当未投入输出滤波器OF时，负载电流仿真波形、频谱图及电源电压仿真波形如图4所示。



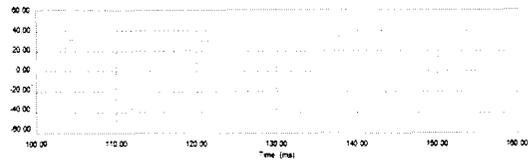
(a) 负载电流波形



(b) 负载电流频谱图



(c) 电网电流波形



(d) APF 输出电压波形

图4 未投入OF时的负载电流仿真波形、频谱图及电源电压仿真波形

Fig.4 Waveforms of load current simulation waveform, spectrum and power voltage of simulation waveform without OF

表1为在OF未投入系统上时，负载电流 ( $i_{La}$ ) 及电网电流 ( $i_{Sa}$ ) 谐波含量的比较情况。

表1 未投入OF时负载电流及电网电流的谐波含量  
Tab.1 THD of load current and network current without OF

	基波	5次	7次	11次	13次	THD
$i_{La} / \text{A}$	109.2	26.5	10.1	9.9	5.7	27.97%
$i_{Sa} / \text{A}$	111.4	4.3	2.6	3.1	2.3	5.67%

通过对仿真结果分析可知，非线性负载主谐波为5、7、11、13次谐波。当OF未投入系统时，APF输出电压含有大量高次谐波。这是APF中开关器件产生的高次谐波，如果不进行滤除，将对APF的工作性能产生不利影响。

#### 3.2 OF参数的初步确定及仿真分析

根据前面介绍的方法可初步确定OF的参数：电容  $C=30 \mu\text{F}$ ，分别将  $m$ 、 $\omega_c$  代入可得滤波器电感  $L=0.0169 \text{ mH}$ 。对仿真模型进行仿真，其滤波结果如图5所示。

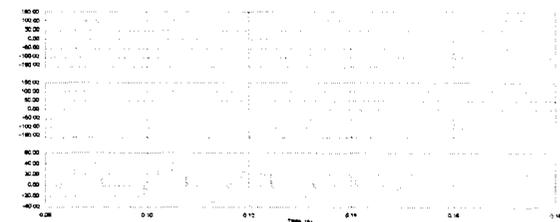


图5 投入OF后的负载电流、电网电流、APF输出电压波形  
Fig.5 Waveforms of load current, network current and APF output voltage with OF

表2为在OF投入系统后，负载电流 ( $i_{La}$ ) 及电网电流 ( $i_{Sa}$ ) 谐波含量的比较情况。

表2 投入OF后负载电流及电网电流的谐波含量

	基波	5次	7次	11次	13次	THD
$i_{La} / A$	109.3	26.6	10.1	9.9	5.7	28.04%
$i_{Sa} / A$	110.9	3.9	2.4	2.1	1.8	4.82%

以初步确定的参数进行仿真, 电网电流中的高频开关毛刺得到明显减少, 波形从整体上看较接近正弦波了, 但仍有少量高次谐波。

### 3.3 OF参数的优化及仿真分析

#### 3.3.1 优化分析

根据OF的输出滤波器OF的传递函数, 可得出逆变器向电网输入电流为:

$$I_z(j\omega) = \frac{U_{out}(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{G(j\omega) \cdot U_{in}(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{U_{in}(j\omega)}{R_s(1 - \omega^2 CL) + j\omega(L + L_s - \omega^2 CLL_s)} \quad (11)$$

$I_z(j\omega)$  的增益  $|I_z(j\omega)|$  为:

$$|I_z(j\omega)| = \frac{|U_{in}(j\omega)|}{\sqrt{R_s^2(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2(L + L_s - \omega^2 CLL_s)^2}} \quad (12)$$

由于电网电流中的高次谐波含量较低, 因此若要抵消其中的高次谐波, 则应使  $I_z(j\omega)$  中的高次谐波含量降低。

当逆变器输出电压  $U_{in}(j\omega)$ , 电网等效电感  $L_s$  与电网等效电阻  $R_s$  情况不变时, 降低 OF 中的  $L$  值可使  $I_z(j\omega)$  在高于 OF 谐振频率的峰值降低。根据输出滤波器中  $L$  和  $C$  参数是离散的, 采用网格法对上述输出滤波器 OF 寻优。经优化后的参数为:  $C=60 \mu F$ ,  $L=0.0085 \text{ mH}$ 。

#### 3.3.2 仿真结果分析

以优化之后的 OF 仿真模型进行仿真, 其滤波结果如图 6 所示。

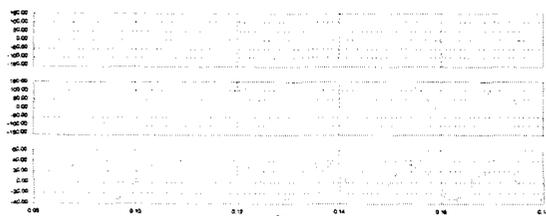


图6 经过优化后的负载电流、电网电流、APF输出电压波形  
Fig.6 Waveforms of load current, network current and APF output voltage with optimization

表3为在OF投入系统后, 负载电流 ( $i_{La}$ ) 及电网电流 ( $i_{Sa}$ ) 谐波含量的比较情况。

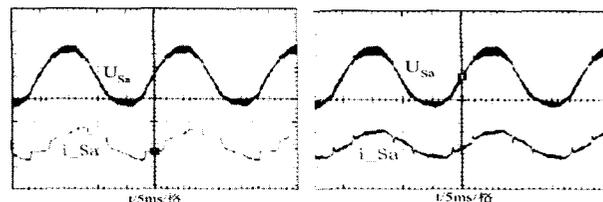
表3 优化后负载电流及电网电流的谐波含量

	基波	5次	7次	11次	13次	THD
$i_{La} / A$	109.3	26.6	10.2	9.9	5.7	28.10%
$i_{Sa} / A$	110.1	2.4	1.6	1.8	1.4	2.87%

与上述初始设计的OF比较, 经过优化设计的OF使电网电流更接近正弦波, 并且波形更加平滑。其中高次谐波进一步减少。

## 4 实验结果验证

为进一步验证本文所述方法的正确性, 在仿真的基础上进行实验研究。实验结果如图7所示。



(a) 滤波之前电网电流波形 (b) 滤波之后电网电流波形  
 $U_{Sa}$ : 电网电压 50 V / 格  $i_{La}$ : 电网电流 50 A / 格

图7 实验波形

Fig.7 Experiment waveforms

由图可见, 实验结果和仿真结果一致, 滤波之前电网电流存在严重畸变, 经过滤波之后, 畸变电流得到了很好的补偿。说明采用本文方法设计的OF能提高APF的补偿能力, 证明本文提出的方法是正确的。

## 5 结论

本文分析了输出滤波器的结构和工作原理, 并在此基础上, 为进一步提高 APF 工作效率, 提出一种 OF 参数优化设计方法。通过仿真和实验分析比较, 证明了本文的设计方法的正确性和有效性。

### 参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

[2] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源滤波器——结构·原理·控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(下转第70页 continued on page 70)

- for Counter Measures Against Accidents of Power System Protection and Security Automatic Equipment[M]. Shenyang:Baishan Press, 2000.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.  
State Power Dispatching and Communication Center. Typical Failure Analysis of Relaying Protection of Electric Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press,2000.
- [4] 苏文博,李鹏博,张高峰. 继电保护事故处理技术与实例[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.  
SU Wen-bo, LI Peng-bo, ZHANG Gao-feng. Technique and Examples for Handling Failures of Protective Relays [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [5] 嘉兴电力局. 嘉兴电力局典型事故(事件)汇编[Z]. 嘉兴:嘉兴电力局, 2004.  
Jiaxing Electric Power Bureau. Jiaxing Electric Power Bureau Accident Compilation [Z]. Jiaxing: Jiaxing Electric Power Bureau, 2004.
- [6] 连理枝. 交流断路器用于直流电路和高频电路的有关问题分析[J]. 机电工程, 2000, 17 (2): 47-49.  
LIAN Li-zhi. Some Question of AC Breaker for Use in DC and High Frequency Circuit[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2000, 17 (2): 47-49.
- [7] GB 14285293, 继电保护和安全自动装置技术规程[S].  
GB 14285293, Technical Code for Relaying Protection and Security Automatic Equipment[S].
- [8] DL/T 513622001, 火力发电厂、变电所二次接线设计技术规程[S].  
DL/T 513622001, Technical Code for Designing of Electrical Secondary Wiring in Fossil Fuel Power Plants and Substations[S].
- [9] GB 50171292, 电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范[S].  
GB 50171292, Code for Construction and Acceptance of Switchboard Outfit Complete Cubicle and Secondary Circuit Electric Equipment Installation Engineering[S].
- [10] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.  
WANG Mei-yi. Electric Power Relay Protection Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [11] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.  
ZHU Sheng-shi. High Voltage Relay Theory and Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2007-08-23; 修回日期: 2008-03-04

作者简介:

罗志平(1977-), 男, 学士, 工程师, 从事继电保护检修管理工作; E-mail:lyrlzp@yahoo.com.cn

熊迪(1979-), 男, 学士, 工程师, 从事继电保护检修工作;

吴祖文(1979-), 男, 学士, 工程师, 从事继电保护检修工作。

(上接第49页 continued from page 49)

- JIANG Qi-rong, ZHAO Dong-yuan, CHEN Jian-ye. Active Power Filter——Structure • Theory • Control[M]. Beijing:Science Press,2005.
- [3] 常鹏飞. 有源电力滤波器中输出滤波器的设计及仿真[J]. 船电技术, 2005,(2):56-58,66.  
CHANG Peng-fei. Design and Simulation of Export Filter in Active Power Filters[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2005,(2):56-58,66.
- [4] 钱挺, 吕征宇. 新型有源滤波器的双向互补控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 44-47.  
QIAN Ting, Lü Zheng-yu. Novel Double-direction Compensation Control Scheme for UCI-APF[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(9): 44-47.
- [5] Rukonuzzaman M, Nakaoka M. Single-phase Shunt Active Power Filter with Harmonic Detection[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2002, 149(5): 343-350.
- [6] 涂春鸣, 罗安. 混合有源滤波系统中输出滤波器电感变化对系统性能的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003,15(5): 54-58.  
TU Chun-ming, LUO An. Effect of Inductance Variation in Output Filter on Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(5): 54-58.
- [7] Madtharad C, Premrudeep Reechacharn S. Active Power Filter for Three-phase Four-wire Electric Systems Using Neural Networks[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 60 (2): 179-192.

收稿日期: 2007-09-19; 修回日期: 2007-12-05

作者简介:

王银乐(1959-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护;

刘振华(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, 电力系统谐波抑制. E-mail:lzhysy0312@163.com