

一种高性价比并联混合有源电力滤波器

孙佐¹, 王念春², 许卫兵¹

(1. 池州学院机电工程系, 安徽省池州市 247000; 2. 东南大学电气工程系, 江苏省南京市 210096)

A Parallel Hybrid Active Power Filter With Good Cost Performance

SUN Zuo¹, WANG Nian-chun², XU Wei-bing¹

(1. Department of Mechanical and Engineering, Chizhou College, Chizhou 247000, Anhui Province, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Merits and demerits of conventional parallel hybrid active power filters are analyzed. On this basis a novel parallel hybrid active power filter (PHAPF) is proposed. Active part of proposed PHAPF does not bear fundamental component voltage and flow fundamental component reactive current, and converter rating and DC bus voltage can be reduced, and such a structure makes proposed PHAPF possessing higher static compensation capacity of reactive power. Novel control method and controller structures are also put forward, the control system consists of five control loops. Five feedback signals, namely load current, utility current, output current of power converter, utility voltage and DC bus voltage, are used in control circuit of proposed PHAPF to calculate reference voltage of power converter. To demonstrate the performance of proposed PHAPF, PSCAD/EMTDC simulation is given in the paper. Simulation and test results show that it is good in performances and in harmonics elimination, reactive power compensation. In addition, this facility is in favor of application due to its good cost performance.

KEY WORDS: parallel hybrid active power filter; series fundamental resonance circuit; DC bus voltage; reactive power compensation

摘要: 分析了传统的并联混合型有源电力滤波器的优缺点, 在此基础上提出一种新型的并联混合有源电力滤波器, 其有源部分不承受基波电压和不流过基波无功电流, 进一步减小了有源滤波部分的容量和逆变器直流侧电压, 并兼具较大容量的无功静补偿能力。同时提出一种新的控制方法和控制器结构, 控制系统由5个控制环组成。在控制电路中, 5个反馈信号, 即负载电流、电源电流、逆变器输出电流、电源电压和直流母线电压, 计算逆变器的参考电压信号。为了证明提出的有源滤波器的性能, 利用PSCAD/EMTDC进行了仿真

验证, 仿真和实验结果表明该装置滤波和无功补偿效果较好, 而且这种混合有源电力滤波器的性能价格比较高, 因而具有良好的工程推广应用价值。

关键词: 并联混合有源电力滤波器; 基波串联谐振电路; 直流侧母线电压; 无功补偿

0 引言

人们对有源电力滤波器的研究已逐步从实验室走向实际应用, 较高的性价比是能否得到广泛应用的关键。目前大容量的APF存在造价高、功耗大以及电磁干扰较大等问题, 在实际应用中受到限制。而可使APF容量降低的混合补偿方案可有效地解决APF存在的问题^[1-9]。这种混合型滤波器主要包括: 无源滤波器(PF)、APF均与谐波源并联的结构, 串联的APF加并联的PF的结构, PF和APF串联后与谐波源并联的结构。其中, APF与PF串联后与谐波源并联的结构研究的相对较多一些。

图1为传统的混合滤波器。无源滤波器由多个单调谐支路(也可包括高通滤波器)组成; 它被用来滤去主要谐波, APF用来改善PF滤波器的谐波补偿效果, 并有效地抑制PF滤波器与电网阻抗之间可能产生的串、并联谐振。且它所产生的补偿电压中不含基波电网电压, 只含谐波电压, 因此对于相同的非线性负载, 这种装置的APF容量要比并联型APF的容量小得多, 适用于对大容量的谐波负载进行补偿。但也有一些缺点:

(1) 无源滤波器的参数在制造过程中的误差。如果无源滤波器的参数不准确, 则有源滤波器的容量不能明显减小。

(2) 为了减小无源滤波器的体积, 无源滤波

器的电感必须减小,电容器必须有较大容量。可是,当这种无源滤波器在轻载运行时,大的容量可能引起大的电流使功率因数降低和母线电压升高。

(3) 该补偿装置不具有基波无功功率补偿能力。一般为减小有源部分承受的基波电压和基波电流,PF的基波阻抗很大,因此该系统不适用于要求无功补偿的场合。

本文提出一种新的并联混合有源电力滤波器(parallel hybrid active power filter, PHAPF)和控制方法。提出的混合有源电力滤波器能实现谐波抑制和无功功率补偿。在通过提出的混合滤波器补偿后,电源电流近似正弦波,与传统的混合有源滤波器相比,轻载时的输入功率因数也得到改善,为了证明提出的混合滤波器的性能,利用PSCAD/EMTDC进行了仿真验证和搭建样机进行了实验研究。

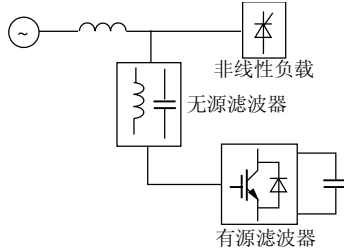


图1 传统并联混合有源电力滤波器单线图
Fig. 1 Single-line diagram of the conventional hybrid active power filter

1 主电路拓扑结构与控制方法

1.1 主电路拓扑结构

新型并联混合滤波器的拓扑结构如图2所示。系统仍然包括无源滤波器和有源滤波器两大部分。其中无源滤波器 $L_5, C_5, L_7, C_7, L_H, C_H, R_H$ 分别构成5次、7次单调谐滤波器和高通滤波器,有源滤波器(APF)与一个基波串联谐振电路并联后串入无源滤波器中; L_1, C_1 构成基波谐振支路,起到分流基波无功电流的作用^[6]。谐波和无功主要由无源滤波器补偿,而APF的作用是改善无源滤波器的滤波特性和抑制电网与无源滤波器之间可能发生的谐振。

新型并联混合滤波器的等效电路如图3所示。图中,谐波源是一个非线性负载,可被视为一个谐波电流源 i_L ,有源部分假设为一个理想的受控电流源 i_c ; Z_F 和 Z_a 分别为无源部分的阻抗和基波串联谐振支路的阻抗; u_S 和 Z_S 分别为系统电压和阻抗。以下文中出现的下标 h 和1分别表示电流或电压的谐波分量和基波分量,对于阻抗而言,分别表示其谐波阻抗和基波阻抗。

按照叠加原理将图3电路进一步分解为电网基波电压和负载基波电流作用下的等效电路如图3(b)、系统在谐波作用下的等效电路如图3(c)。

由于有源滤波器仅输出谐波电流,在电网基波电压和负载基波电流作用下,相当于开路;由于基波谐振支路在基波下处于谐振状态,其电压等于零,相当于短路,如图3(b)所示。从电路中可以看出,在基波下,滤波器相当于无功补偿器,起到补偿固定无功的作用。

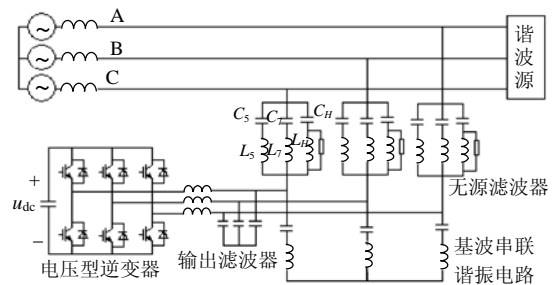


图2 新型并联混合有源电力滤波器拓扑结构
Fig. 2 The topology of the proposed PHAPF

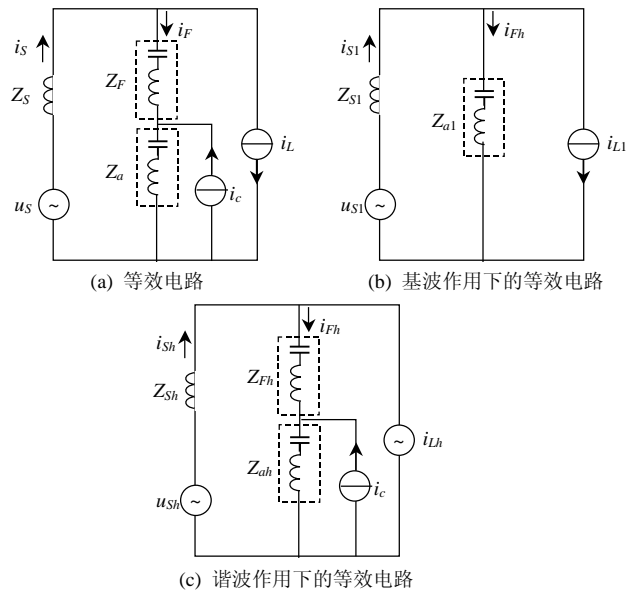


图3 提出的并联混合有源电力滤波器单相等效电路
Fig. 3 Single-phase equivalent circuit of the proposed PHAPF

1.2 控制方法

通常有源电力滤波器控制采用电流跟踪控制方式,可是在小的滤波电感情况下,由于高的开关纹波,在PWM载波周期产生重复交换,这种重复交换现象导致多次的开关操作。为了解决这种情况,提出有源滤波器采用电压跟踪控制方式^[10-11]。

对新型混合滤波器谐波频率下的等效电路(图3(c))进行戴维南等效变换,得到图4。

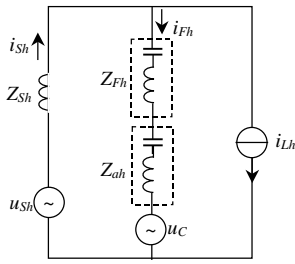


图 4 戴维南谐波等效电路
Fig. 4 Thevenin's equivalent circuit at harmonic frequency

(1) 谐波抑制方法。

为了抑制谐波，采用同时检测负载谐波电流和电网谐波电流复合控制方法^[11]。将有源滤波器控制为一个理想的受控电压源 u_C ，即有源滤波器的参考电压为

$$u_C = u_{C1} + u_{C2} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh} \quad (1)$$

将图4电路进一步分解为负载谐波电流作用下的等效电路见图5(a)、系统谐波电压作用下的等效电路见图5(b)。

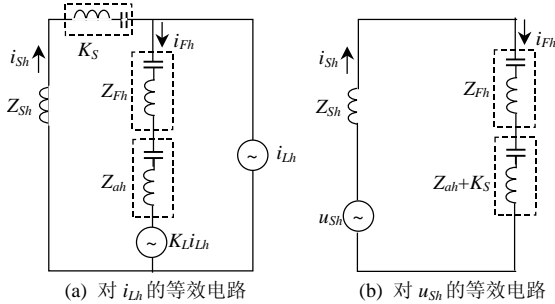


图 5 复合控制的等效的电路
Fig. 5 Equivalent circuit of compound control

只考虑对 i_{Lh} 的补偿特性时，假设电源电压 u_S 为正弦。电源电流的谐波分量 i_{Sh} 、有源滤波器的输出电压 u_C 分别为

$$i_{Sh} = \frac{(Z_{Fh} + Z_{ah}) - K_L}{Z_{Sh} + (Z_{Fh} + Z_{ah}) + K_S} i_{Lh} \quad (2)$$

$$u_C = \frac{K_S (Z_{Fh} + Z_{ah}) + K_L (Z_{Sh} + Z_{Fh} + Z_{ah})}{Z_{Sh} + (Z_{Fh} + Z_{ah}) + K_S} i_{Lh} \quad (3)$$

从式(2)可看出，有源滤波器和基波谐振支路的加入相当于在系统侧串联了一个 Z_a 阻抗，从而强迫谐波电流流入无源滤波器，起到改善无源滤波器滤波效果的作用。

分析混合系统对电源电压谐波的滤波特性时，假设不接负载(即 $i_{Lh} = 0$)，此时有源滤波器相当于纯电阻，如图5(b)所示。由该等效电路得出

$$i_{Sh} = \frac{u_{Sh}}{Z_{Sh} + (Z_{Fh} + Z_{ah}) + K_S} \quad (4)$$

$$u_C = \frac{K_S}{Z_{Sh} + (Z_{Fh} + Z_{ah}) + K_S} u_{Sh} \quad (5)$$

根据叠加原理，由式(2)~(5)可知， K_S 数值很大时，混合系统可达到理想的滤波特性，如式(6)所示

$$\begin{cases} i_{Sh} = (Z_{Fh} + Z_{ah}) i_{Lh} + u_{Sh} \\ i_{Sh} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(2) 抑制电网与有源滤波器高频振荡。

由于采用电压控制方式，无源滤波器装置可导致在电源和有源滤波器之间产生高频振荡。因此应用第3个控制环去消除高频振荡。第3个控制环用来产生一个虚拟的谐波电阻与PF装置串联。虚拟的谐波电阻对谐波起抑制作用，通过逆变器产生一个与有源电力滤波器谐波电流成比例的谐波电压。因此第3个控制信号 u_{C3} 为

$$u_{C3} = K_{ch} i_{ch} \quad (7)$$

式中 i_{ch} 为有源电力滤波器谐波电流。因此逆变器相当于一个虚拟的谐波电阻(k_{ch})。

(3) 有源滤波器的直流母线电压控制。

位于电压逆变器直流母线侧的直流电容器给逆变器提供直流电压和储存能量，直流侧母线电压希望控制为稳定值^[5]。可是，第2和第3个控制环的虚拟谐波电阻和逆变器的开关损耗将消耗有功。因而直流侧母线电压变化不可避免，为了维持直流侧母线电压为1个稳定值，必须采用第4个控制环。直流母线侧电压调节通过逆变器产生一个与有源电力滤波器基波电流同相或不同相的基波电压。第4个控制信号 u_{C4} 为

$$u_{C4} = K_{c1} i_{c1} \quad (8)$$

式中 i_{c1} 为有源电力滤波器基波电流。因而，当基波电压与基波电流同相时，有源电力滤波器从电源吸收有功功率；当基波电压与基波电流反相时有源电力滤波器向电源发出有功功率。从而维持直流侧母线电压为稳定值。

(4) 无功补偿控制。

为了使有源电力滤波器补偿无功功率，逆变器必须产生一个与电源基波电压同相的基波电压。有源滤波器提供的无功功率 Q_a 为

$$Q_a = Q_C (1 - U_{a1} / U_{s1}) \quad (9)$$

式中： Q_C 为无源滤波器提供的无功功率； U_{s1} 和 U_{a1} 分别为电源、逆变器输出基波相电压均方根值(RMS)。

式(9)表示控制这个基波电压得大小就可以控制补偿的无功功率。第5个控制信号 u_{C5} 可表示为

$$u_{C5} = K_{s1} u_{s1} \quad (10)$$

式中 u_{s1} 为电源的基波电压。提出的有源电力滤波器主要功能是抑制谐波，而无功补偿是次要功能。

最后，抑制谐波和补偿无功功率的电压参考信号可由下式可得

$$u_C^* = u_{C1} + u_{C2} + u_{C3} + u_{C4} + u_{C5} \quad (11)$$

2 控制电路

提出的混合滤波器控制系统框图如图6所示。它由5个控制环组成。图6中，有5个反馈信号，即负载电流、电源电流、逆变器输出电流、电源电压和直流母线侧电压，在提出的混合滤波器控制电路中，用来计算参考电压信号。

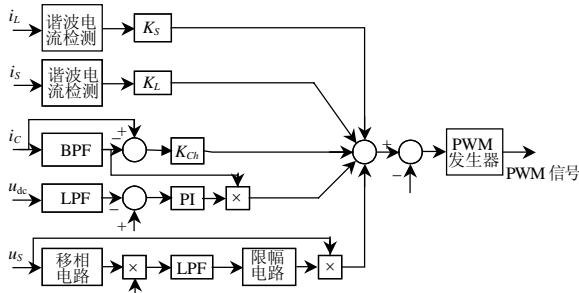


图6 控制系统总体框图

Fig. 6 Block diagram of the control system

第1个和第2个控制环通过检测负载谐波电流和电源谐波电流，实现谐波的抑制功能，如式(1)所示。谐波检测目前有很多种，本装置采用一种基于广义瞬时无功功率理论的 $d-q$ 坐标变换法， dq 变换的谐波检测方法的优点在于可以消除电压谐波和不对称电压的影响^[12-15]。

第3个控制环用来产生一个虚拟电阻，与PF装置串联，一个起抑制作用的因素。逆变器的输出电流通过带通滤波器(BPF)以获得基波分量，然后将检测的逆变器输出电流和它的基波电流反馈给一个减法器以获得谐波分量，谐波分量反馈给放大器以获得第3个控制环输出。

第4个控制环用来控制直流母线电压。第4个控制环通过低通滤波器(LPF)，滤去直流母线侧电压的纹波，并通过一个减法器从低通滤波器输出中减去设定值，之后减法器的结果送给PI控制器。带通滤波器输出有源电力滤波器电流的基波分量，第4个控制环的输出是PI控制器的输出与带通滤波器输出的乘积。

第5个控制环用来补偿无功功率。首先，计算负载的无功功率。电源电压通过移相电路移相 90° ，然后与负载电流相乘；乘积送到低通滤波器以获得负载的无功功率。因为在提出的有源电力滤波器中，

抑制谐波比补偿无功功率应该更优先考虑，而且无功补偿是与负载的谐波电流大小有关，因此限制电路用来限定无功功率补偿。限定电路的限制值是多种多样的，取决于补偿谐波电流的大小。在空载或轻载情况下，补偿谐波电流小，限制电路值大。这意味着在这种情况下逆变器提供大的无功补偿，然而在重载情况下限制电路值几乎为零。这意味着最大的无功功率是由PF装置提供。电源电压与限定电路的输出的乘积为第五个控制环的输出。

最后，参考电压信号由5个控制环输出求和得到。然后，送到PWM发生器产生PWM信号以驱动逆变器。

3 仿真与实验结果

本文利用Manitoba HVDC研究中心的PSCAD/EMTDC进行了仿真验证。设电网电源为50Hz的三相交流电源，其线电压为400 V，电网的电感 L_s 为0.1mH。负荷为三相6脉动可控整流负荷，非线性负载为200 kW。电路的仿真参数见表1。

表1 主要仿真参数

Tab. 1 The main parameters of simulation

| 滤波器 | $C/\mu\text{F}$ | L/mH | R/Ω |
|--------|-----------------|---------------|------------|
| 5次 | 180 | 2.25 | |
| 7次 | 110 | 1.88 | |
| 高通 | 180 | 0.46 | 8.0 |
| 基波谐振电路 | 1 260 | 8.05 | |

图7给出了在稳态下的仿真结果，从波形可以看出，负载电流的谐波很大，其谐波畸变 η_{THD} 为18.1%，而经过补偿后，投入传统混合滤波器时的

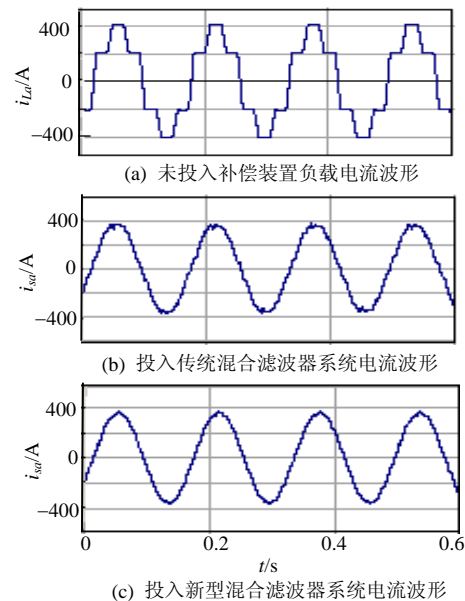


图7 在稳定状态下的仿真结果

Fig. 7 The simulation results at steady state

电源电流(图7(b))的 η_{THD} 为5.15%。投入新型混合滤

波器时的电源电流(图7(c))的 η_{THD} 只有2.33%。电源电流的波形在经过补偿后接近为正弦波,仿真结果表明本文所提出的新型APF有很好的谐波抑制特性。

本系统对电源电压波形严重畸变时也有很好的滤波效果。图8是在系统阻抗很大的情况下(设电网的电感 L_5 为0.8mH)的仿真结果。在图8(a)中,电源电压严重畸变,未投入补偿装置,电源电压和电流的谐波畸变THD为27.5%和18.1%。在投入提出的新型混合滤波器后,电源电压和电流波形接近正弦波,如图8(c)和8(d),且谐波畸变 η_{THD} 分别仅为1.9%和2.51%。因此,新型混合滤波器不仅输入电流的谐波有很好的抑制效果,而且也能消除在系统阻抗很大时非线性负载对电源电压的失真。

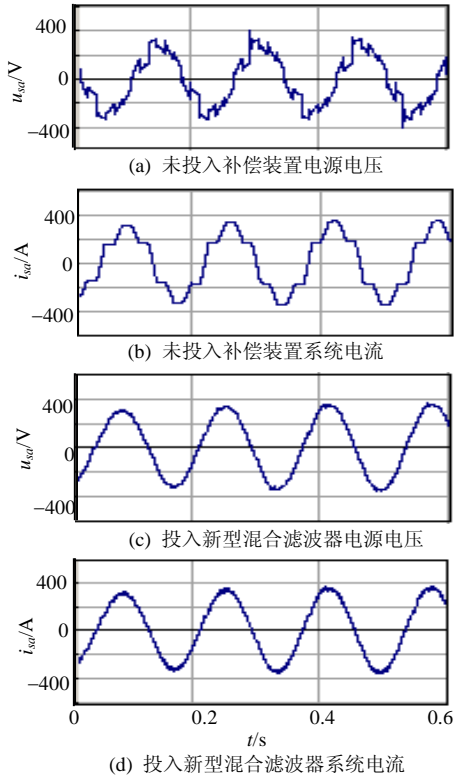


图 8 在系统阻抗很大情况下的仿真结果
Fig. 8 The simulation results under the condition with large system impedance

在仿真结果中,也能得出无功补偿与负载的谐波电流大小有关,在空载或轻载情况下,逆变器提供大的无功补偿,在重载情况下,最大的无功功率是由PF装置提供。

对于相同的系统参数与负荷情况(为了比较,采用相同的无源滤波器参数),表 2 为所提出的新型混合 APF 与传统并联混合 APF 仿真结果比较。

从表 2 中看出,新型并联混合有源电力滤波器的逆变器的容量只有负载容量的 0.6%,有源部分的

容量显著减小。

表 2 两种 APF 装置仿真结果比较
Tab. 2 Comparison of simulation results

| 参数 | 传统 PHAPF | 新型 PHAPF |
|----------------|----------|----------|
| 直流侧母线电压/V | 200~280 | <200 |
| 逆变器输出有效值电压/V | 49.0 | 6.8 |
| 逆变器输出有效值电流/A | 72.5 | 61.0 |
| 逆变器容量/kVA | 10.3 | 1.24 |
| 逆变器容量与负载容量比值/% | 5.2 | 0.6 |

为了验证本装置的实际补偿效果,搭建20kVA样机进行实验研究。实验系统的构成如图2所示,其中负载为三相全控桥式整流器,无源滤波器的参数 $L_5=13.5\text{ mH}$, $C_5=30\text{ }\mu\text{F}$, $L_7=6.9\text{ mH}$, $C_7=30\text{ }\mu\text{F}$, $L_H=2.6\text{ mH}$, $C_H=30\text{ }\mu\text{F}$, $R_H=5.0\text{ }\Omega$ 。

图 9 是系统稳态运行时的实验结果,图 9 (a)为补偿前的系统电流和电网电压,图 9 (b)为投入新型混合滤波器后的系统电流和电网电压。从图中看出,补偿后的系统电流基本为正弦波,且系统电流与电网电压具有相同的波形,使得系统电网端的功率因数可以达到 1。实验结果表明,本文提出的混合有源电力滤波器能很好的实现谐波抑制和无功补偿。

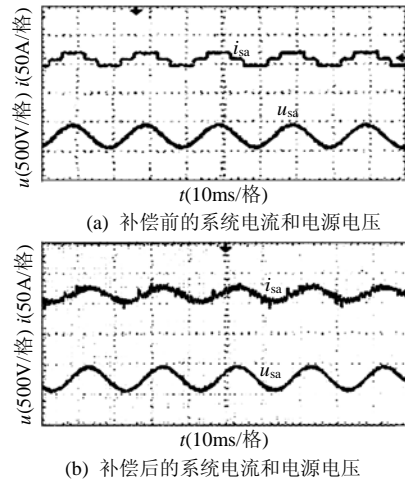


图 9 在稳定状态下的实验结果
Fig. 9 The test results at steady state

4 结论

(1)提出了一种新型高性价比的并联混合有源电力滤波器,其有源部分先与基波串联谐振电路并联,再与无源部分串联,使 APF 不承受基波电压和不流过基波无功电流,从而大大减小了有源部分的容量。

(2)本装置不仅具有很好的滤波特性,而且兼具较大容量的无功静补偿能力。

(3)由于逆变器直流侧母线电压显著降低,由此得出,直流电容和电力电子装置的电压等级也会降低,并且本装置省去了耦合变压器,因此大大降

低了装置的成本。

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.
- [2] 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.
Tan Tianyuan, Luo An, Tang Xin, et al. Development of high-capacity hybrid power filter[J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(3): 41-45(in Chinese).
- [3] Sukin Park, Jeong-hyoun Sung, Kwanghee Nam. A new parallel hybrid filter configuration minimizing active filter size[J]. IEEE Trans on E I, 1999, (1): 400-405.
- [4] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 低成本混合滤波方案及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 5-8.
Xu Yonghai, Xiao Xiangning, Yang Yihan, et al. Research on low cost hybrid active filter[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 5-8(in Chinese).
- [5] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用混合电力滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 23-27.
Wang Yue, Yang Jun, Wang Zhaoan, et al. Study on hybrid power filter used in electrified railway system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 23-27(in Chinese).
- [6] 邓占锋, 朱东起, 姜新建. 降低有源部分容量的混合电力滤波器[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3): 293-295.
Deng Zhanfeng, Zhu Dongqi, Jiang Xinjian. Reduced rating of active filter in hybrid power filter[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(3): 293-295(in Chinese).
- [7] Jou H L, Wu J C, Wu K D. Paralled operation of passive power filter and hybrid power filter for harmonic suppression[J]. IEE Proc-Gener, Transom Distrib, 2001, 148(1): 8-14.
- [8] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊, 等. 混合型有源电力补偿技术与实验研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 39-44.
Xiao Xiangning, Xu Yonghai, Liu Hao, et al. Analysis of hybrid power compensator and its experimental study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 39-44(in Chinese).
- [9] 罗安, 付青, 王丽娜, 等. 变电站谐波抑制与无功补偿的大功率混合型电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 115-123.
Luo An, Fu Qing, Wang Lina, et al. High-capacity hybrid power filter for harmonic suppression and reactive power compensation in the power substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 115-123(in Chinese).
- [10] Jou H L, Wu J C, Chang Y J, et al. New active power filter and control method[J]. IEE Proc. -Electr. Power Appl., 2005, 152(2): 175-181.
- [11] 杨君, 王跃, 曾志东, 等. 一种三相混合电力滤波器控制方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(4): 393-397.
Yang Jun, Wang Yue, Zeng Zhidong, et al. New control method for three phase hybrid power filter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(4): 393-397(in Chinese).
- [12] 马莉, 周景海, 吕征宇, 等. 一种基于dq变换的改进型谐波检测方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 55-58.
Ma Li, Zhou Jinghai, Lu Zhengyu, et al. An important harmonic detecting approach based on dq rotating coordination transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 55-58(in Chinese).
- [13] Paolo Mattacelli, A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation for Active Filter [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2001, 37(1): 81-89.
- [14] 唐卓尧, 任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 25-29.
Tang Zhuoyao, Ren Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 25-29(in Chinese).
- [15] 公茂忠, 刘汉奎, 顾建军, 等. 并联型有源滤波器参考电流获取的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 43-47.
Gong Maozhong, Liu Hankui, Gu Jianjun, et al. A novel method of calculating current reference for shunt active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 43-47(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-12。

作者简介:

孙佐(1965—), 高级实验师, 在职硕士研究生, 主要研究方向为微机测控、电力电子与电力传动, sz712@163.com;

王念春(1966—), 教授, 博士后, 主要研究方向为高低压电器智能化控制设备、电力电子新器件及新设备。

(编辑 王彦骏)