

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.022

高频混合型有源电力滤波器的研究*

周 贺,王玲玲,陈辉明*,王正仕
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对无源电力滤波器滤波效果差、易与其他无源设备或电网发生谐振等问题,提出了一种可采用功率MOSFET的高频混合型有源电力滤波解决方案。在现有的无源滤波系统基础上,另加入一条单调谐并联混合型有源电力滤波器支路,使其有针对性的滤除11次基波频率及以上的高频谐波电流分量。根据滤波系统的基本工作原理,推导出电网和混合支路的谐波电流增益,详细分析了有源滤波器的谐波电流增益对谐波分流和抑制效果的影响,并对控制系统进行了分析设计。对所提出的方案进行了仿真研究,并进行了样机实验。研究表明,该方案可以明显改善整个系统的滤波效果,滤波频带宽、谐振抑制效果好,并且系统有源部分容量小。

关键词:无源滤波器;高频;有源电力滤波器;混合滤波;有源增益

中图分类号:TM464 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)04-0549-04

Study on high-frequency hybrid active power filter

ZHOU He, WANG Ling-ling, CHEN Hui-ming, WANG Zheng-shi
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the poor and vulnerable performance of passive power filter, a MOSFET available high-frequency hybrid active power filtering scheme was proposed. Based on the existing passive power filter, a single-tuned hybrid active power filter was added to filter the high-frequency current harmonics pertinently. According to the basic principle of filtering system, the harmonic current gain and system double loop controller were analyzed and designed. Simulation investigation was done and a prototype was built. The results indicate that the system filtering performance is significantly improved, filtering bandwidth is widened, resonance is inhibited and the capacity of the active power filter in the proposed system is very low.

Key words: passive power filter(PPF); high-frequency; active power filter; hybrid filter; active gain

0 引 言

电力谐波是工业现代化的主要副产品之一,日益严重的谐波污染对配电系统造成了严重危害。为保证电能质量,我国已相继出台了适用于不同场合的谐波标准^[1]。

目前,为达到谐波及无功标准,很多工厂已经装设了无源电力滤波器(PPF),结构简单,技术成熟,但滤波效果差且易受电网参数影响。为了在原有滤波系统上解决PPF的固有问题并改善滤波效果,混合型

有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF)应运而生^[2]。文献[3]提出将APF与PPF串联后接入电网,此时APF需要流过所有基波及无功电流,容量较大;文献[4]提出APF与PPF并联接入电网,APF需要承受电网电压,不适合高压系统;文献[5-6]提出外加谐振注入式HAPF,利用LC谐振特性将基波成分剔除,但注入支路仍设计在5、7次附近,且系统结构较复杂,所需电感、电容较大。

本研究提出一种高频并联混合型有源电力滤波器(high frequency-HAPF, HF-HAPF),在原有PPF基础上另加一条混合支路,通过对混合支路的单调谐滤

收稿日期:2014-12-23

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2012AA053601)

作者简介:周贺(1991-),男,吉林吉林人,主要从事高性能DC-DC变换器及有源电能质量控制方面的研究. E-mail:zhouhe@zju.edu.cn

通信联系人:陈辉明,男,教授,硕士生导师. E-mail:huiming@zju.edu.cn

波器设计以及控制参数设计,在不影响低频谐波补偿效果的前提下,可提高谐波补偿带宽,显著改善高频谐波电流补偿效果,同时抑制PPF谐振,高频混合支路结构简单,有源部分容量小。

1 系统结构与原理分析

1.1 主电路拓扑

HF-HAPF由高频混合支路和PPF并联组成。PPF包含5、7次两组LC单调谐滤波器;高频混合支路由单调谐滤波器与APF直接串联后并入电网,无需耦合变压器隔离,主要滤除11次及以上次高频谐波电流,改善滤波效果。系统结构框图如图1所示。APF不承受基波电压且主要补偿高次谐波,容量小,故功率开关器件可采用功率MOSFET。

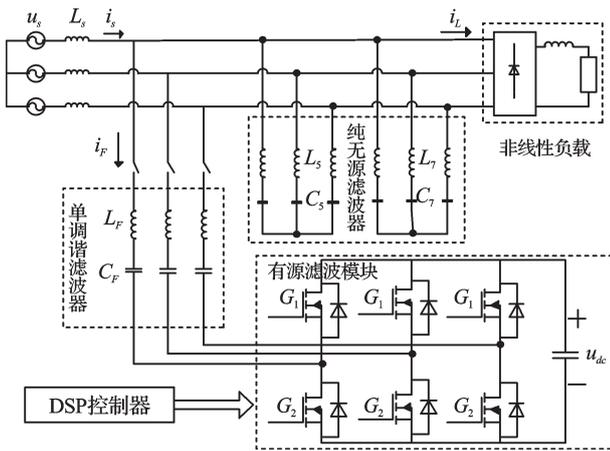


图1 系统结构框图

u_s —电网电压; L_s, L_F, C_F —电网等效电感、混合支路电感、电容,负载为二极管不控整流电路

1.2 HF-HAPF工作原理

本研究将APF控制为受控电压源 u_c , 其输出电压参考为电网谐波电流 i_{sh} 的 K 倍, 即 $u_c^* = Ki_{sh}$ 。忽略电网谐波电压, 可得系统谐波等效电路如图2(a)所示, 分析可得:

$$i_{sh} = \frac{Z_{Ch}}{Z_{Sh} + Z_{Ch} + KZ_{Ch}/Z_{Ph}} i_{Lh} \quad (1)$$

式中: Z_{Sh}, Z_{Fh}, Z_{Ph} —电网、混合支路单调谐滤波器及PPF的谐波阻抗, $Z_{Ch} = Z_{Ph}Z_{Fh}/(Z_{Ph} + Z_{Fh})$; i_{Lh} —负载谐波电流。

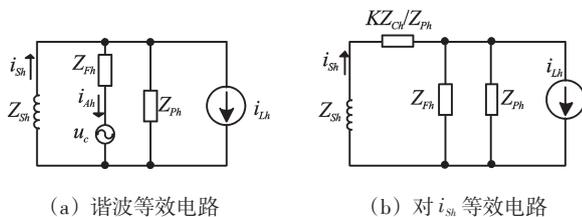


图2 系统谐波等效电路

APF相当于在电网上串联一个大阻抗,强迫谐波电流流入滤波支路,对 i_{sh} 等效电路如图2(b)所示。研究表明,只要有源增益 K 足够大,就能够降低系统参数变化对HF-HAPF滤波效果的影响^[7]。

2 混合支路单调谐滤波器参数选择

考虑在高频混合支路补偿范围内,11、13次谐波电流占主要部分,调谐频率应选在13次基波频率附近,保证在相同的有源增益 K 下,可以兼顾更多高频分量。

参数具体设计还应满足以下原则:

- (1) 尽量降低单调谐支路阻抗,提高滤波效果;
- (2) 为了减小有源滤波容量,应尽量减小基波电流,降低对直流母线电压的需求。

3 HF-HAPF 控制分析与设计

根据图1拓扑和HF-HAPF工作原理可得系统整体控制框图如图3所示。当系统参数一定时,系统补偿效果取决于 K 值和APF输出电压环的设计。

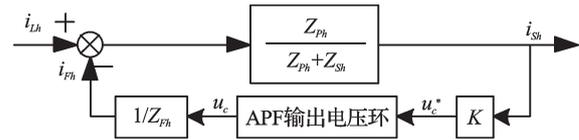


图3 HF-HAPF系统控制结构

3.1 滤波特性分析

根据图2谐波等效电路,分别推导出网侧谐波电流增益 $G_{SL,H}(s)$ 和混合支路谐波电流增益 $G_{AL,H}(s)$:

$$G_{SL,H}(s) = \frac{i_{sh}(s)}{i_{Lh}(s)} = \frac{Z_{Fh}(s)Z_{Ph}(s)}{Z_{Sh}(s)[Z_{Fh}(s) + Z_{Ph}(s)] + [K + Z_{Ph}(s)]Z_{Ph}(s)} \quad (2)$$

$$G_{AL,H}(s) = \frac{i_{Ah}(s)}{i_{Lh}(s)} = -\frac{[K + Z_{Sh}(s)]Z_{Ph}(s)}{Z_{Fh}(s)[Z_{Sh}(s) + Z_{Ph}(s)] + [K + Z_{Sh}(s)]Z_{Ph}(s)} \quad (3)$$

APF增益 K 对滤波特性的影响如图4所示。 K 取不同值时,对网侧谐波电流在5、7次基波频率处的电流增益影响较小,对高频混合支路13次附近的高频电流增益影响也较小,但对高频混合支路的5、7次谐波电流增益有较大影响,即对低频谐波在有源支路和纯无源支路的分流有重要影响, K 越小,高频混合支路低次谐波电流越小。因此,适当减小 K 的值,可以在保证总体滤波效果不改变的情况下,减小高频混合支路的容量,提高系统稳定性,有针对性地对11次及以上的高次谐波进行滤除。

HF-HAPF滤波系统与纯无源滤波系统的谐波抑

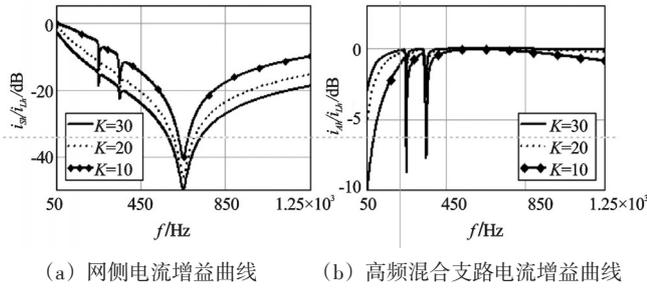


图4 APF增益K对滤波特性的影响

制特性比较如图5所示。可见, HF-HAPF系统在保证对5、7次谐波电流抑制效果的同时,抑制了无源滤波器与电网的谐振,并且极大改善了对11次及以上的高次谐波电流抑制效果。

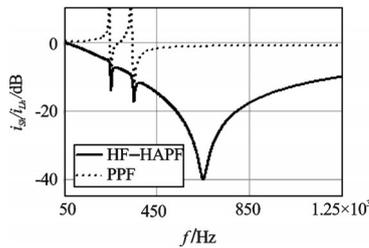


图5 不同滤波器滤波特性比较

3.2 控制器设计

本研究采用的控制策略原理框图如图6所示。电网电流经基波旋转坐标变换得到瞬时有功电流 i_d 和瞬时无功电流 i_q , 将它们同时通过低通滤波器 (low pass filter, LPF), 就可分离基波分量和谐波分量。

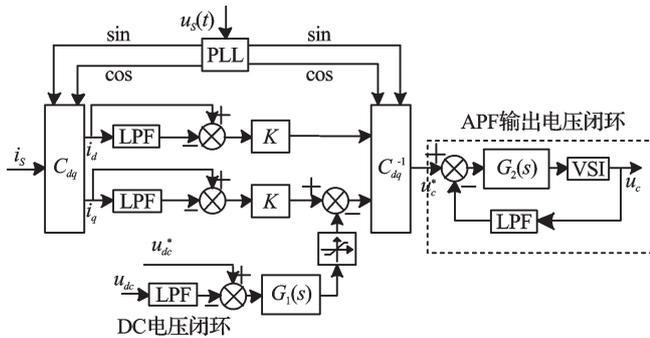


图6 HF-HAPF控制策略原理图

主控制采用双闭环结构, APF输出电压环和DC电压环。由于变换器无输出滤波器, 采样得到APF输出电压 u_c 为开关次高频量, 需要在控制网络中加入LPF对其进行开关周期平均处理, 滤除开关次及其边频带谐波, 从而方便控制器的设计^[8]。APF输出低频成分与参考值的差值经过补偿环节 $G_2(s)$, 再利用SPWM技术得到开关信号, 控制APF进行谐波补偿。APF直流母线电压的控制通过对直流电容充放电调节^[9]。当 u_{dc} 低于其参考量时, 由于有源混合支路在基波频率下呈容性, 电流超前电网电压约 $\pi/2$, 故APF输

出超前电压 $\pi/2$ 基频量即可从电网吸收能量, 从而使电压升高, 反之亦然。所以直流电压反馈环的控制量为 i_q 而不是 i_d 。

实验中取直流电压参考值150 V, APF增益K为10, 控制器参数为:

$$G_1(s) = 0.735 + \frac{13.852}{s} \quad (4)$$

$$G_2(s) = 0.016 + \frac{155.4}{s} \quad (5)$$

4 仿真与实验

为验证以上分析, 本研究对HF-HAPF系统进行Matlab闭环仿真和样机实验。系统部分参数为: 不控整流负载10 kW; 电网电压220 V; 电网分布电感0.15 mH; 混合支路电感0.86 mH、电容70 μ F; 5次滤波支路电感4.1 mH, 电容100 μ F, $Q=25$; 7次滤波支路电感2 mH、电容100 μ F, $Q=25$; 开关频率20 k。

PPF补偿时电网电流如图7所示。

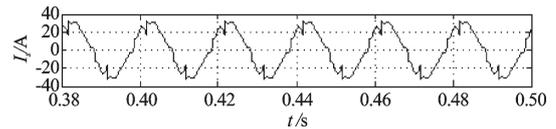
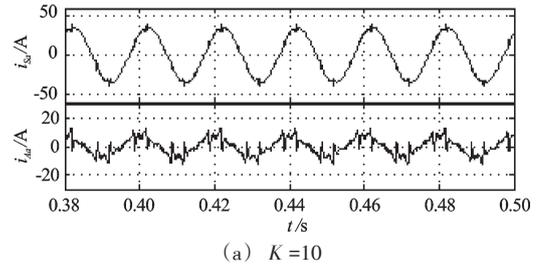
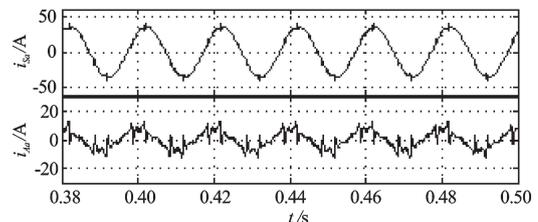


图7 PPF下网侧电流 i_s 仿真波形

其他条件不变, 不同K值下, 电网及高频混合支路电流如图8所示。



(a) $K=10$



(b) $K=20$

图8 HF-HAPF不同K值下网侧电流 i_s 和高频混合支路电流 i_d 仿真波形

图7和图8中各电流的总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 和各次谐波含量如表1所示。由表1可知, 加入高频混合支路后, 补偿效果明显改善, 补偿频带较宽; 不同的K值下, 网侧电流谐波含量变化很小, 对整体滤波效果的影响较小, 但高频混合支路的

5、7次分量在 K 值增大时增大很多,有源容量增加。因此,合理选择 K 值可以不改变滤波效果而减小有源容量。

表1 图7、图8中电流 THD 及各次谐波含量(单位:%)

谐波	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th	23 th	THD
i_{sa}/A (PPF)	9.45	4.1	5.52	3.97	3.5	2.71	2.45	14.1
i_{sa}/A ($K=10$)	3.33	1.11	0.62	0.12	0.99	0.54	1.08	5.0
i_{sa}/A ($K=20$)	2.57	0.87	0.33	0.1	0.48	0.35	0.52	4.8
i_{ia}/A ($K=10$)	19.3	10.7	27.2	21.1	18.9	13.1	12.6	52.2
i_{ia}/A ($K=20$)	31.1	16.9	27.8	21.2	17.5	14.1	12.65	62

负载电流 i_{La} 、PPF 滤波时网侧电流 i_{Sppf} 、HF-HAPF 滤波时网侧电流 i_{shf} 的实验波形如图9所示。PPF 滤波时,网侧电流 THD 为 14.2%,加入高频混合支路后电网电流正弦度较好,网侧电流 THD 为 5.5%,滤波效果明显改善,与理论分析和仿真结果相符,验证了 HF-HAPF 系统的有效性。

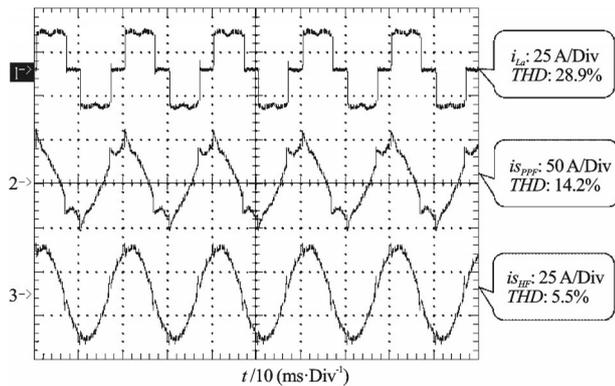


图9 实验波形(a相)

5 结束语

本研究提出的高频并联混合型有源电力滤波器,有源模块无输出滤波器,容量小,可采用功率 MOS-FET,从而提高开关频率,减小损耗。

本研究利用 Matlab 仿真和实验对该方案的有效性

进行了验证。实验结果表明,该方案能够有效滤除 11 次及以上的高次电流谐波,进一步增强 5、7 次谐波滤除效果,同时抑制无源滤波支路与电网的谐振。网侧电流 THD 得到了很大改善,具有很高的工程实用性。

在接下来的研究中,可能需要对单调谐滤波器进行优化设计,以进一步优化系统容量,提升功率密度。

参考文献(References):

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 洪磊,陈晓,陈国柱. 基于重复控制的并联型混合有源滤波器性能控制策略[J]. 电力系统自动化设备, 2012, 32(10):94-98.
- [3] FUJITA H, AKAGI H. A practical approach to harmonic compensation in power system—serious connection of passive and active filters[J]. **IEEE Trans. Ind. Application**, 1991(27):1020-1025.
- [4] TAKEDA M, IKEDA K, TERAMOTO A, et al. Harmonic current and reactive power compensation with an active filter[J]. **IEEE PESC'88 Record**, 1988, 2(4):1174-1179.
- [5] YE Z M, DONG B, QIAN Z M. A Novel Active Power Filter for High Voltage Application [C]//Proceedings of 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Fukuoka, Japan. 1998. New York, USA: IEEE, 1998: 1429-1435.
- [6] 谭甜源,罗安,唐欣,等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):41-45.
- [7] 武健,何娜,徐殿国. 无变压器型并联混合有源电力滤波器设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12):88-94.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] WANG Z Q, XIE C, ZHANG J, et al. Dynamic DC-bus Voltage Control Strategies for a Three-phase High Power Shunt Active Power Filter [C]//Conference Proceedings—IEEE Applied Power Electronic conference and APEC, 2010, Palm Springs, USA, 2010:1514-1520.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

周贺,王玲玲,陈辉明,等. 高频混合型有源电力滤波器的研究[J]. 机电工程, 2015, 32(4):549-552.

ZHOU He, WANG Ling-ling, CHEN Hui-ming, et al. Study on high-frequency hybrid active power filter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4):549-552.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>