

载波带频率变化的 PWM (VFCB-PWM) 在级联有源电力滤波器中的应用

孙运全, 尹强, 盛吉, 潘文婷

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 分析了级联 H 桥型变换器的工况, 讨论了载波带频率变化的 PWM (VFCB-PWM) 技术, 提出了基于 VFCB-PWM 技术的级联 H 桥型多电平变换器。利用瞬时无功功率理论, 将其应用在并联型有源电力滤波器 (APF) 中。仿真结果表明, 该并联型 APF 系统能够有效地补偿非线性负载引起的谐波和无功电流, 性能良好。

关键词: 电力电子; 载波带频率变化的 PWM (VFCB-PWM); 级联 H 桥型多电平变换器; 有源电力滤波器

Variable-frequency carrier bands PWM (VFCB-PWM) and its applications in shunt APF

SUN Yun-quan, YIN Qiang, SHENG Ji, PAN Wen-ting

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The principle of cascade H-bridge converter is analyzed. Variable-Frequency Carrier Bands PWM (VFCB-PWM) technique is discussed. Cascade H-bridge converter based on VFCB-PWM technique is proposed. Also, it is applied in shunt active power filter (APF) based on instantaneous reactive power theory. It is found in the simulation results that the proposed shunt APF can compensate the harmonic and reactive current validly caused by nonlinear loads, as well as, the performance is well.

Key words: power electronics; variable-frequency carrier bands pulse width modulation (VFCB-PWM); cascade H-bridge converter; APF

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0039-04

0 引言

近年来, 多电平变换器在高压大功率方面成为研究的热点, 是因它可以用低耐压的器件实现高压大功率输出, 无需动态均压电路, 无需变压器; 电平数的增加, 改善了输出电压波形并减少了 EMI。多电平变换器的 PWM 控制技术是多电平变换器研究中一个相当关键的技术, 它与多电平变换器拓扑结构的提出是共生的, 因为它不仅决定多电平逆变器的实现与否, 而且, 对多电平变换器的电压输出波形质量、系统损耗的减少与效率的提高都有直接的影响^[1]。

在多电平变换器控制中, 基于载波的调制方法可分为两类: 移相载波调制和移幅载波调制。消谐波 PWM (Sub-Harmonic PWM, SHPWM) 方法和

开关频率优化 PWM (Switch Frequency Optimal PWM, SFOPWM) 方法是最早提出的多电平变换器载波 PWM 方法, 还有载波相移 PWM (Carrier Phase Shifted PWM, CPSPWM) 方法, 它们目前应用也较为广泛^[2]。近年来, 许多新的 PWM 方法也在不断地涌现, 例如 PODPWM (Phase Opposite Disposition PWM)^[3]、AOPDPWM (Alternative Phase Opposite Disposition PWM)^[4] 等等。其中还有载波带频率变化的 PWM (Variable-Frequency Carrier Bands PWM, VFCB-PWM) 方法。

本文将 VFCB-PWM 调制技术用在级联 H 桥型多电平变换器上, 提出了基于 VFCB-PWM 方法的级联 H 桥型多电平变换器的并联型有源电力滤波器 (APF)。

1 VFCB-PWM 技术在级联 H 桥型变换器上的实现

一般认为, 级联型多电平变换器较早是由

基金项目: 江苏省高校自然科学基金 (06KJB470015); 江苏省工业攻关项目 (BE2007069)

M. Marchesoni 等人在 1988 年的 PESC 会议上提出的, 但是在此后的很多年里, 这种拓扑并没有得到推广应用。直到 1997 年, 级联型拓扑在电机传动和电网中的应用进行了讨论之后, 级联型拓扑才得到了较为广泛的应用^[5]。

以基本的级联 H 桥型五电平变换器为例, 其单相拓扑结构如图 1 所示, 整个系统由两个全桥整流模块级联而成, 每个模块由四个带有反并联二极管的功率开关和一个直流电容构成。1 代表器件开通, 0 代表器件关断。(S₁₁, S₄₁)、(S₃₁, S₂₁)、(S₁₂, S₄₂) 和 (S₃₂, S₂₂) 为四个互补对。假设 V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc}, 每个变换器模块的交流侧可产生三个电压值: V_{dc}、0、-V_{dc}。若 S₁₁ 和 S₂₁ 导通, 则 V_{A0} = V_{dc}。若 S₃₁ 和 S₄₁ 导通, 则 V_{A0} = -V_{dc}。若 S₁₁ 和 S₃₁ 或者 S₄₁ 和 S₂₁ 导通, 则 V_{A0} = 0。整个级联 H 桥变换器交流侧的电压 V_{AN} = V_{A0} + V_{0N}。则输出电压有五个值: -2V_{dc}、-V_{dc}、0V_{dc}、V_{dc}、2V_{dc}。

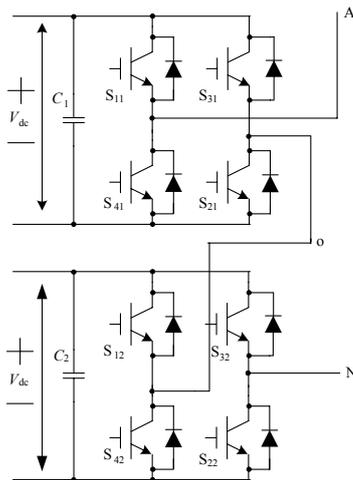


图 1 级联 H 桥型五电平单相电路拓扑
Fig.1 Five-level cascade H-bridge converter

其级联 H 桥型五电平变换器的工作过程可通过输出电压与开关状态之间的关系得到, 如表 1 所示^[3]。

在传统的消谐波 PWM (SHPWM) 方法和开关频率优化 PWM (SFOPWM) 方法中, 上部和下部开关的开关频率要远大于中间开关的开关频率, 为了平衡上部、下部和中间开关的开关频率, Tolbert 提出了载波带频率变化的 PWM (VFCAPWM) 方法, 适当增加中间各开关所对应的载波带的载波频率, 以平衡上部、下部和中间开关的开关频率, 以及平衡开关导通负荷; 在较低的器件开关频率下能实现较高等效开关频率的效果^[3,6]。该方法的原理如图 2 所示。仿真时取上部和下部的 m_f = 9, 中部的 m_f = 15, m_a = 0.8, f_m = 50 Hz。

表 1 级联 H 桥型五电平变换器输出电压与开关状态的关系
Tab.1 Relationship between output voltage and switching status in five-level cascaded H-bridge converter

输出电压	开关状态			
	S ₁₁	S ₃₁	S ₁₂	S ₃₁
2V _{dc}	1	0	1	0
1V _{dc}	1	0	1	1
	1	0	0	0
	1	1	1	0
	0	0	1	0
0V _{dc}	0	0	0	0
	0	0	1	1
	1	1	0	0
	1	1	1	1
	1	0	0	1
	0	1	1	0
-V _{dc}	0	1	1	1
	0	1	0	0
	1	1	0	1
	0	0	0	1
-2V _{dc}	0	1	0	1

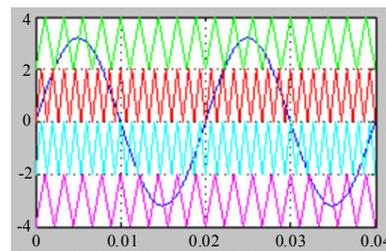


图 2 上部和下部的 m_f = 9, 中部的 m_f = 15, m_a = 0.8, f_m = 50 Hz

Fig.2 m_f = 9 in the upper and the lower, m_f = 15 in the central, m_a = 0.8, f_m = 50 Hz

对图 1 所示级联 H 桥型变换器用图 2 方法进行了仿真分析, 其基波相电压的幅值为 154.3, 输出电压谐波的含量 THD 为 31.84%, 如图 3 所示。

从图 2 中可以了解到上下部与中间的开关频率并不能达到很好的平衡效果, 为了使开关器件能够得到充分的利用以及提高输出基波相电压的幅值和降低谐波含量, 本文采取的方法与上面的方法正好相反, 它是适当增加上部和下部各开关所对应的载波带的载波频率, 来平衡上部、下部和中间开关的开关频率。该方法的原理如图 4 所示。仿真时取上部和下部的 m_f = 15, 中部的 m_f = 9, m_a = 0.8, f_m = 50 Hz。

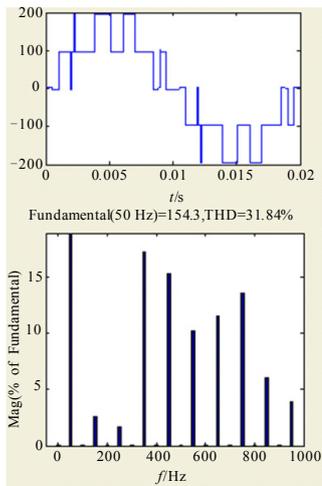


图3 相电压的仿真波形和谐波频谱
Fig.3 Simulation waveform of phase voltage and harmonic spectrum

对图1所示级联H桥型变换器用图4方法进行仿真分析,其基波相电压的幅值为156.5,输出电压谐波的含量THD为30.31%,如图5所示。

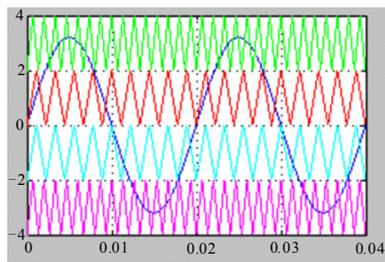


图4 上部和下部的 $m_r = 15$, 中部的 $m_r = 9$, $m_a = 0.8$, $f_m = 50$ Hz

图4 $m_r = 15$ in the upper and the lower, $m_r = 9$ in the central, $m_a = 0.8$, $f_m = 50$ Hz

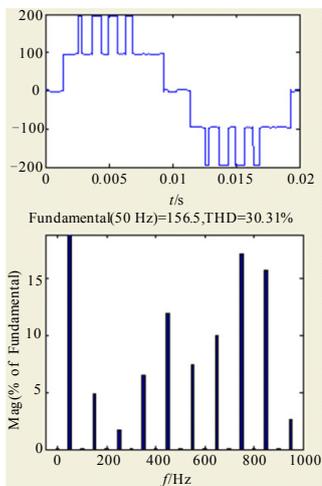


图5 相电压的仿真波形和谐波频谱
Fig.5 Simulation waveform of phase voltage and harmonic spectrum

从上述两种方法的仿真分析可得,本文提出的方法确实提高了输出基波相电压的幅值和降低了谐波含量。因此,可以将基于VFCB-PWM技术的级联H桥型变换器应用到APF场合。

2 基于VFCB-PWM技术级联桥型五电平变换器在并联APF中的应用

并联APF采用基于VFCB-PWM技术的级联H桥型五电平变换器,其电路拓扑如图6所示。实际上,每个H桥型对应1个IGBT-IPM智能模块,级联后直接接入电网与负载并联,电网负载采用不可控整流器。

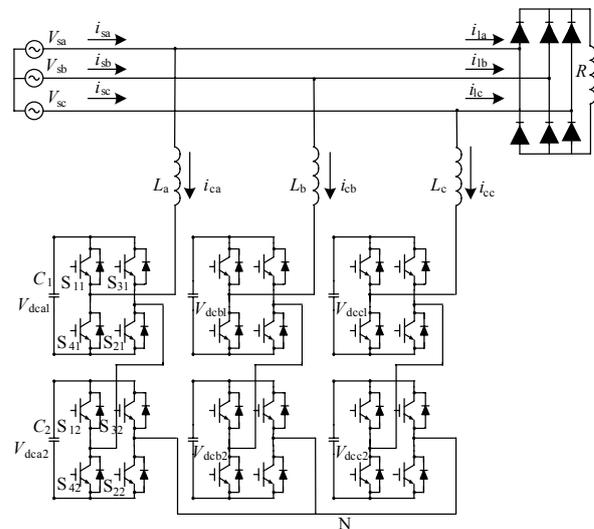


图6 基于级联H桥型五电平变换器的APF
Fig.6 Topology of APF based on five-level cascade H-bridge converter

为使电路能够正常工作,各变流器单元的直流侧电压应该保持均衡,以保证主电路在任何时刻都能跟踪指令电流的变化。同时,为了补偿系统本身的损耗,APF需要从电网吸收少量的有功功率,直流侧采用普通PI控制以实现直流侧的电压均衡。整个系统的控制如图7所示。同时,为了增强检测系统的鲁棒性,本文采用了所提出的基于瞬时无功功率理论的闭环检测电路^[7]。

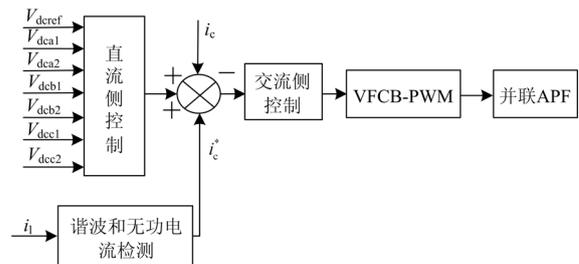
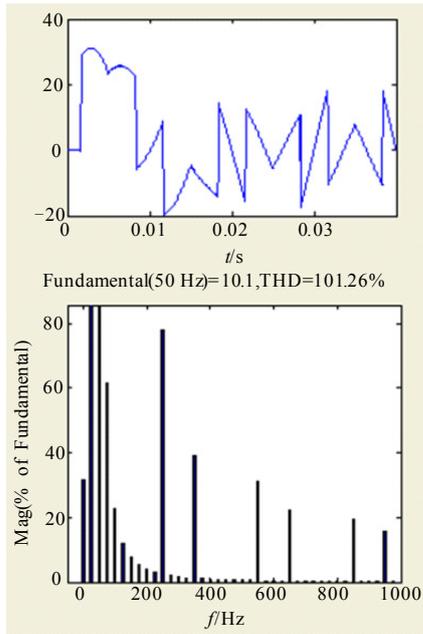


图7 系统控制框图
Fig.7 Overall system control diagram

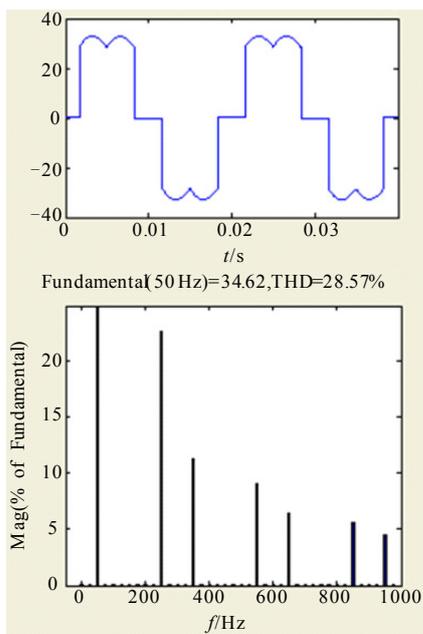
3 仿真与分析

为了验证整套系统的有效性,对基于级联 H 桥型五电平变换器的 APF 进行了仿真验证。系统工作波形如图 8 所示。

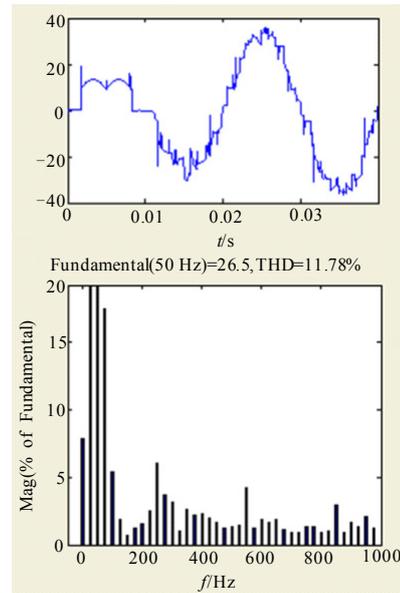
仿真结果表明,在较低的器件开关频率下,APF 系统的补偿效果非常好,这对系统的功率等级具有积极意义。



(a) APF 所发出的电流波形和频谱



(b) 负载电流波形和频谱



(c) 补偿后网侧电流波形和频谱

图 8 仿真波形

Fig.8 Simulation waveform

4 结论

级联 H 桥型多电平变换器能够直接输出高压,具有结构简单、易于模块化实现、直流侧相互独立、容易实现直流侧电压均衡、各单元工作对称、开关负荷平衡等优点。如果采用 VFCB-PWM 技术,级联 H 桥型多电平变换器可以在较低等效开关频率的情况下实现较高等效开关频率的效果,在提高装置容量的同时有效地减小输出谐波,提高整个装置的信号传输带宽。基于上述优点,级联 H 桥型多电平变流器非常适用于大功率 APF。本文对基于级联 H 桥型多电平变流器的并联 APF 系统的直流侧均压控制、谐波和无功电流检测、交流侧控制进行了设计和仿真。仿真结果表明,基于级联 H 桥型多电平变换器的并联 APF 系统可以在较低的开关频率下准确、有效地补偿负载谐波,在大功率应用场合具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 王鸿雁, 陈阿莲, 邓焰, 等. 基于控制自由度组合的多电平逆变器载波 PWM 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (1): 42-48.
 WANG Hong-yan, CHEN A-lian, DENG Yan, et al. Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (1): 131-135.

(下转第 113 页 continued on page 113)

两个主要部分:

1) 对来自本台变压器各相线的数据帧,若发送地址和接收地址属于同一相线则放弃后续处理;若发送地址和接收地址属于同一变压器,但是属于不同的相线,则在本变压器范围内经过本网关所含的电力线调制解调器执行该数据帧转发;若数据帧中的接收地址不在本变压器覆盖范围内,则经过本网关的 Zigbee 模块执行该数据帧转发。

2) 对来自其它电力线载波通信网关的数据帧,若接收地址中的变压器地址不是本变压器地址,则放弃后继处理;否则继续分析其接收地址中的相线地址,并经过相应的电力线调制解调器执行该数据帧转发。

3 结论

基于 Zigbee 无线通信技术的无线—低压载波通信系统工作原理简单,工作过程清晰。已进行的基本通信实验证明,利用该数据通信系统具有工作可靠,维护方便,运行费用低廉的特点,有利于在集中抄表、电力系统供电质量监控和工业自动化控制系统中的应用和推广。

参考文献

- [1] 姚存治,张桂香. 电力载波集中抄表系统的设计与实现[J]. 继电器, 2008, 36(17): 77-79, 83.
YAO Cun-zhi, ZHANG Gui-xiang. Design and Realization of the Collective Meterreading System with Power Lines Carrier[J]. Relay, 2008, 36(17): 77-79, 83.
- [2] 曹弋. 电信设备监控系统的网络通信实现[J]. 微计算

机信息, 2008, 18(38), 89-90.

- CAO Yi. To Supervise and Control Telecommunication Equipments based on Power Line Communication[J]. Microcomputer Information, 2008, 18(38): 89-90.
- [3] 甘勇,王华,常亚军,等. 基于ARM平台的Zigbee网关设计[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 199-201.
GAN Yong, WANG Hua, CHANG Ya-jun, et al. Design of Zigbee Gateway System Based on ARM[J]. Communications Technology, 2009, 42(1): 199-201.
- [4] 魏守包,唐慧强. 基于嵌入式ARM_uClinux的ZigBee网络设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 42(1): 62-64.
WEI Shou-bao, TANG Hui-qiang. Design of ZigBee Network Based on Embedded ARM and uClinux[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009, 42(1): 62-64.
- [5] 张高群. 电力系统应用ZigBee技术初步研究[J]. 电子测量技术, 2008, 26(11): 83-86, 107.
ZHANG Gao-qun. Preliminary Study of Application ZigBee Technology in Electrical Power System[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 26(11): 83-86, 107.

收稿日期: 2009-06-15; 修回日期: 2009-07-07

作者简介:

张尧(1951-),男,副教授,主要从事计算机应用教学和短距离无线通信应用技术的研究工作; E-mail: zhangyao@zzuli.edu.cn

任登峰(1965-),男,讲师,在读博士,主要从事计算机系统模拟、通信系统、软件开发工作;

张安琳(1971-),女,高级实验师,从事计算机网络和控制系统研究。

(上接第 42 页 continued from page 42)

- [2] Tolbert L M, Habetler T G. Novel multilevel inverter carrier-based PWM method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1098-1107.
- [3] WU Bin. 大功率变频器及交流传动[M]. 卫三民,等译.北京:机械工业出版社, 2008.
WU Bin. High-power converters and AC drives[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [4] Carrara G, Gardella S, Marchesoni M, et al. A new multilevel PWM method: A theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 497-505.
- [5] Lai Jih-sheng, et al. Multilevel converters-a new breed of power converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(3): 509-517.
- [6] Wang Hong-yan, Zhao Rong-xiang, Deng Yan, et al. Novel carrier-based PWM methods for multilevel

inverter[C].//industrial electronics society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE. 2003.2777-2782.

- [7] 李建林,李晶,等. CPS-SPWM在级联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 Jian-lin, LI Jing, et al. Carrier phase shifted SPWM and its applications in shunt APF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 64-68.

收稿日期: 2009-07-02; 修回日期: 2009-09-28

作者简介:

孙运全(1969-),男,副教授,博士,主要从事电能质量与控制研究;

尹强(1984-),男,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动。E-mail: yin-l-qiang@163.com