

九电平高压级联逆变器及其 电压移位脉宽调制技术

叶满园, 李 宋, 官二勇

(华东交通大学 电气工程学院, 江西省 南昌市 330013)

Nine-level High Voltage Cascaded H-Bridge Inverter and Its Voltage Shifted Pulse Width Modulation Technology

YE Man-yuan, LI Song, GUAN Er-yong

(Electrical Engineering School, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, China)

ABSTRACT: The topological structure of nine-level cascaded H-bridge (CHB) inverter and its commonly used modulation modes, i.e., phase angle shifted modulation and voltage-shifted modulation, are presented. The voltage shifted modulation technology is researched and a multi-level high voltage CHB inverter is designed. The simulation results of Matlab/Simulink and experiments show that, by using voltage shifted pulse width modulation, the low harmonic distortion and voltage changes of nine-level CHB inverter under low frequency can be obtained and the value of applying CHB inverter in high voltage frequency conversion and flexible AC transmission system (FACTS) is verified.

KEY WORDS: voltage shifted modulation; cascaded H-bridge (CHB); harmonic; distortion; flexible AC transmission system (FACTS)

摘要: 介绍了九电平级联 H 桥逆变器的拓扑结构及其常用的载波调制方式, 即相角移位调制和电压移位调制。分析了电压移位调制技术, 设计了多电平高压级联 H 桥逆变器。Matlab/Simulink 仿真实验结果表明用电压移位脉宽调制技术设计的九电平级联 H 桥逆变器在较低的频率下谐波失真小、电压变化率低、在电力系统高压变频及柔性输配电系统等具有较高的实用价值。

关键词: 电压移位调制; 级联 H 桥(CHB); 谐波; 失真; 柔性输配电系统(FACTS)

0 引言

随着电气传动技术、尤其是变频调速技术的发展, 大容量的高压多电平变频调速技术得到了广泛应用^[1-6]。多电平技术发展至今, 主要有二极管箝位式^[2]、飞跨电容箝位式^[3]、电容箝位式^[3]、级联H桥

式(cascaded H-bridge, CHB)^[4]4种拓扑结构。其中二极管箝位式需要大量的箝位二极管, 飞跨电容式和电容箝位式需要大量的箝位电容, 这些电路都存在直流侧分压电容电压不平衡问题。基于传统二电平低压小容量全桥变换器的CHB逆变器不需要大量箝位二极管和箝位电容、结构简单、技术成熟、易于封装和模块化, 且由于每个结构单元由直流电源单独供电避免了电容电压不平衡的问题。

20世纪80年代至今, 人们提出了许多的多电平变换器脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制技术^[7-17]。这些控制技术主要分三角载波PWM控制技术^[7-9]、特殊谐波消除调制技术(selected harmonic elimination PWM, SHEPWM)^[11-14]和空间电压矢量调制技术(space vector PWM, SVPWM)^[15-17]。文献[7-9]基于载波脉宽调制技术分别介绍了CHB逆变器和二极管箝位多电平逆变器的工作原理, 并给出了详细的仿真结果, 但没有进行具体的实验验证。文献[11-14]重点介绍了多电平逆变器SHEPWM超越方程组的建立和求解过程。文献[10]和[11]分别采用同伦算法和牛顿迭代法求出了准确的脉冲角度, 但仍无法克服多电平逆变器SHEPWM超越方程需要在线计算和实时控制的困难。文献[15-17]的多电平SVPWM控制技术具有高电压利用率、低谐波含量等优点, 但不适于五电平以上的多电平电路。

本文介绍了九电平 CHB 逆变器的拓扑结构和常用载波调制方式, 着重分析了电压移位调制技术, 并通过仿真和实验说明采用电压移位脉宽调制技术设计的九电平级联 H 桥逆变器在较低的频率下谐波失真小、电压变化率低、不需功率器件串联

就能得到很高的工作电压、在电力系统大功率变频和柔性输电系统等具有较高的实用价值。

1 CHB 逆变器的拓扑结构

CHB 逆变器的电路拓扑见图 1。图中九个单相逆变器单元串联。当开关 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 、 S_{13} 、 S_{23} 、 S_{14} 、 S_{24} 同时导通、其它器件关断时，H 桥单元 H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 的输出电压相等且为直流侧电压 U ，九电平 CHB 逆变器的相电压为 $u_{AN}=u_{H1}+u_{H2}+u_{H3}+u_{H4}=4U$ 。依次类推，有针对性地导通和关断相应的器件，即可使 CHB 逆变器的输出相电压具有 9 个电平等级，即 $4U$ 、 $3U$ 、 $2U$ 、 U 、 0 、 $-U$ 、 $-2U$ 、 $-3U$ 和 $-4U$ 。对于通用的 CHB 逆变器，其电平数的计算公式为 $m=2A+1$ ，其中 A 为 CHB 逆变器每相的 H 桥单元数。

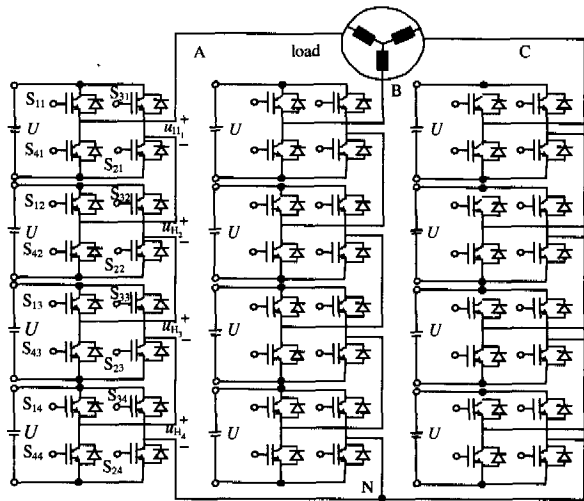


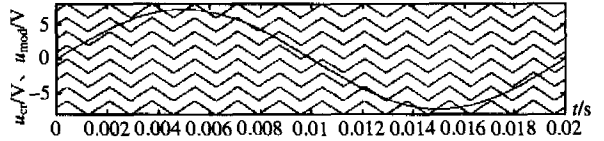
图 1 九电平 CHB 逆变器的拓扑结构

Fig. 1 Topology of the nine-level cascaded H-bridge inverter

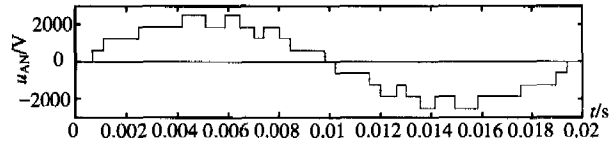
2 电压移位调制技术

按照图 1 的拓扑结构，如果每个级联单元直流侧电压相等，若希望 CHB 逆变器的电平数为 m ，则需要有频率和幅值都相同的 $m-1$ 个载波。这些载波在空间上垂直分布、彼此紧密相连、对称分布于横轴两侧、通过与同一个正弦调制波进行比较产生触发脉冲。

电压移位调制方式^[4]主要分同相位排列 (in-phase disposition, IPD)、反相位排列和交替反相位排列。由于采用 IPD 调制方式得到的线电压谐波畸变率最小、调制效果最好^[4]，故本文着重介绍 IPD 调制方式，其工作原理如图 2(a)所示。图中： u_{mod} 为调制波；载波 u_{cr1} 和 u_{cr1-} 分别与调制波相交产生 S_{11} 和 S_{31} 的门极脉冲信号；载波 u_{cr2} 和 u_{cr2-} 分别与



(a) 载波与调制波调制原理



(b) 相电压波形

图 2 九电平 CHB 逆变器电压移位脉宽调制

Fig.2 Voltage shifted PWM for a nine-level CHB inverter 调制波相交产生 S_{12} 和 S_{32} 的门极脉冲信号，依次类推可以得到其他开关的脉冲信号。由于篇幅有限，本文没有给出每个器件导通和关断的情况。

当频率调制度 $m_f=90$ 、幅值调制度 $m_a=0.9$ 、电源工作频率 $f_m=50\text{Hz}$ 、载波频率 $f_{cr}=600\text{Hz}$ 时，CHB 逆变器的相电压波形见图 2(b)。由图 2(b)可知， u_{AN} 具有 9 个电平等级。

在相位移调制技术中，装置的载波频率相等，但这一关系在 IPD 调制方式中不再适用^[4]。 H_1 、 H_2 中的器件在 1 个调制波周期内只有 2 个脉冲，即开关只切换 2 次，其开关频率为 100Hz 。同理， H_3 、 H_4 中的器件在 1 个调制波周期内仅切换 1 次，其开关频率为 50Hz 。因此对于 IPD 调制的 CHB 逆变器，不同单元内器件的开关频率不同。每个周期内 H_1 中 S_{11} 的导通时间远小于 H_4 中 S_{41} 的导通时间，不同器件的导通时间和开关损耗也不相同。通常电压移位调制逆变器的等效开关频率等于载波频率，即 $f_{vi}=f_{cr}$ ，由此得到的装置各开关器件平均开关频率为 $f_{dev}=f_{cr}(m-1)$ 。

3 仿真研究

为分析九电平 CHB 逆变器采用 IPD 调制时的相电压 u_{AN} 和线电压 u_{AB} 波形及其谐波成分的大小，本文利用 Matlab/Simulink/Powersystem 对九电平 CHB 逆变器进行建模和仿真研究。仿真参数为： $m_f=90$ ； $m_a=0.99$ ； $f_m=50\text{Hz}$ ； $f_{cr}=4500\text{Hz}$ ；单元直流侧电压 $U_d=625\text{V}$ ；装置等效频率 $f_{dev}=562.5\text{Hz}$ 。4500Hz 的载波频率虽然比大功率逆变器的工作频率高很多，但仍在大功率变频器的频率可接受范围之内。

采用 IPD 调制时 CHB 逆变器的仿真波形和频谱分析分别如图 3 和 4 所示。

由图 3 可知， H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 的输出电压都不相同，这表明 H 桥不同单元中的绝缘栅极双极型

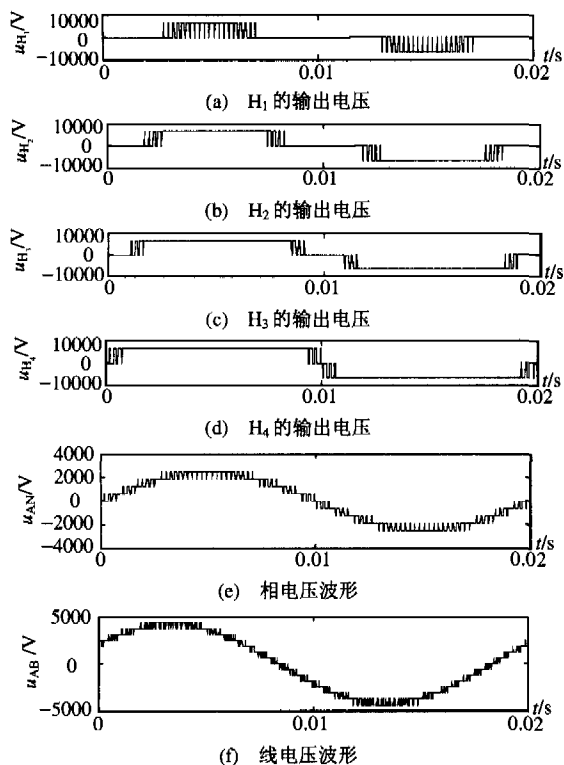


图3 九电平CHB逆变器仿真波形

Fig.3 Simulated waveforms for a nine-level CHB inverter

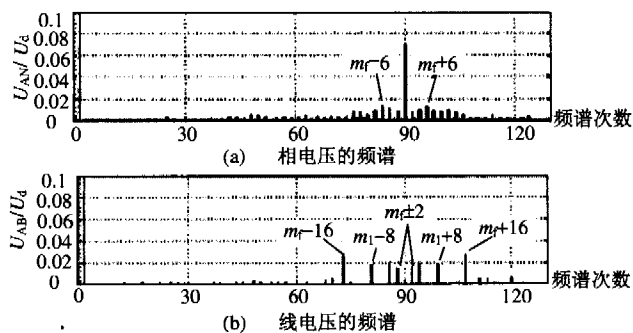


图4 u_{AN} 和 u_{AB} 的频谱

Fig.4 Harmonic spectrums of u_{AN} and u_{AB}

晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的导通频率和导通时间均不相同。由图4可知, u_{AN} 和 u_{AB} 的谐波成分主要集中在 m_f 两侧, u_{AN} 中还含有3的倍数次谐波, 如 m_f 和 $m_f \pm 6$ 次谐波(m_f 为主要谐波)。由于 u_{AB} 中不包含3的倍数次谐波, 所以 u_{AB} 的谐波畸变率为 8.47%, 而 u_{AN} 的谐波畸变率为 14.25%。尽管 u_{AN} 和 u_{AB} 中的低次谐波幅值较小, 但仍然导致 H_2 、 H_3 和 H_4 的输出电压波形出现超调。当 m_a 从大到小变化时, u_{AN} 和 u_{AB} 的输出电压波形会发生明显变化, 其谐波畸变率也随之变大。

4 实验研究

本文以 TI 公司 DSP320LF2407 控制器为平台

对九电平 CHB 逆变器进行实验研究。CHB 实验电路由 IGBT 构成, 其中独立直流电压源由二十四脉冲二极管整流电路提供, 三相脉冲信号由 DSP 微处理器中 PWM 发生器产生, IGBT 由 Emikron 公司的 SKHT 22BS 型驱动模块驱动, 负载为三相星形负载。本节实验参数与第3节相同, 负载三相有功功率为 500W, 负载电感无功功率为 250var, 负载电容无功功率为 0。线电压和相电压的实验波形见图5。负载电流的实验波形见图6。图6中的负载电流的谐波畸变率为 0.241%, 电流波形接近正弦波。

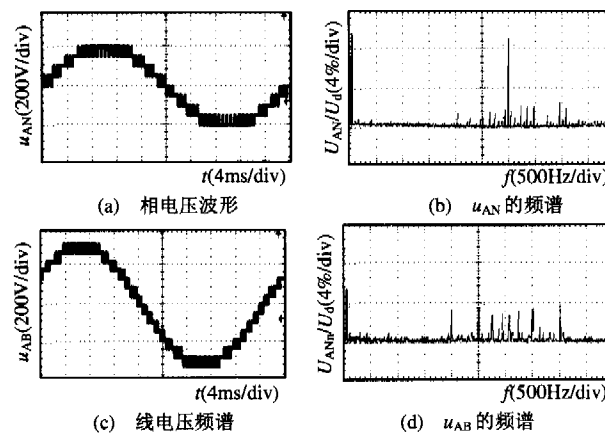


图5 u_{AN} 和 u_{AB} 的实验波形

Fig.5 Experiment waveforms of u_{AN} and u_{AB}

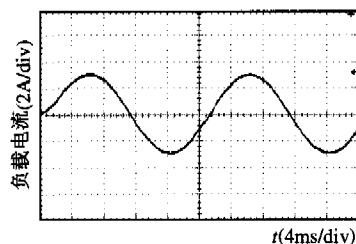


图6 负载电流的实验波形

Fig.6 Experiment of load current

由图5和6可以看出, 本节实验结果和第3节的仿真分析结果一致, 验证了上述分析的正确性。

5 结论

(1) 在多电平逆变器的应用中, 当电平数大于5时, 采用基于三角载波的PWM技术可以更好地控制多电平逆变器、简化控制过程。本文采用电压移位脉宽调制技术设计了九电平级联H桥逆变器, 仿真和实验结果表明该逆变器在较低的频率下具有谐波失真小、电压变化率低的优点, 在电力系统高压变频及柔性输配电系统具有较高的实用价值。

(2) 本文的研究还可推广应用到二极管箝位电

路和飞跨电容电路, 其控制方法与本文基本一致。

参考文献

- [1] Lai Jisheng, Peng Fangzheng. Multilevel converter a new breed of power converter[J]. IEEE Trans. on Ind. Apph., 1996, 32(3): 509-517.
- [2] 王广柱. 二极管箝位式多电平逆变器直流侧电容电压不平衡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 111-117.
Wang Guangzhu. Mechanism of DC bus voltage unbalance in diode-clamped multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 111-117(in Chinese).
- [3] Liang Y Q, Nwankpa C O. A power-line conditioner based on flying-capacitor multilevel voltage-source converter with phase-shift SPWM[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, 36(4): 965-971.
- [4] Wu Bin, Song Pinggang. Comprehensive analysis of multi-megawatt variable frequency drives[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 40-52.
- [5] 唐净, 黄明聪, 韩英铎. 新型五电平逆变器三维 PWM 控制[J]. 2003, 27(8): 36-41.
Tang Jing, Huang Mingcong, Han Yingduo. A novel 3-dimensional PWM control for 5-level inverter[J]. 2003, 27(8): 36-41(in Chinese).
- [6] 高晓冬, 刘波. 基于 H 桥混合型多电平逆变器的研究[J]. 2004, 28(增刊): 1-3.
Gao Xiaodong, Liu Bo. Research on H-bridge hybrid multilevel inverter[J]. 2004, 28(supplement): 1-3(in Chinese).
- [7] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46.
Wu Hongyang, He Xiangning. Simulation research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46.
- [8] 唐净, 黄明聪, 韩英铎. 新型五电平逆变器三维 PWM 控制[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 36-41.
Tang Jing, Huang Mingcong, Han Yingduo. A novel 3-dimensional PWM control for 5-level inverter[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 36-41(in Chinese).
- [9] 谢小荣, 严干贵, 陈远华. 三电平 PWM 变频调速控制系统的 MATLAB 仿真平台[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 18-22.
Xie Xiaorong, Yan Gangui, Chen Yuanhua. Matlab simulation platform for three-level PWM variable frequency speed-governing control system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 18-22(in Chinese).
- [10] 谢运祥, 周炼, 彭宏. 逆变器消谐模型的同伦算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 23-36.
Xie Yunxiang, Zhou Lian, Peng Hong. Homotopy algorithm research of the inverter harmonic elimination on PWM model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 23-36(in Chinese).
- [11] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 102-106.
Fei Wanmin, Lü Zhengyu, Yao Wenxi. Research of selected harmonic elimination PWM technique applicable to multi-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 102-106(in Chinese).
- [12] 谭新元. 牵引逆变器 SHEPWM 控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 47-52.
Tan Xinyuan. Advanced shepwmte chnique for AC uracfiiondrive[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 47-52(in Chinese).
- [13] Li Li, Dariusz Czarkowski, Yaguang Liu, et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters[J]. Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 160-170.
- [14] 武守远, 周孝信. 三电平四重化换流器的应用及输出波形仿真分析[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 59-61.
Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin. Application of four-layer three-level converter and analysis on its outputs[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 59-61(in Chinese).
- [15] 薄保中, 苏彦民, 马学亮. 多电平最优空间矢量 PWM 控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 89-92.
Bo Baozhong, Su Yanmin, Ma Xueliang. Investigation on multilevel optimal space vector PWM control technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 89-92(in Chinese).
- [16] Celanovic N, Boroyevich D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters[A]. IEEE Trans. Industry Applications, 2001, 37(2): 637-641.
- [17] Wei S, Wu B, Li F, et al. A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters[A]. IEEE Applied Power Electronics Conference, 2003: 562-568.

收稿日期: 2006-04-06.

作者简介:

叶满园(1978—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向是电力电子技术及应用, E-mail: yemanyuan@qianlong.com;

李 宋(1977—), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为智能检测技术;

官二勇(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术与电力传动。

(实习编辑 杜宁)

2006 特高压输电技术国际会议 (UHV2006) 将在北京召开

2006 特高压输电技术国际会议 (UHV2006) 将于 2006 年 11 月 27 日至 29 日在中国北京嘉里中心饭店召开。本次会议由国家电网公司主办, 中国电机工程学会、中国机械工业联合会和中国电力企业联合会协办, 中国国家电网公司刘振亚总经理担任会议主席。会议宗旨是加强国际交流与合作, 推进特高压输电技术发展。

会议将在世界范围内邀请大型电力公司、电工制造企业和科研机构的高级管理人员、专家与会, 并将在特高压输电技术的应用与规划、特高压交直流输电系统关键技术及设备制造与试验测试技术等方面开展广泛而深入的交流。这次会议是关于特高压电网规划、设计、建设和科研、制造等方面交流研讨技术成果、发展经验和未来趋势的重要平台, 将促进世界各地与会者在特高压领域的进一步交流与合作, 共同推动世界特高压电网技术研究和工程实践。