

Research on H-Bridge Cascaded APF Based on CPS-SPWM

Xiao Gong, Yanlei Zhao, Yong Zhao, Qingyu Ma

College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: 852296615@qq.com

Received: Jun. 10th, 2016; accepted: Jun. 23rd, 2016; published: Jun. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The theory basis that fits for large capacity power electronic equipment of CPS-SPWM is introduced. The advantages over other modulation strategies of CPS-SPWM are discussed. The implementation method of carrier phase-shift pulse-width modulation in the cascade H-bridge converter is adopted. The topology based on shunt active power filter of CPS-SPWM modulation cascade multi-level converter is used. The three-phase instantaneous reactive power theory in the detection level is discussed and its simulation and analysis is presented. The results of simulation and experiment indicate that the shunt active power filter with CPS-SPWM based cascade H-bridge multilevel converters can compensate load harmonics and passive power precisely and efficiently at lower switch frequency.

Keywords

CPS-SPWM, Cascade H-Bridge Multilevel Converters, Shunt Active Power Filter, Load Harmonics

基于CPS-SPWM调制的级联H桥有源电力滤波器研究

巩 晓, 赵艳雷, 赵 永, 马庆玉

山东理工大学电气与工程学院, 山东 淄博
Email: 852296615@qq.com

收稿日期: 2016年6月10日; 录用日期: 2016年6月23日; 发布日期: 2016年6月29日

*通讯作者。

摘要

本文介绍了载波相移脉宽调制适用于大功率场合的理论依据,讨论了级联H桥多电平变流器较其他形式变流器的优势,采取了载波相移脉宽调制在级联H桥变流器的实现方法,采用基于CPS-SPWM调制级联型多电平变流器的并联电力有源滤波器的拓扑结构,探讨了三相瞬时无功功率理论在检测层面的应用,并对其进行仿真和分析。仿真结果表明,在较低的开关频率下,基于CPS-SPWM调制级联H桥并联型APF可以对负载谐波和无功功率进行准确、有效的补偿。

关键词

载波相移脉宽调制, 级联式H桥多电平变流器, 并联有源电力滤波器, 负载谐波

1. 引言

有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是一种进行谐波动态抑制的新型电力电子装置[1],在稳定电网系统、提高用电效率和提升电能品质方面扮演者重要角色。

某些应用场合需要大功率、大容量,然而开关器件的功率处理能力与开关频率之间往往两者难以兼顾,故在APF系统难以应用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术。为解决性能与容量上的矛盾,人们试图从大功率变流器的电路拓扑和控制策略两方面着手以应对功率器件未有本质突破所带来的桎梏。

多电平变流器的开关调制策略有多电平空间矢量调制[2]、阶梯波脉宽调制[3]、基本频率调制载波层叠式PWM[4]、错时采样空间矢量调制[5]、载波相移SPWM等[6][7]。CPS-SPWM技术可以很好的应用于大功率场合,输出波形得到极大地改善,谐波得到明显抑制,滤波器的容量可以相应的减小,由此成本得到显著的控制。同时因其等效开关频率高、传输带宽宽,可以引入各种先进的控制策略,优化整个系统的性能指标。在将CPS-SPWM技术应用于APF时,功率主电路的复杂性没有因此增加,故并没有大幅增加我们的工作量。

本文的主要工作是:给出CPS-SPWM在级联型多电平变流器的实现方法,详述基于 $i_p - i_q$ 的瞬时无功功率理论[8]在检测方面的应用,根据仿真结果分析将CPS-SPWM引入级联式有源电力滤波器的优势。

2. 基于 CPS-SPWM 技术的级联 H 桥型 APF [9]

PWM(Pulse Width Modulation)控制技术[10]在很多场合应用广泛,通过对一系列脉冲的宽度进行调制,来等效地获得所需要波形(含形状和幅值)[11]。由于PWM控制技术具有频率控制以及斩波控制的优点,其载波频率与调制输出波形效果成正比,故其传输特性好、性能优越。CPS-SPWM是对PWM技术的拓展,使其更好的应用于大功率场合。

CPS-SPWM技术的运用可以在比较低的开关频率下得到比较高的等效开关频率,很好的解决功率器件的容量和开关频率二者之间的矛盾。在大功率和特大功率场合,由于器件容量和器件频率的限制,传统的SPWM技术难以应用,CPS-SPWM技术使SPWM技术应用于大功率和特大功率场成为可能。

2.1. CPS-SPWM 基本原理

CPS-SPWM在大功率场合具有明显的优势,其调制方法原理是使各三角载波相位相差 π/N ,且每级H桥单元的左右桥臂使用相位相反的正弦调制波。将各个H桥单元的输出进行叠加,就能得到其输出电压波形有 $2N+1$ 个电平。图1是单极倍频CPS-SPWM调制法的调制波形,可输出 $2N+1=9$ 电平,图2

是载波水平移相调制输出电压波形。

2.2. 级联式 H 桥 APF 拓扑

图 3 是将级联式 H 桥接成星形时，其 N 单元串联三相电路。

每相都是由 N 个相同的 H 桥单元串联组成。图 4 是 H 桥基本单元及其输出电压，其中(a)是 H 桥基本单元结构图，输出电压如(b)所示。

设 U_{dc} 是直流侧电容电压， U_{ds} 是交流侧输出电压，S1~S4 是 4 个相同的功率开关管，由它们组成单相全桥结构，H 桥工作时通过改变 S1~S4 的状态及导通顺序完成。本文 APF 每相都是由四个 H 桥单元组成，H 桥级联逆变器输出的总电压由各 H 桥电平相互错开一定的角度叠加得到。

将双极性 CPS-SPWM 调制应用于 N 单元级联 H 桥多电平变流器时， $2N$ 以下的载波谐波和边频以及 $2Nf \pm 1$ 次以下的低次谐波可以得到有效地消除，同 H 桥单元输出电压相比，输出的基波电压幅值为其 N 倍，则等效开关频率为其 $2N$ 倍。对 CPS-SPWM 进行 MATLAB 仿真，变流器由三个 H 桥单元级联而成，得到变流器的输出电压波形如下图 5，输出的谐波分布如下图 6 所示。在此仿真中，正弦波调制波频率为 50 Hz，三角载波的频率为 7.5 kHz，可知谐波大体位于 45 kHz 附近。

经过仿真，证明了该策略传输性能较好，并且可以在较低的功率器件开关频率下实现较高的等效开关频率，克服了 PWM 技术在大功率场合的不足，同时说明了它是一种适用于 H 桥级联多电平变流器的 PWM 调制策略。

3. 基于三相瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测法[12]

三相瞬时无功功率理论[13]的提出使谐波检测有了显著的提升，基于三相瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测法又是在此基础上的一次显著提升。 i_p 、 i_q 检测法的原理图 7 所示，此方法需要用与 a 相电压 e_a 相位相同的正弦信号 $\sin \omega t$ 及余弦信号 $-\cos \omega t$ ，这两个信号可分别由 PLL 和一个正、余弦信号发生器来获得。得到 i_p 、 i_q 如式(1)。

当电网电压波形是标准正弦波时，由大量仿真实验验证使用以上两种方法都能准确检测出所需谐波及无功电流分量。当电网电压为非标准正弦波时，采用 p-q 检测法[14]获得的谐波有一定误差，而 i_p 、 i_q

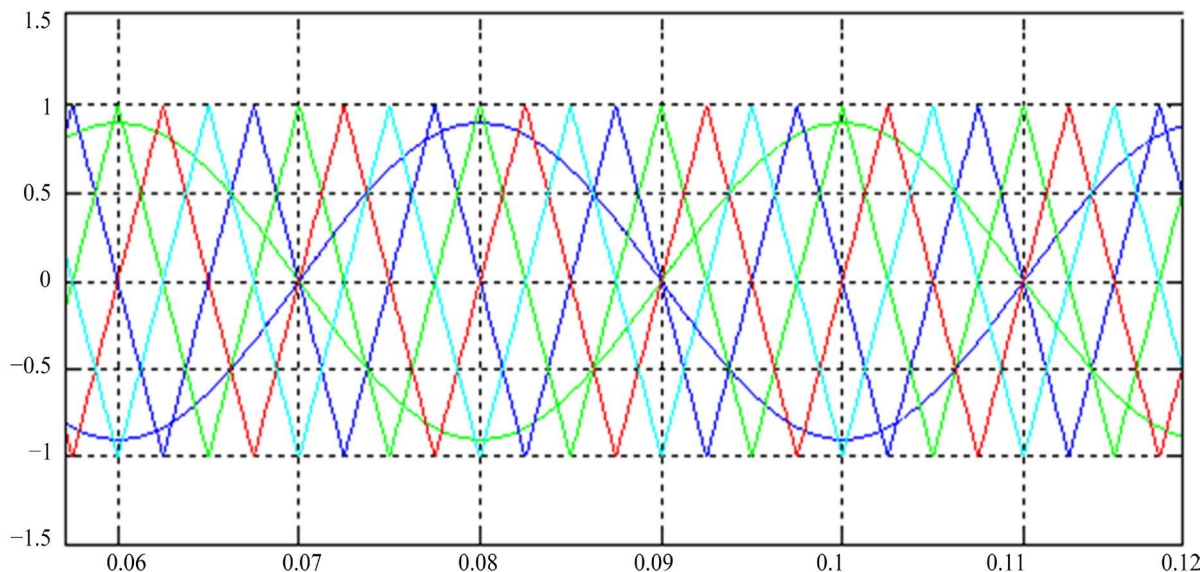


Figure 1. Carrier distribution and the carrier level phase-shift PWM modulation method

图 1. 载波水平移相 PWM 调制法的载波分布

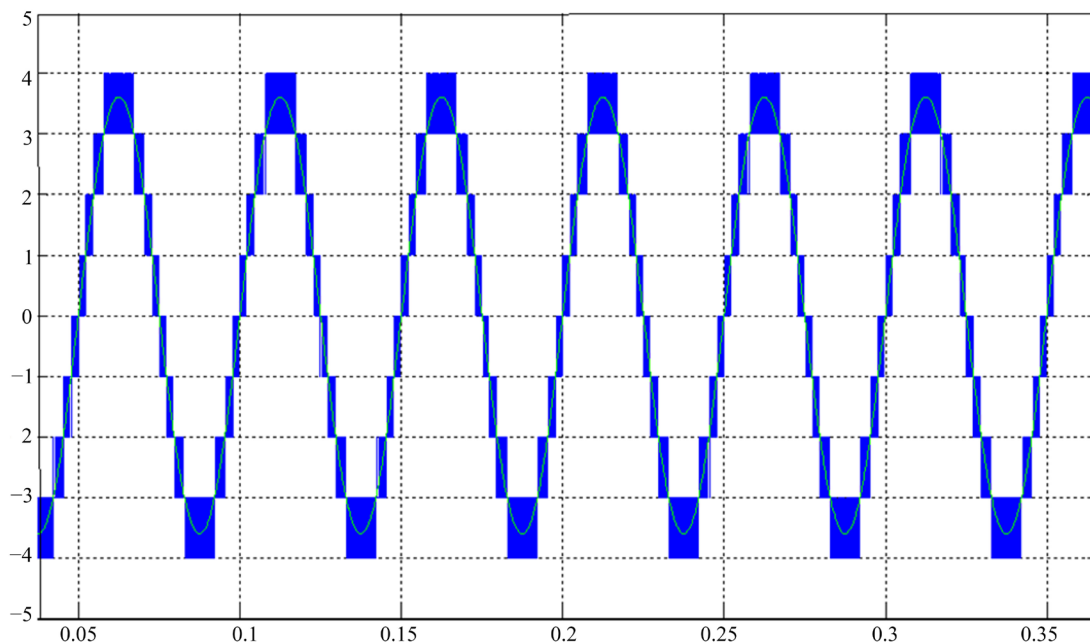


Figure 2. Modulation of the output voltage waveform of the carrier level phase-shift
图 2. 载波水平移相调制输出电压波形

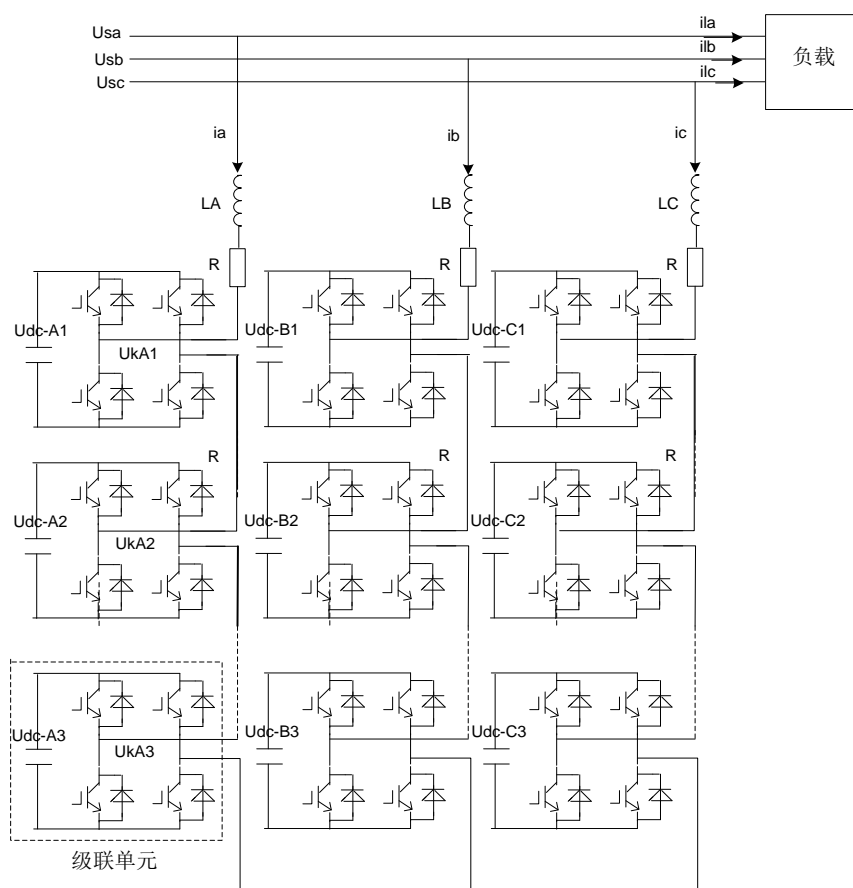


Figure 3. The main circuit of cascade H-bridge multilevel converters
图 3. 级联式 H 桥电路主电路

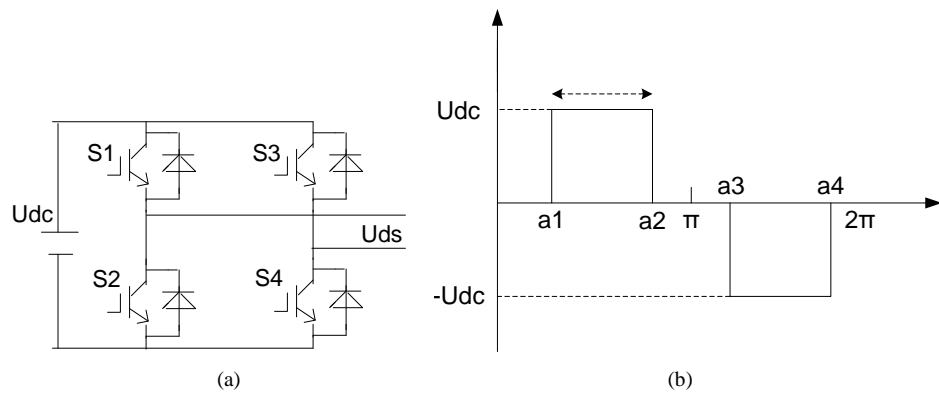


Figure 4. The basic unit of the bridge and the output voltage of H-bridge
图 4. H 桥基本单元及其输出电压

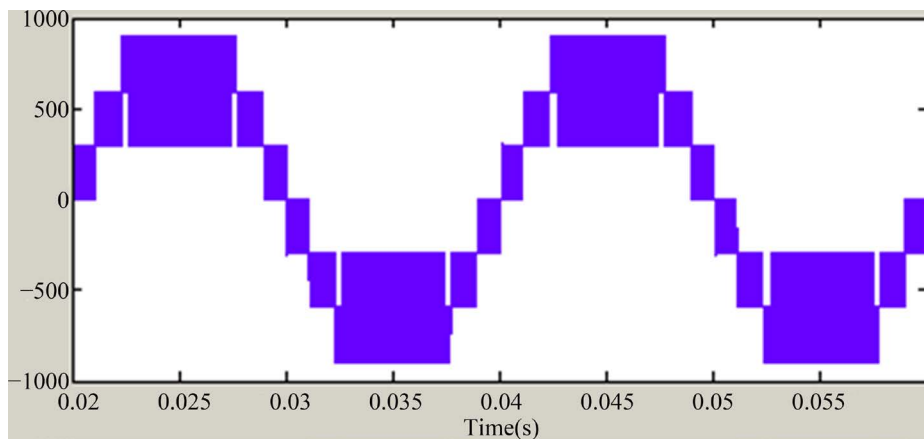


Figure 5. The simulation mode of three cascade H-bridge multilevel converters
图 5. 3 单元级联 H 桥输出电压的仿真波形

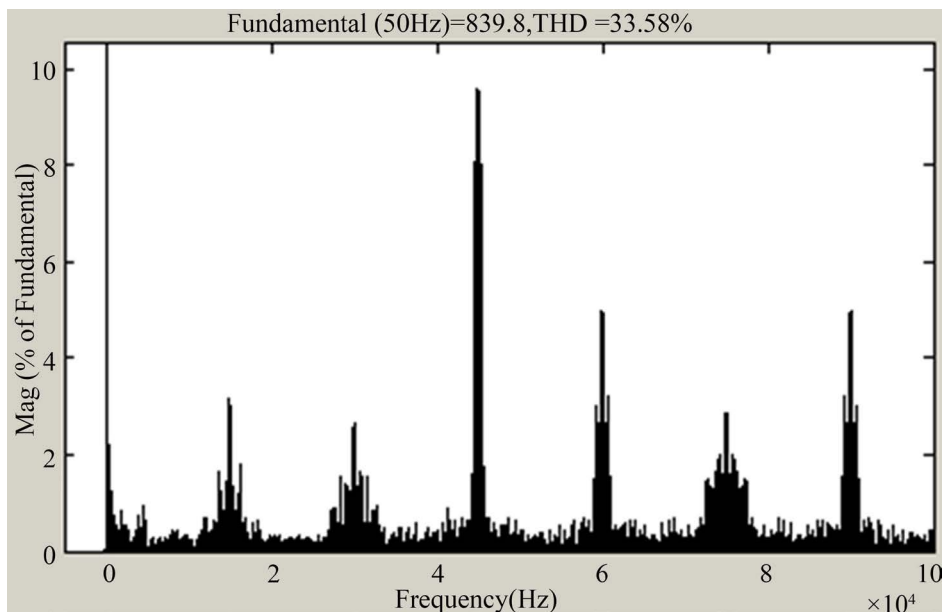


Figure 6. The harmonic distribution of three cascade H-bridge multilevel converters
图 6. 3 单元级联 H 桥输出电压谐波分布

得到的波形是精确无误差的，因此， i_p 、 i_q 检测法优于 p - q 检测法。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & \sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

针对有源滤波器的特性，设计与电网并联的 PWM 逆变器控制系统，此系统检测与控制环节引入瞬时无功功率理论，将其与 PID 控制策略[15]结合，实现并网逆变器的电压、电流双环控制[16]。图 8 为本文基于 i_p - i_q 运算法的三相谐波检测原理框图。

4. 仿真研究

本文利用计算机仿真软件，基于 CPS-SPWM 级联式 H 桥三相五电平变流器的并联 APF 系统进行仿真研究。在仿真中，算法选择为 ode23tb，最大仿真步长设定为 1e-6。为验证 CPS-SPWM 控制策略以及级联 H 桥拓扑结构的可行性，搭建了基于 CPS-SPWM 的级联 H 桥的三相并联型 APF 仿真模型，如图 9。为实现 380 V 三相电网的谐波补偿，达到谐波有效、准确补偿，在仿真我们选用了三个级联 H 桥，参考参数如下：电网为三相对称电压源，线电压为工频电压 380 V，谐波源为三相不可控整流 H 桥外接电阻 R 与电感 L 串联负载，其中 PI 调节器参数为 $K_p = 0.1$ ， $K_i = 0.002$ ， $R = 40 \Omega$ 、 $L = 2 \text{ mH}$ ，并网电感为 0.40 mH，H 全桥逆变器直流侧电压为 150 V，开关频率为 7.5 kHz。

仿真模型如下。

其中，谐波检测算法为蓝色集成系统 Subsystem，分别用基于 p - q 算法和基于 i_p - i_q 的三相瞬时无功算法进行仿真，得到结果是 i_p - i_q 效果更好一些。其仿真结果的主要图形如图 10。

通过仿真结果表明，该 APF 的拓扑结构对谐波及无功电流起到很好的补偿作用，同时也证明 i_p - i_q 谐

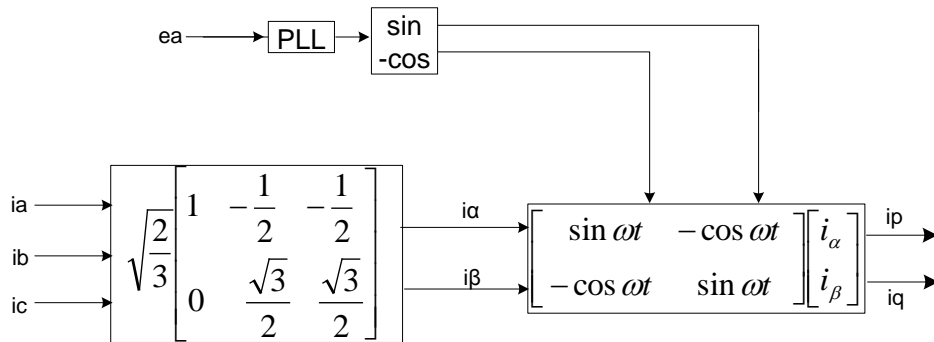


Figure 7. Test block diagram of i_p , i_q theory
图 7. i_p 、 i_q 检测框图

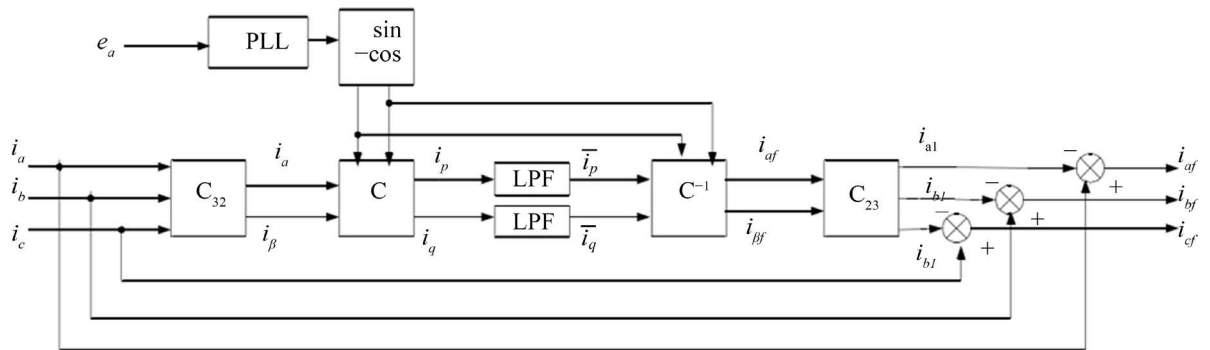


Figure 8. The block diagram of three-phase harmonic detection principle of i_p - i_q theory
图 8. 基于 i_p - i_q 运算法的三相谐波检测原理框图

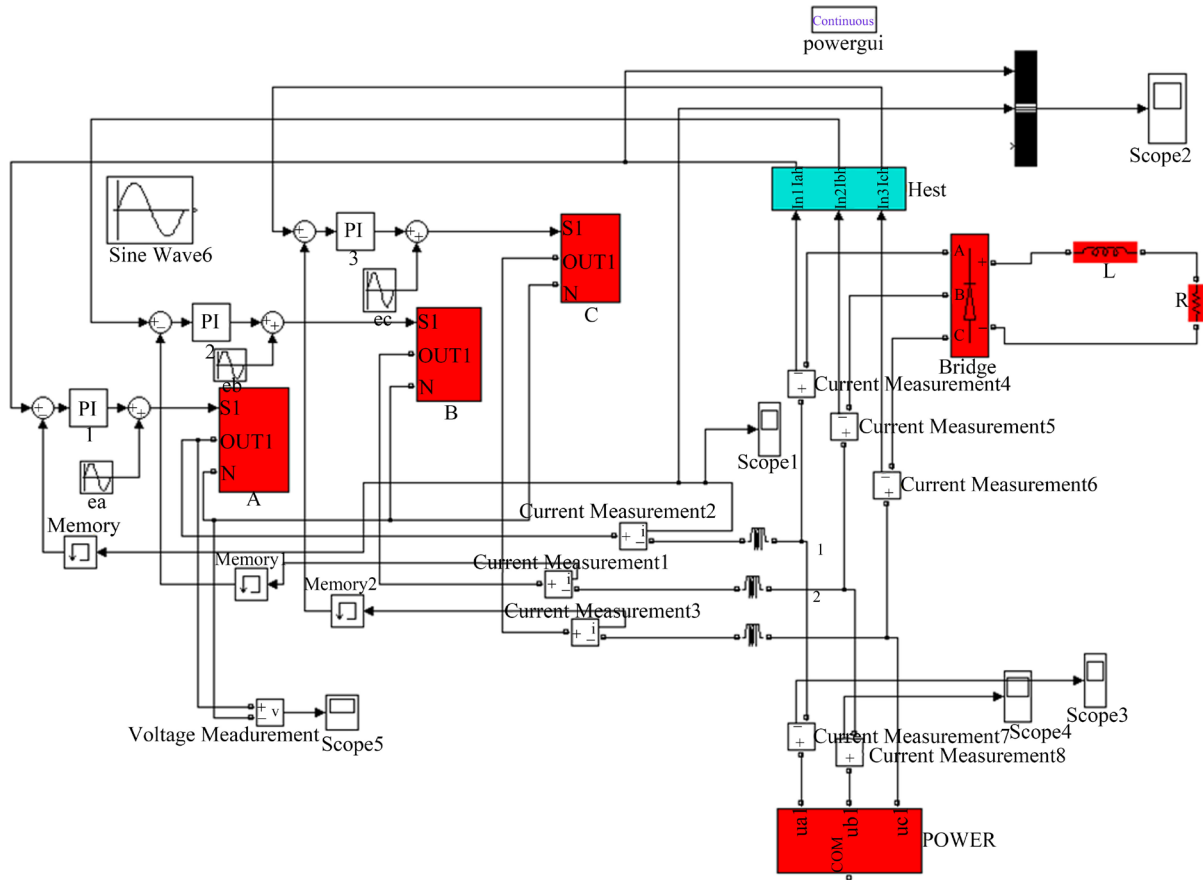
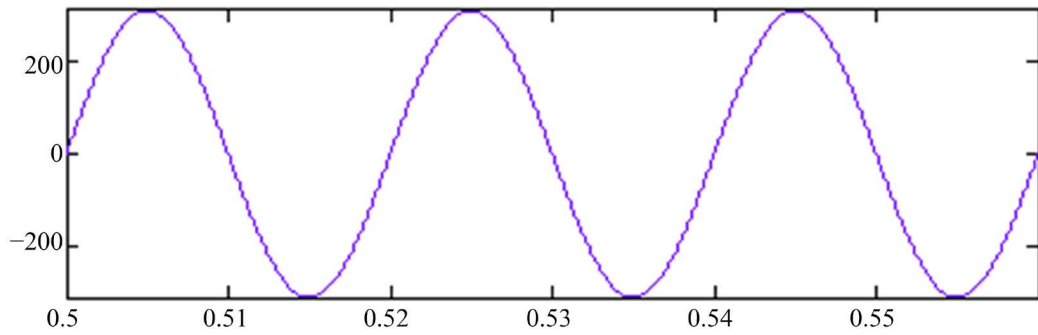
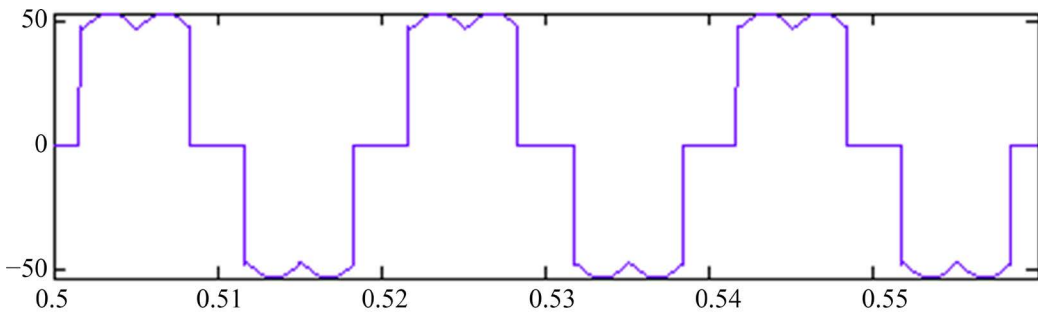


Figure 9. Three-phase APF simulation model
图 9.三相 APF 仿真模型



(a)



(b)

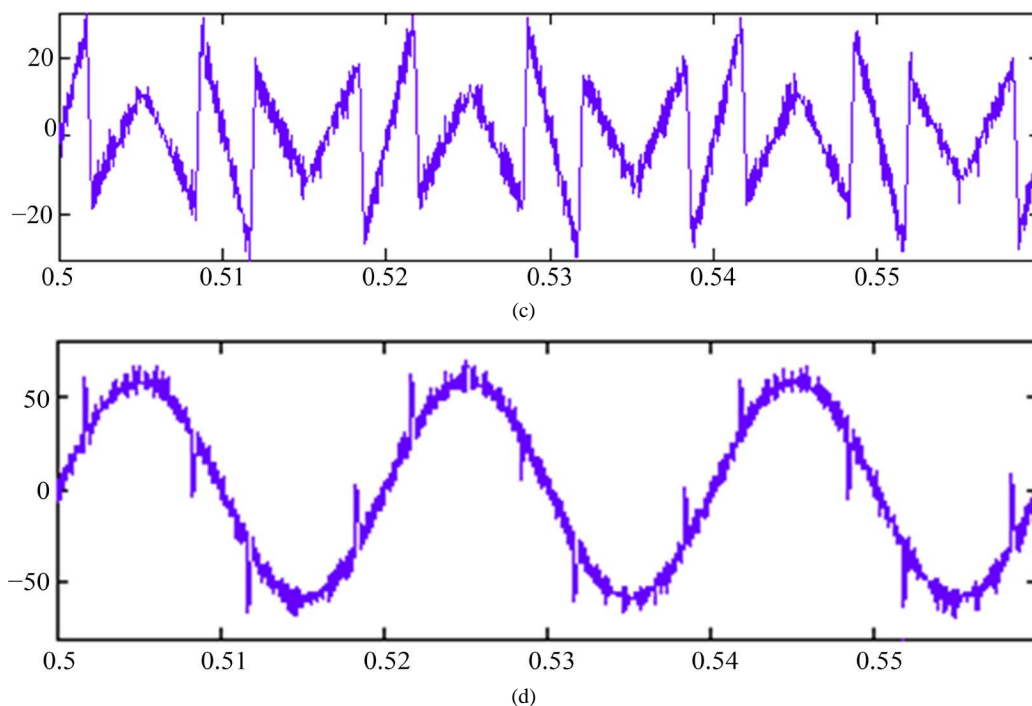


Figure 10. Wave of APF in operation; (a) Voltage wave of power grid; (b) Current wave of power grid; (c) Wave of compensation current from APF; (d) The net side current wave after compensation
图 10. APF 工作波形图; (a) 电网电压波形; (b) 电网电流波形; (c) APF 输出补偿电流波形; (d) 补偿后网侧电流波形

波检测法是一种很好的谐波检测手段，具有实际可行性。从仿真结果得出，网侧电流经过补偿后已经非常近似正弦波形，具有相当显著的补偿效果。通过仿真图发现，网侧电流经补偿后出现的尖刺现象比较明显，出现这一现象因为，电流变化率在负载电流突变处趋于无穷大，从理论角度出发有限的开关频率并不能对该电流变化实现完全追踪，所以造成电流 THD 的变大。通过 MTATLAB 仿真，验证了该控制算法和谐波检测方法的实际可行性，拓扑结构的合理性，对谐波以及无功电流有良好补偿作用，基本满足各项指标。

5. 结论

本文在查阅大量有关技术文献的基础上，分析和总结了 APF 在国内外的的发展状况，并对级联式 H 桥 APF 拓扑结构及控制策略进行了分析，介绍了基于 $i_p - i_q$ 瞬时无功功率理论及无功电流检测方法，同时研究了载波移相调制技术。对级联式 H 桥 APF 进行了仿真，掌握了基本控制方法，也证实了方案的可行性，本文主要研究成果如下：

- 1) 通过对 APF 拓扑结构进行分析，选择了级联式 H 桥 APF 拓扑结构。
- 2) 简要介绍了瞬时无功功率理论及无功电流检测方法，并基于 $i_p - i_q$ 瞬时无功功率理论来进行谐波检测。
- 3) 对级联 H 桥进行详细分析，设计了基于 CPS-SPWM 控制策略，并用 MATLAB 进行了仿真，仿真的结果表明了本文所用各种控制技术的正确性。
- 4) 针对仿真中电压为 380V 的级联 H 桥 APF 进行了仿真分析，验证了控制策略的有效性及其精确性。

本文对级联式 H 桥 APF 的研究取得了较大进展，但工作还不够完善，还需后续工作的跟进，因时间有限，没有做出样机，只是使用软件进行仿真验证，与实际工程中还有差距。

参考文献 (References)

- [1] Khadkikar, V., Chandra, A. and Singh, B.N. (2009) Generalised Single-Phase p-q Theory for Active Power Filtering: Simulation and DSP-Based Experimental Investigation. *IET Power Electronics*, **2**, 67-78.
- [2] Herrera, R.S. and Salmeron, P. (2009) Present Point of View about The Instantaneous Reactive Power Theory. *IET Power Electronics*, **2**, 484-495.
- [3] Huang, S.-J., Sun, C.-H. and Lee, T.-S. (2005) FPGA Realization of Line-Interactive Uninterruptible Power Supply. *The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Vol. 1, 376-379.
- [4] 谢斌. 并联型有源电力滤波器谐波检测及控制技术[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [5] 王立乔. 错时采样空间矢量调制技术研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [6] 孙志勇, 唐杰, 尹进田, 符丹, 周俊. 有源电力滤波器三角波比较方式 SPWM 控制技术研究[J]. 邵阳学院学报, 2010, 7(3): 31-35.
- [7] Kunjumammed, L.P. and Mishra, M.K. (2006) Comparison of Single Phase Shunt Active Filter Algorithms. 2006 *IEEE Power India Conference*, New Delhi.
- [8] 叶明佳. 基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] 朱思国, 欧阳红林, 朱英浩. H 桥级联型逆变器的迭代谐波消除方法[J]. 高压电技术, 2011, 37(2): 318-324.
- [10] Wei, X.L., Dai, K., Fang, X., Geng, P., Luo, F. and Kang, Y. (2006) Parallel Control of Three-Phase Three-Wire Shunt Active Power Filters. *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, 14-16 August 2006, 1-5.
- [11] 王长永, 张仲超. 基于相移 SPWM 技术的级联型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.
- [12] 孙华, 张晓, 李成君, 孔令军. 一种基于改进型电流检测的三电平有源滤波器的控制研究[J]. 电器与能效管理技术, 2011(8): 31-35.
- [13] 贾煜. 三电平逆变器控制策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [14] 杨怀仁, 陈隆道, 赖晓翰. 基于广义瞬时无功功率理论的谐波电流检测[J]. 机电工程, 2014, 31(1): 105-108.
- [15] dos Santos Jr., E.C., Jacobina, C.B. and Maciel, A.M. (2010) Parallel Connection of Two Shunt Active Power Filter with Losses Optimization. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, 21-25 February 2010, 1191-1196.
- [16] 杨仁增, 王海欣, 黄海宏. 基于 TMS320F2812 的载波移相 PWM 发生器的设计[J]. 电气自动化, 2010, 32(6): 22-24.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>