

基于级联多电平的有源滤波器直流侧电压平衡控制

刘文亚, 姚钢, 何变, 李凯, 周荔丹

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

摘要: 为了减小电网中非线性负载带来的谐波电流对电网质量的影响, 针对基于H桥的有源滤波器装置中直流电容电压问题, 提出一种新的控制方法。将控制模块分成模块均值电压控制器和直流母线电压控制器两个部分, 通过调节每个H桥之间的有功功率交换和有源滤波器同电网间有功功率的交换来实现直流电容电压的平衡控制。利用该方法对八个单元H桥级联的并联型有源滤波装置进行Matlab/Simulink仿真, 并基于FPGA+DSP实验平台搭建了三单元H桥级联样机。仿真和实验结果表明, 基于级联多电平的有源滤波器直流侧电压平衡控制方法是有效和实用的。

关键词: 有源滤波器; 级联多电平; 直流电容电压平衡; 谐波补偿; 载波移相

Research of DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF

LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, LI Kai, ZHOU Lidan

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),

Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to reduce the impact of the harmonic current caused by nonlinear load on grid quality, a novel control strategy is proposed for DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF. The balance control is divided into two parts, namely module mean voltage controller and DC bus voltage controller. By adjusting the active power exchanges between each H-bridge and the active power exchange between active power filter and the grid, the DC capacitor voltage balance is achieved. With this method, an eight-unit cascaded H-bridge module is simulated on Matlab/Simulink, while a three-unit cascaded H-bridge prototype is built on the experimental platform based on FPGA+DSP. Simulation and experimental results show that the DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF is valid and practical.

Key words: active power filter; cascaded multilevel; DC capacitor voltage balance; harmonic compensation; carrier phase shift

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0094-08

0 引言

随着电力电子技术器件的广泛应用, 大量的谐波和无功电流注入不同电压等级电网, 由此带来的谐波问题也越来越严重。采用现代电力电子技术、数字信号处理技术和先进控制理论的有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)被公认为治理电网谐波污染、改善电能质量最有效的手段, 已成为电力电子与电能质量领域的研究热点。基于级联H型多电平变流器各单元结构相同, 易于实现模块化设计和安装, 各H桥单元结构相同, 且直流侧相互独立, 在中压有源滤波场合有很好的应用前景^[1-2]。

在基于级联H桥的APF中, 直流侧电容彼此独

立, 每个H桥的并联损耗、开关损耗、调制比和脉冲延时等又存在差异, 导致多电平APF存在直流侧电容不平衡的问题。直流电容电压不平衡会带来许多不利的影响, 电容电压的不平衡会使APF输出电压的谐波畸变率增大, 当其不平衡度较大时, 某些H桥的电容电压会偏高, 影响到装置的安全运行, 严重时会导致系统崩溃^[3-4]。

文献[5]采用微调占空比的方法实现直流侧电容的电压平衡PWM算法, 对基于2单元H桥级联的APF进行实验验证, 但没有从本质上解决直流侧均衡控制的问题; 文献[6]提出了一种模块组合多电平变流器(MMC)应用于并联有源滤波器的新控制策略, 但与级联H桥相比较 MMC输出同样的 $2n+1$ 个

电平数目, 每相多了 n 个子模块电容, 同时还有公用直流侧电容需要控制, 更适用于直流输电的情况下应用; 文献[7]应用瞬时能量平衡建模法推导出了一用于三相三线有源滤波装置的直流侧电压控制数学模型根据比例积分调节器的闭环控制模型和劳斯判据中系统稳定条件, 研究了系统的稳定性; 文献[8-10]将矢量控制的概念引入到直流电压控制或者滞环控制中, 通过对三相开关状态的整体选择, 将误差电压或电流矢量控制在期望的区域内; 文献[11]直接采用电源功率对APF进行控制, 省略了负载谐波和无功的检测及计算环节。本文采用H桥级联的电路拓扑结构, 使输出电压等级增高, 设计了模块均值电压控制器和直流母线电压控制器, 并分别对单相和三相直流侧APF的可控性进行了分析和验证, 实现了各H桥直流母线电压的自均衡控制。采用Matlab/Simulink 对控制算法进行了仿真分析, 结果表明, APF对于无功和谐波负载均具有良好的补偿精度和动态响应速度, 电压均衡控制算法在不同的负载工况下均能实现各H桥直流母线电压的自稳压控制。最后搭建了以FPGA+DSP为基础的实验平台, 在开关频率为5 kHz和10 kHz情况下分别验证APF对谐波负载的补偿效果以及对H桥直流母线电压的均衡控制。

1 APF工作原理和相关数学关系推导

1.1 级联H桥多电平APF的工作原理

图1是本文采用的级联APF电路的拓扑结构, 图中级联多电平APF每一相由8个H桥级联而成, 每一个H桥有四个反并联二极管的IGBT和一个电容组成。基于H桥级联型拓扑结构各单元结构相同, 容易实现模块化设计、安装, 各H桥直流侧相互独立, 各变流器工作对称, 在中压大容量有源滤波器中有很大的应用前景。文中变流器的各个单元都是采用

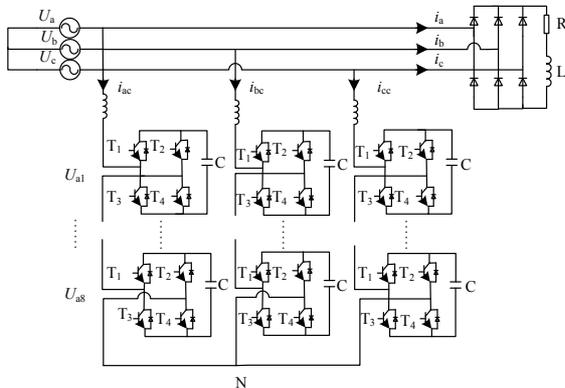


图1 级联APF电路拓扑结构
Fig. 1 Topology of cascade APF

单相全桥结构, 每个相电压的输出是8个变流器单元输出的叠加, 以a相为例

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + \dots + U_{a8} \quad (1)$$

1.2 基于瞬时无功功率理论的 i_p - i_q 谐波和无功电流检测

图2为本文采用的谐波和无功电流检测原理框图, 其中, $C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$, 该算法中需用到与a相电网电压同相位的正余弦信号, 由一个锁相环(PLL)和一个正余弦信号发生器得到。根据瞬时无功理论, 计算出有功电流 i_p 和无功电流 i_q , 再经过低通滤波器和 pq 反变换后得到基波电流 i_{af} 、 i_{bf} 和 i_{cf} , 进而计算出谐波和无功电流值 i_{ac} 、 i_{bc} 和 i_{cc} [12]。

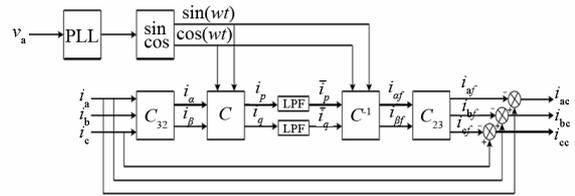


图2 基于 i_p - i_q 的谐波和无功电流检测原理
Fig. 2 Harmonic and reactive current detection principle based on i_p - i_q

1.3 载波移相调制技术原理及应用

CPS-SPWM技术是多重化技术和SPWM技术的有机结合 [13-14]。该技术能够在较低的器件开关频率下实现较高等效开关频率的效果, 而且不需要通过变压器级联, 具有良好的谐波特性。其基本原理是, 若每相级联变流器单元数为 N , 在电流跟踪模块中每相各产生一个共同的正弦波信号, N 个频率幅值相同的三角载波相位依次相差 $T_s/2N$, 分别与调制波信号相交产生 N 个PWM信号波形。最后通过 N 个变流器单元在交流侧的叠加形成 $N+1$ 电平输出波形。

2 级联型H桥APF直流母线电压的均衡控制策略

2.1 控制策略综述

本文提出了一种能有效保证直流侧电压均衡的控制算法, 它包括两个部分: (1) 模块均值电压控制器; (2) 直流母线电压均衡控制器, 其中平均电压控制器为电压外环, 平均值 U_{dc_a} 与参考值 U_{ref} 的误差经PI调节后, 乘以与a相电网电压同相位的正弦信号, 转化为有功分量指令信号, 实现APF与电网间的有功功率交换; 电压均衡控制器是电压内环, 每一个H桥的直流侧电容电压 U_{dc_ai} 与平均值 U_{dc_a} 的误差经

PI调节后,乘以与a相电网电压同相位的余弦信号,转化为无功电压分量叠加到对应的调制波上,改变流入APF的有功分量,从而达到调节级联单元直流侧电容电压的目的。

为了简化分析,且鉴于三相对称,下面单独以八单元H桥级联的a相情况为例,定义各个H桥的平均输出电压为

$$v_{aH} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 v_{ai} = \frac{1}{8} v_{aN} \quad (2)$$

为了分析每个H桥的基波有功、无功的分配,假装置仅流过无功电流 i_c ,也就是总电流。以 i_c 以及 V_a 的相量方向建立 $d-q$ 坐标系, V_{ai} ($i=1, \dots, 8$)为各个H桥输出电压的相量 φ_i ($i=1, \dots, 8$)为 V_{ai} 与电流相量 I_c 的夹角。因此各个H桥交流侧的基波有功及无功功率为

$$\begin{cases} P_i = V_{ai} \times I_c \times \cos \varphi_i = I_c \times V_{ai}^d \\ Q_i = V_{ai} \times I_c \times \sin \varphi_i = I_c \times V_{ai}^q \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明,在APF的动态过程中,各个H桥输出有功功率与其电压相量 d 轴方向的分量成正比,无功功率与其输出电压相量的 q 轴分量成正比。以装置吸发无功电流的工况为例,为了使各个H桥分担相同的无功负荷,必须使各个H桥输出电压相量的 q 轴分量相同。但是因为各个H桥的电路参数设置会有一些差异,例如直流母线电容容值的不同,以及IGBT及其反并联二极管导通、开关损耗的差异,会导致各个H桥的动态过程中有功功率也存在差异,这也就导致了直流侧电压不平衡的现象出现。吸收有功功率多的H桥,直流侧电压会一直上升;吸收有功功率少的,直流侧电压会一直下降。最终导致各个H桥直流母线电压的发散,使APF装置失稳而无法正常工作。

因此必须设计直流母线电压均衡控制器,以维持各个H桥直流母线电压动态均衡。由式(3),将各个H桥交流侧的有功功率改写为

$$P_i = V_{ai}^d \cdot I_c = (V_{av}^d + V_{av}^q) \cdot I_c = P_{av} + \Delta P_i \quad (4)$$

式中: P_{av} 为各个H桥的平均有功功率; ΔP_i 为第 i 个H桥的有功功率与平均有功功率 P_{av} 的偏差。因此整个8个H桥级联系统的a相总有功功率为

$$P_{total} = \sum_{i=1}^8 P_i = 8P_{av} + \sum_{i=1}^8 \Delta P_i \quad (5)$$

为了实现各个H桥有功功率平衡控制,必须使得 V_{ai} ($i=1, \dots, 8$)在 d 轴分量的总和为零,即 $\sum_{i=1}^8 \Delta P_i = 0$ 。因此如本节开头所述,将直流侧电压控

制分成两部分:模块均值电压控制器和直流母线电压控制器。

基于级联H桥链式APF控制算法框图如图3所示。其中 V_{ref} 是电容母线电压参考值, V_{dc_ai} 、 V_{dc_bi} 和 V_{dc_ci} ($i=1, \dots, 8$)分别是a、b和c相的电容侧母线电压值,最后输出的 S_{ai} 、 S_{bi} 和 S_{ci} ($i=1, \dots, 8$)分别为每相对应的第 i 个H桥的PWM调制信号。可以验证电压均衡控制算法在不同的负载工况下均能实现各H桥直流母线电压的自稳压控制。

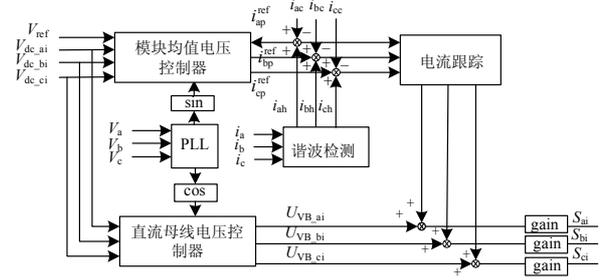


图3 基于级联H桥链式APF控制算法框图 ($i=1, \dots, 8$)

Fig. 3 Control algorithm diagram of chain APF based on cascaded H bridge ($i=1, \dots, 8$)

2.2 模块均值电压控制器

平均电压控制器,用于调节APF装置和电网间有功功率的交换。事实上,AVC实现了式(5)中的 $P_{total} = 8P_{av}$ 。有源滤波器a相的有功电流参考为

$$i_{ap}^{ref} = K_{Lim,AVB} \cdot \left[\left(V_{ref} - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 V_{dc_ai} \right) \cdot G_{PI,AVC}(s) \right] \cdot \sin \theta_{PLL} \quad (6)$$

式中: V_{ref} 是每个H桥直流母线电压参考值; V_{dc_ai} 为a相中第 i 个H桥直流侧母线电压; $G_{PI,AVC}(s)$ 为平均电压PI调节器; $K_{Lim,AVB}$ 为锁相环计算所得到的相位角。

2.3 电压均衡控制器

电压均衡控制器(VBC),用于调节APF中每个H桥间有功功率的交换。直流电压均衡控制器(VBC)主要为了实现式(5)中的 $\sum_{i=1}^8 \Delta P_i = 0$,因此第 i 个H桥的输出为

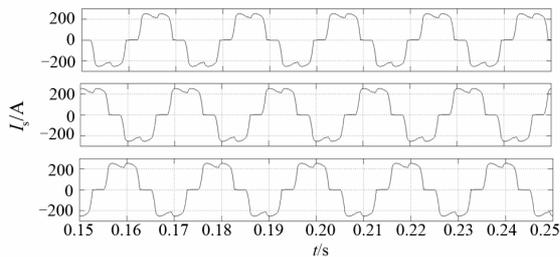
$$U_{VBi} = K_{Lim,VBC} \cdot \left[\left(V_{dc_ai} - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 V_{dc_ai} \right) \cdot G_{PI,VBC}(s) \right] \cdot \cos \theta_{PLL} \quad (7)$$

式中: $G_{PI,VBC}(s)$ 为平均电压PI调节器; $K_{Lim,VBC}$ 为VBC的PI调节器限幅值;VBC调节器的输出 U_{VBi} 作为各个H桥的附加调制信号,实现了各H桥直流母线电压的均衡控制。

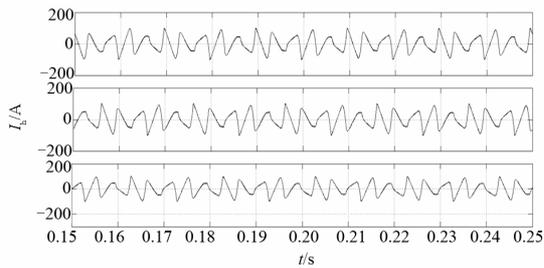
3 仿真和实验验证

3.1 仿真结果及分析

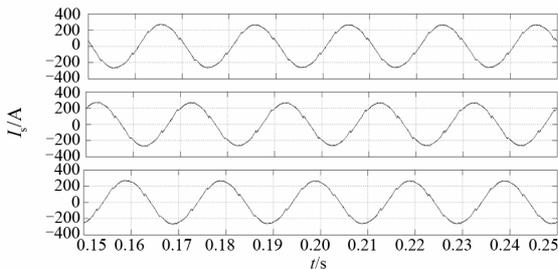
通过采用载波移相SPWM调制技术和基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测法, 依据图 1 所示主电路, 搭建了一个8个H桥级联的电压型三相三线制APF的系统仿真模型。系统参数设置如表 1 所示, 而图 4 则为系统建模后仿真得到的电流电压波形图。



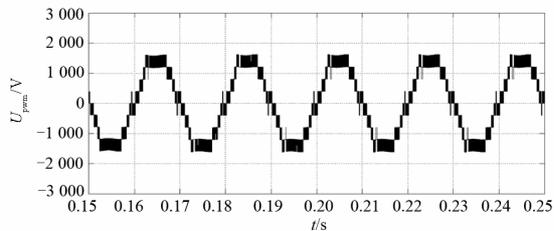
(a) 补偿前的电网电流



(b) APF输出的补偿电流



(c) 补偿后的电网电流



(d) APF输出电压波形

图 4 APF谐波补偿仿真波形图

Fig. 4 APF harmonic compensation simulation waveforms

表 1 APF 仿真电路参数

Table 1 Parameters of APF simulation circuit

系统相电压 U_s	系统频率 f	逆变器连接电感 L_f	直流侧参考电压 V_{dc}	直流侧电容 C_{dc}	PWM 载波频率 f_c
2 200 V	50 Hz	1mH	400 V	3 700 μ F	2 000 Hz

通过表2、表3可以看出APF对电网的基波污染有很好的改善。以5次谐波为例, 补偿前的畸变率是22.28%, 而补偿后可以减小到1.04%, 效果显著。负载侧谐波电流总的畸变率也从25.22%降低到了3.36%, 说明APF能较好的补偿电网的谐波和无功电流。

表 2 负载侧谐波电流总畸变率

Table 2 Total harmonic distortion of load current

时间	补偿前/%	补偿后/%
THD	25.22	3.36

表 3 负载侧奇次谐波畸变率

Table 3 Odd harmonic distortion on the load side

谐波次数	补偿前/%	补偿后/%
3	3.25	1.24
5	22.28	1.04
7	8.76	1.87
11	6.48	1.64

基于级联H桥的APF由于受控的是单个变流器单元的输出电压而不是各相输出的电流, 而各相的电流直接影响它所流过的N个变流器单元直流侧电压, 因此单相的每个H桥单元直流侧电容的均压也是级联多电平变流器在实现中的一个难点。采用上节所述的直流母线电压的均衡控制, 仿真得到的结果如图 5 所示, 图中显示的是A相的 8 个H桥直流侧电容电压波形。从图 5 中可以看出, 直流侧电容电压基本稳定在设定值400 V左右, 上下波动不超过 10 V, 实现了对变流器单元直流侧电压的控制和同相各个变流器单元间直流侧电容的均压。

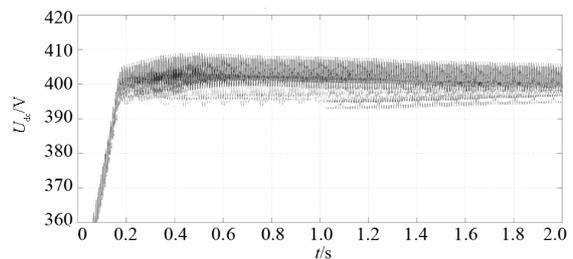


图 5 A相8个H桥单元直流侧电容电压波形

Fig. 5 DC capacitor voltage waveform with 8 cascaded H bridges of phase A

3.2 实验结果和分析

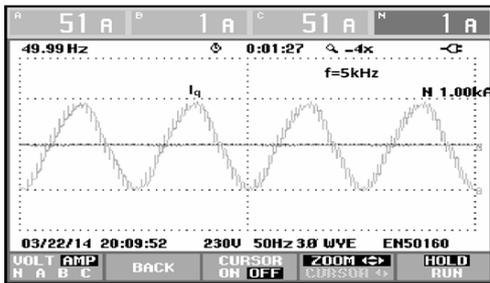
为了验证控制算法的有效性，本节研制了基于三单元H桥级联的APF实验装置。实验参数如表4所示。

表4 APF实验电路参数

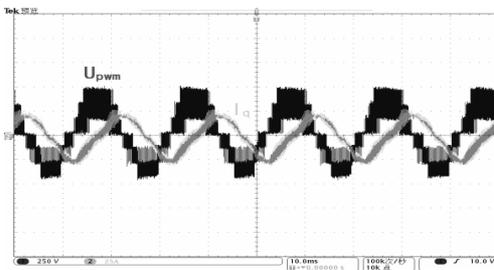
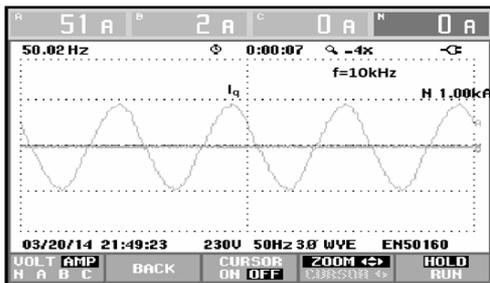
Table 4 Parameters of APF experimental circuit

系统相	系统频	逆变器连	单元直流	单元直流	PWM载
电压 U_s	率 f	接电感 L_f	侧参考	侧电容	波频率 f_c
			电压 V_{dc}	容 C_{dc}	
220 V	50 Hz	1.2 mH	200 V	4000 μ F	5 kHz/ 10 kHz

图6为不同开关频率下APF电流跟踪实验波形结果。图7和图8分别对应APF对含有5次谐波和7次谐波的系统电流进行补偿的效果，从系统电流的波形图以及所含谐波量可以看出APF对系统电流中的5次谐波和7次谐波消除明显。实验也比较了在不同开关频率的情况下对同一谐波的补偿效果：当开关



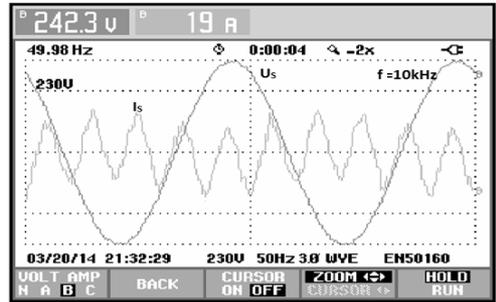
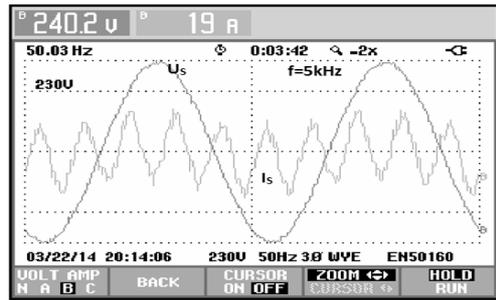
(a) APF发出50 A无功电流波形



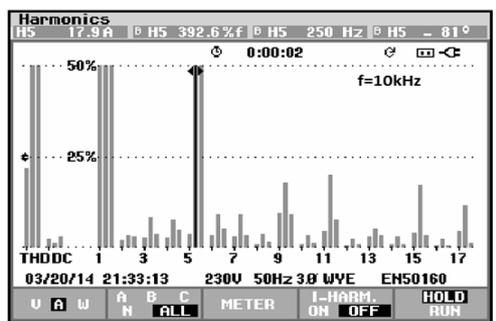
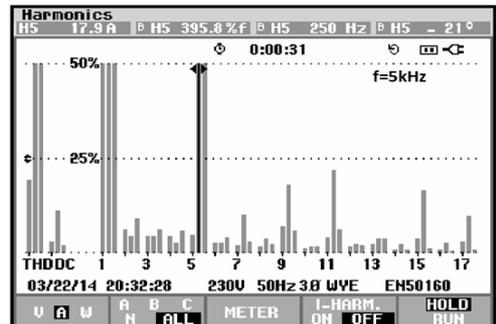
(b) H桥发出电压和无功电流波形

图6 APF电流跟踪实验波形

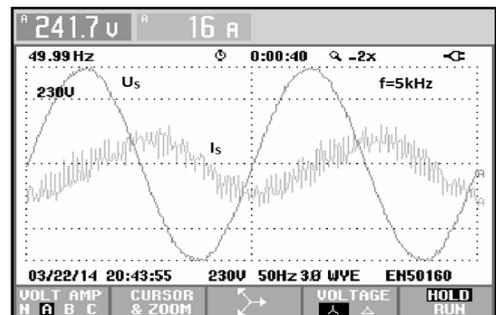
Fig. 6 Waveform of APF current tracking experiment

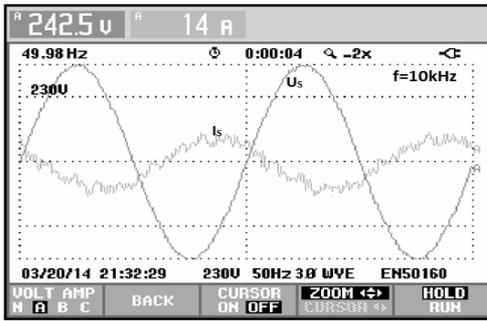


(a) 补偿前系统电流波形

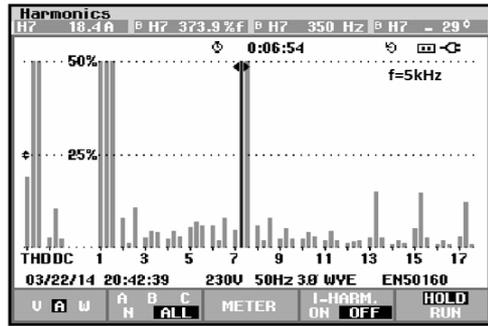


(b) 补偿前5次谐波电流畸变率

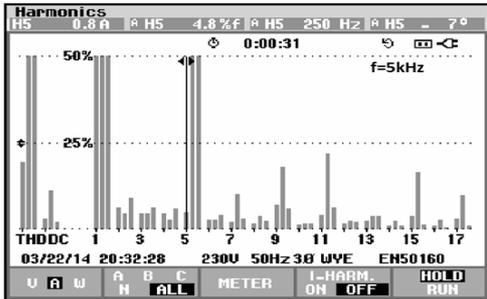




(c) 补偿后系统电流波形



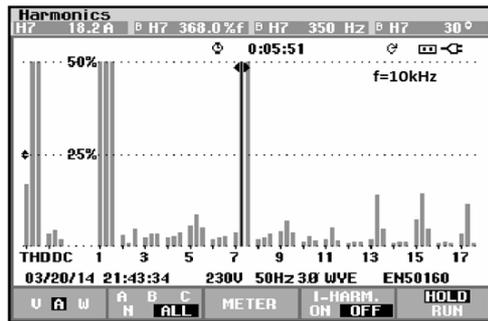
(b) 补偿前7次谐波电流畸变率



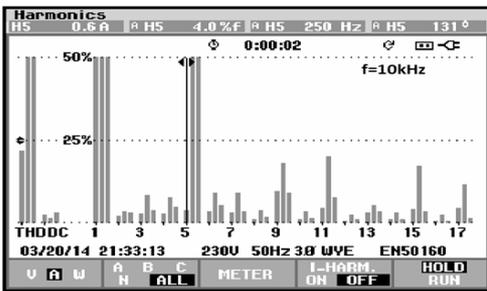
(d) 补偿后5次谐波电流畸变率

图 7 APF对5次谐波的补偿效果图

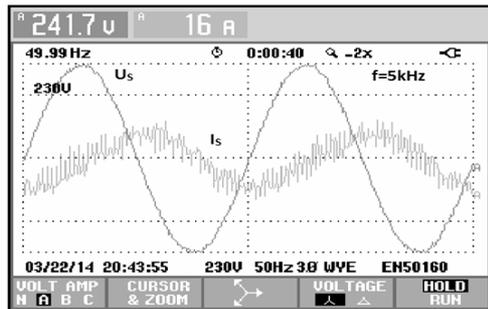
Fig. 7 5th harmonic current compensation of APF



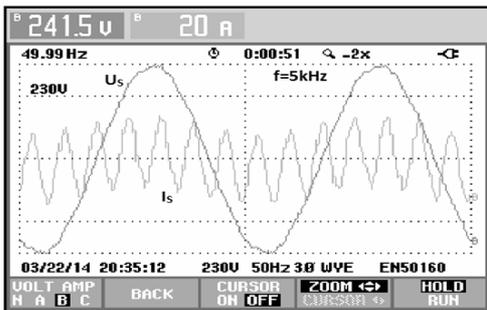
(b) 补偿前7次谐波电流畸变率



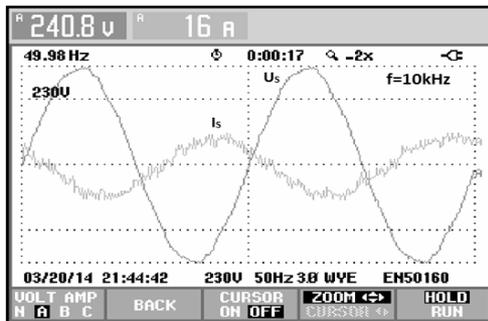
(d) 补偿后5次谐波电流畸变率



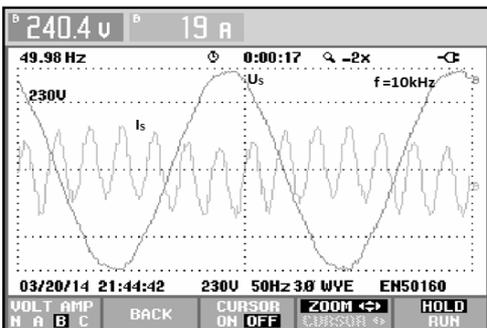
(c) 补偿后系统电流波形



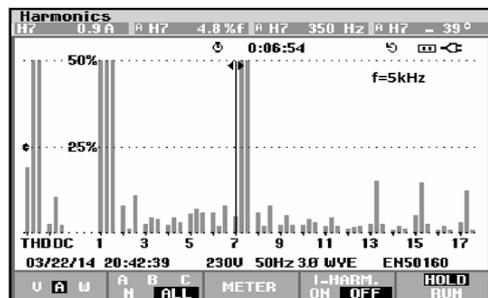
(a) 补偿前系统电流波形



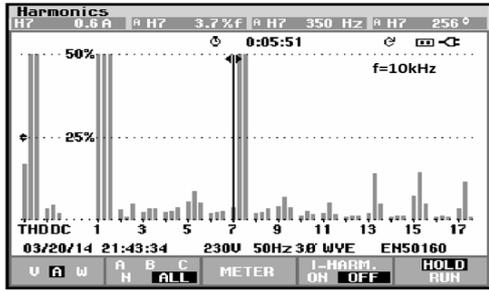
(c) 补偿后系统电流波形



(a) 补偿前系统电流波形



(b) 补偿前7次谐波电流畸变率



(d) 补偿后7次谐波电流畸变率

图 8 APF对7次谐波的补偿效果图

Fig. 8 7th harmonic current compensation of APF

频率较大的时候(即图中 $f=10\text{ kHz}$ 时), 谐波的补偿效果更好, 补偿之后的系统电流纹波及畸变率较开关频率较小的时候(即图中 $f=5\text{ kHz}$ 时)更小。图9为实验样机得到的直流电容电压波形图, 稳态实验波形表明: 直流侧电容电压能稳定在200 V左右。

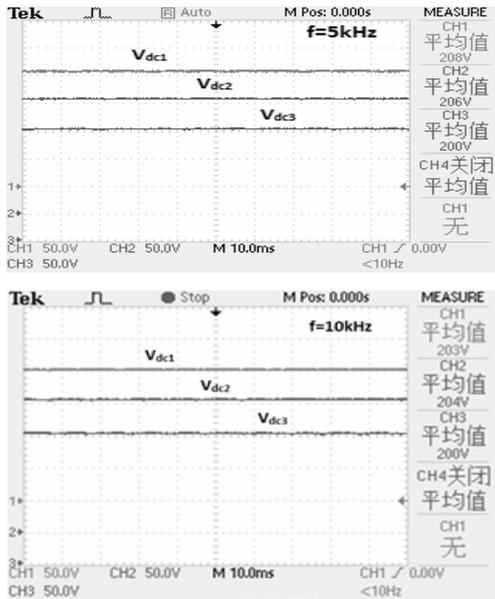


图 9 直流电容电压实验波形

Fig. 9 Experiment waveform of DC capacitor voltage

4 结论

针对基于 H 桥级联的链式 APF 拓扑结构, 本文分析了各 H 桥之间的有功、无功功率分配机理, 设计了模块电压均值控制器和直流母线电压均衡控制器。这种方法通过直接电流控制调节有功功率改变直流电流参考值和 PWM 调制波的输出, 来克服常规 APF 控制中响应慢和直流侧电压平衡难以控制的缺点。采用 Matlab/Simulink 对控制算法进行了仿真分析, 研制了三单元结构的 APF 实验室样

机, 设计了浮点型 DSP 与 FPGA 相结合的高性能主控制器平台, 动态模拟实验对 APF 进行了功能验证。

参考文献

- [1] PENG Fangzheng, LAI Jinsheng. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1997, 33(3): 748-755.
- [2] MATTAVELLI P, MARAFAO F P. Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 1018-1024.
- [3] 杜雄, 周维维, 谢品芳. 直流侧并联型有源电力滤波器的可控性及其统一控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 128-132.
DU Xiong, ZHOU Luwei, XIE Pinfang. The controllability of parallel DC side active power filter and unified control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 128-132.
- [4] 李俊, 王大志, 郭喜峰, 等. 一种有源电力滤波器直流母线电压模糊控制方法[J]. 电气传动, 2011, 41(6): 23-26.
LI Jun, WANG Dazhi, GUO Xifeng, et al. Shunt active power filter DC-bus fuzzy control[J]. Electric Drive, 2011, 41(6): 23-26.
- [5] WANG Geng, LI Yongdong, YOU Xiaojie. A novel control algorithm for cascade shunt active power filter[C] // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004: 771-775.
- [6] 武健, 刘瑜超, 徐殿国. 基于模块多电平变换器的并联有源滤波器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 52-59.
WU Jian, LIU Yuchao, XU Dianguo. Control strategy of shunt active power filter based on modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 52-59.
- [7] 王立峰, 郑建勇, 梅军. 有源滤波装置直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 229-235.
WANG Lifeng, ZHENG Jianyong, MEI Jun. Instantaneous energy equilibrium modeling of DC side voltage control for active power filter device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 229-235.
- [8] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰, 等. 空间矢量脉宽调制下有源电力滤波器直流侧电压设定值研究[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 568-574.

- ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Research on setting value of DC-side voltage for active power filter under space vector pulse width modulation control[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 568-574.
- [9] 曹武, 赵剑锋, 江楠. 有源滤波器同步坐标系下的空间矢量滞环电流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 73-78.
CAO Wu, ZHAO Jianfeng, JIANG Nan. A new space vector hysteresis current control scheme based on synchronous reference frame for APF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 73-78.
- [10] 陈永延, 吴为麟, 邹家勇. 矢量理论在谐波和无功电流检测中的应用与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 126-135.
CHEN Yongyan, WU Weilin, ZOU Jiayong. Application and development of the vectorial theory in detection of harmonics and reactive current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 126-135.
- [11] 沈玲菲, 危韧勇, 徐保友, 等. 一种新型的有源电力滤波器直接功率控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 91-96.
SHEN Lingfei, WEI Renyong, XU Baoyou, et al. A novel APF direct power control approach[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 91-96.
- [12] 刘海波, 毛承雄, 陆继明, 等. 四桥臂三相四线制并联型 APF-STATCOM[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 11-17.
- LIU Haibo, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Three-phase four-wire shunt APF-STATCOM using a four-leg converter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 11-17.
- [13] 王长永, 张仲超. 级联型相移 SPWM 变流器及其在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 28-30.
WANG Changyong, ZHANG Zhongchao. Application of cascaded phase shift SPWM inverter in APF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 28-30.
- [14] 李建林, 李晶, 王立乔, 等. CPS-SPWM 在级联型有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 64-68.
LI Jianlin, LI Jing, WANG Liqiao, et al. Application of CPS-SPWM in cascaded APF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 64-68.

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2014-11-07

作者简介:

刘文亚(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为基于级联多电平的有源滤波器;

姚 钢(1977-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

周荔丹(1973-), 女, 通讯作者, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

E-mail: zhoulidan@sjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)