

# 基于 MATLAB 的多电平高压变频器的仿真研究

周 凌<sup>1</sup>, 葛照强<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 冶金校区, 湖南 株洲 412000; 2. 上海电器科学研究所, 上海 200063)

**摘要:** 级联式多电平变频器具有输出波形好、谐波含量低、无需滤波器等特点。在介绍级联式多电平变频器工作原理的基础上, 对多载波控制算法进行了分析和研究。为了降低系统的研发成本和加快系统研发进程, 使用 MATLAB 软件进行系统建模与控制算法的仿真。结果表明, 级联式变频器能够有效抑制电压变化率和共模电压, 且谐波含量低。仿真结果与理论分析一致, 验证了 MATLAB 软件应用于多电平变频器系统分析的可行性, 为研究分析级联式变频器提供一条新途径。

**关键词:** 多电平; 多载波; 级联; 仿真

中图分类号: O521

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)04-0064-03

## Research on Simulation of Multilevel High Voltage Frequency Converter Based on MATLAB

Zhou Ling<sup>1</sup>, Ge Zhaoqiang<sup>2</sup>

(1. Metallurgy Campus, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412000, China;

2. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The cells cascaded multilevel frequency converter has many perfect characteristics, such as good output waveform, low harmonic, no filter and so on. The multi-carrier arithmetic is analyzed after the introduction of the multilevel cascaded converter. In order to reduce the cost and accelerate the step of researching, the building of system module and simulating of multi-carrier arithmetic have done by MATLAB software. The results show that this kind of converter can choke back the voltage changing rate and common-mode voltage and the harmonic wave content can also decrease. The results are in accord with theoretical analysis, which proves that it is feasible to use MATLAB software to analyze the system of multilevel converter. And another new way is offered to analyze cells cascaded frequency converter.

**Key words:** multi-level; multi-carrier; cells cascaded; simulation

## 0 引言

多电平变频器在低电压输入的情况下实现高电压的输出, 避免了功率器件的直接串联, 具有输出电压高, 谐波含量少, 功率器件开关频率低等优点。其中级联式多电平变频器(又称单元串联多电平变频器或完美无谐波变频器), 采用若干低压 PWM 功率单元串联的方式来实现直接高压输出, 并采用多载波移相控制策略降低输出电压和电流的变化率, 抑制共模电

压, 并且不必采用输入谐波滤波器和功率因数变换器, 在实际中应用较为广泛<sup>[1-3]</sup>。本文利用 MATLAB 仿真软件对级联式变频器系统和多载波移相控制算法进行了建模仿真, 通过对变频器的仿真研究, 对以后多电平变频器的设计及性能分析有很大的帮助。

## 1 多电平变频器系统结构

5 级功率单元串联的多电平变频器系统拓扑结构

收稿日期: 2008-05-20

作者简介: 周 凌(1982-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学教师, 硕士, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

如图 1 所示。每相均由 5 个功率单元串联组成，输出相电压为 5 个功率单元输出电压的叠加，其中每个功率单元均为普通三相整流桥加 H 桥逆变电路结构。虽然变频器的输出线电压有 6 kV，但每个功率单元所承担的电压不足 1 000 V，所以功率器件可以采用普通的低压器件。

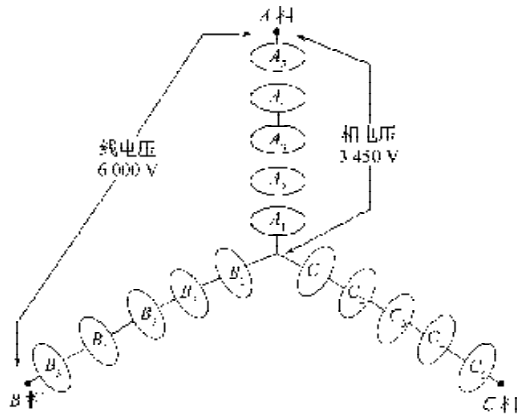


图 1 级联式多电平变频器主电路

Fig. 1 Main circuit of cells cascaded inverters

为了减少输出电压和电流的变化率，抑制共模电压，在控制策略上采用多载波移相控制算法<sup>[4,5]</sup>。其中 A 相的调制原理图如图 2 所示，每个功率单元左右桥臂需用 2 路调制正弦波，两者的幅值相同，但相位相反，这样可以提高整个系统的等效载波比，减少输出电压的低次谐波成分。5 级功率单元串联输出时需用 5 路三角载波，各路三角载波的形状相同，但相位不同，其中每级功率单元对应同一路三角载波。这样就可以大大降低输出相电压的变化率，且共模电压主要集中在 1/3 直流母线电压内，远小于传统结构的高压变频器。对于 B、C 两相控制不同的仅是调制正弦波的相位，而各路三角载波相同。

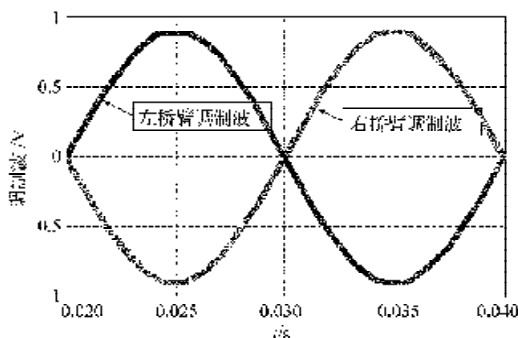


图 2 多载波移相控制原理图

Fig. 2 Multi-carrier phase-shift control schematics

当 N 级功率单元串联时，共需要 3 对正弦调制波和 N 路移相大小为  $1/N$  的三角载波 ( $T_s$  为三角波的周期)，输出相电压的等级数为  $2N+1$ ，线电压等级数将达  $4N+1$ 。输出电压等级数较多，输出电压的谐波成分远少于传

统的两电平或三电平结构的变频器。由于采用了多载波的移相控制，同时各个三角载波的载波频率较低，这样有效地降低了功率器件的开关损耗。

## 2 系统建模仿真

为了对多电平变频器系统的结构特点和多载波移相控制算法的性能进行深入研究，使用 MATLAB 软件内部的 SIMULINK 工具对多电平变频器系统进行建模仿真<sup>[6]</sup>。对于变频器的主电路，采用 SIMULINK/SimPowerSystems 内的功率单元模块串联构成，如图 3 所示。

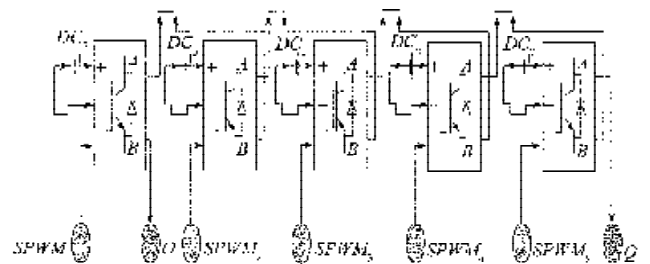


图 3 主电路仿真图

Fig. 3 Main circuit simulation map

采用独立的直流电源为每个单元供电，各个功率单元依次串接在一起。每个功率单元的 SPWM 驱动信号来自外部模块，端口 Q 和端口 O 为该相输出端。

多电平变频器系统仿真中关键部分是设置多路移相三角载波。MATLAB 软件内部自带的三角波模块生成的三角波为锯齿状，不能满足要求<sup>[7]</sup>。本仿真系统通过积分模块和延迟模块相互串接的方式生成对称的、周期可自由调节的三角载波。其中积分模块的输出为延迟模块的输入，延迟模块的输出为积分模块的输入。延迟模块的输出值分别为  $4f$  和  $-4f$  (其中  $f$  为三角载波的频率)，转换时刻值分别为  $-1$  和  $1$ 。当积分模块的输出增加到  $1$  时，延迟模块输出值由  $4f$  反转为  $-4f$ ，积分模块输出开始减少；当积分模块输出为  $-1$  时，延迟模块输出又变为  $4f$ ，于是积分模块输出开始增加。在积分模块的输出就得到 1 个对称的三角波，通过设置积分模块的初始值，就可以实现三角波相位的移动，波形如图 2 所示。

在完成多路移相三角载波设计工作后，可以使用 MATLAB 内部的比较模块和正弦函数模块生成 SPWM 驱动波，并将该部分封装在 1 个模块内。整个多电平变频器系统如图 4 所示。运行频率  $F_{ref}$  和调制  $M$  由外部给定，模块 SPWM\_A、SPWM\_B 和 SPWM\_C 分别生成 A、B 和 C 相的 SPWM 驱动信号，THD 模块计算输出电压和电流的 THD 值，FFT 模块进行信号的频谱分析。

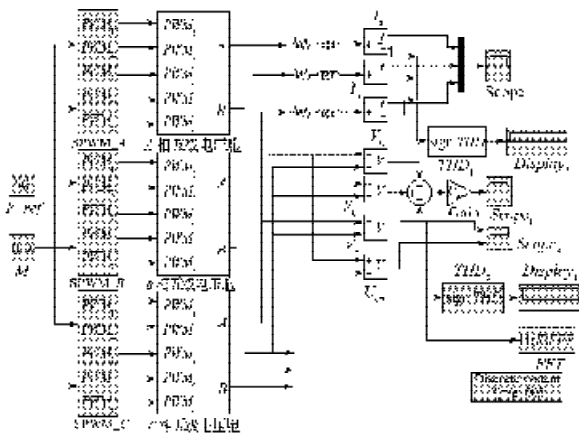


图4 系统仿真图

Fig. 4 System simulation map

### 4 仿真结果

仿真参数设置为：系统STEP为1E-5S；正弦调制波的周期为50Hz；调制比 $M=0.9$ ；三角载波的周期为600Hz；直流母线电压值为900V；负载由电阻和电感构成，其中电阻取为100Ω，电感大小为50mH。

级联式多电平变频器的输出电压和电流波形如图5所示。其中图5a)为相电压的波形，电压等级为11级；图5b)为线电压波形，电压等级为21级。这些结果与理论分析一致，从图中可以看出输出波形较好，更接近于正弦波。共模电压的波形如图5c)所示，幅值主要集中在±300V，幅值较低，对电机运行影响较小。输出电流的波形如图5d)所示，三相电流波形近似为标准的正弦波，且三相对称，波形较好，电流的THD值仅有0.56%。

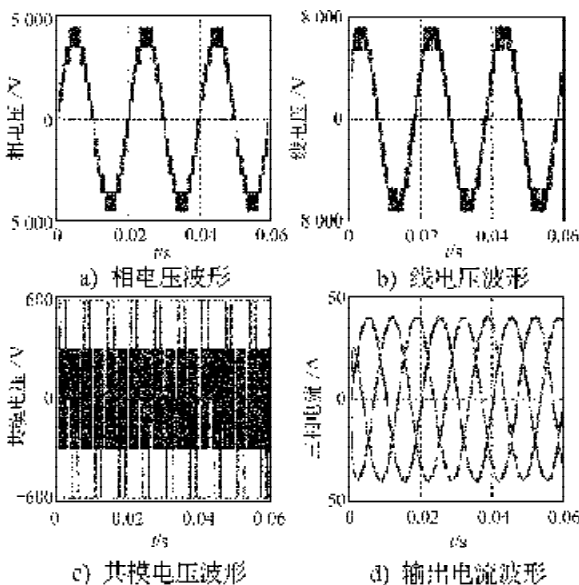


图5 输出电压和电流波形

Fig. 5 Output voltage and current waveforms

图6为相电压的频谱图，谐波主要集中在100次谐波附近，且各次谐波的幅值较小，对变频器系统影响较小。

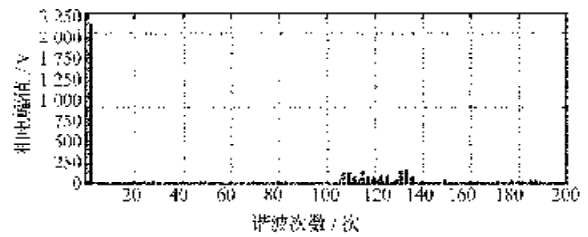


图6 相电压的频谱图

Fig. 6 Shift voltage of the frequency spectrum

### 5 结论

本文通过MATLAB软件对级联式多电平变频器系统进行了仿真分析，从仿真结果中可以看出，级联式多电平变频器能够通过功率模块的简单串联实现高压输出，但其自身所承受电压低，且能够有效抑制输出电压和电流变化率，减少共模电压等。这些特性与理论分析一致，从而表明利用MATLAB软件能够准确、快速地对多电平变频器系统进行分析，为级联式变频器的分析和研究提供了另一条更简便的途径。

#### 参考文献

- [1] Donald Grahon Holmes, Brendan PmoGrath. Opportunities for Harmonic Cancellation with Carrier-Based PWM for Two-Level and Multilevel Cascaded Inverter[J]. IEEE Trans. Ind. Applications, 2001, 37(2): 574-582.
- [2] Madhay Manjrekar, Peter K steamer, Thomas A Lipo. Hybrid Multilevel power conversion System: A complete solution for High-power Application[J]. IEEE Trans on Ind Appl. 2000, 36(3): 834-841.
- [3] 薄保中, 刘卫国, 罗兵, 等. 多电平变频器PWM控制方法的研究[J]. 电气传动, 2005, 35(2): 41-45.
- [4] 丘东元, 张波, 潘虹. 级联型多电平变换器一般构成方式及原则研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 24-29.
- [5] 周京华, 杨振, 苏彦民. 多电平逆变器多载波PWM调制策略的研究[J]. 电气传动, 2005, 35(1): 23-27.
- [6] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(责任编辑: 罗立宇)