

文章编号: 1005-0523(2005)01-0081-05

单元串联多电平高压变频器的仿真建模

章勇高

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 阐述了单元串联多电平移相式 PWM 电压源型变频器原理, 介绍了多电平变频器的仿真建模过程, 说明了脉冲模块、一个单元模块、单相模块和三相变频拖动系统的封装以及参数意义和参数设置, 对于新型电力电子装置的开发和研究具有一定的参考价值. 证明了单元串联多电平高压变频器谐波污染小, 输入功率因数高, 输出的波形好, 不必采用输入谐波滤波器和功率因数补偿装置, 从而为生产实践提供有意义的指导, 对于高压变频器的国产化具有重大的现实意义.

关键词: 单元串联多电平; 高压变频器; 仿真; 建模

中图分类号: TM392.3

文献标识码: A

1 概述

高压变频器是实现高压电动机无级调速, 满足生产工艺过程对电动机调速控制要求的专用电器, 它的广泛应用对于提高产品的数量和质量, 节约能源, 降低成本有着重要的意义^{[1][2]}. 500kW 以下的 IGBT 变频器技术比较成熟, 但在大功率高频高压领域, 由于电压高, 单 IGBT 器件无法满足耐压要求. 一些国外大公司努力采用串联技术, 即将多个 IGBT 串联以满足电动机的高压要求. 这样系统中就必须有“均压技术”, 但由于器件本身的特性决定了“均压技术”很难解决, 阻碍了高中压大功率 IGBT 变频器的发展. 后来出现了一种多电平的电路结构, 它可以避免“均压技术”, 解决高压大功率问题. 对于多电平结构, 只要低压变频器技术过关, 高压变频器同样可以实现. 这一突破性进展, 给电气传动带来了一个突破点, 打破了多年以来在大功率变频器领域缓慢推进的局面.

仿真研究可以简化新型装置的结构, 而且可以缩短开发成本, 是科学研究的必备过程. 本文利用

仿真工具 MATLAB 对 6KV 的高压变频器进行仿真研究, 介绍了多电平变频器的仿真建模过程, 说明了变频器中脉冲模块、一个单元模块、单相模块和三相变频拖动系统的封装以及参数意义和参数设置. 对多电平变频器建模方法和技巧的介绍对于新型电力电子装置的开发和研究具有一定的参考价值. 仿真结果同时说明了高压变频器对电网污染小, 输入功率因数高, 不必采用输入谐波滤波器和功率因数补偿装置, 从而为生产实践提供有意义的指导, 对于高压变频器的国产化具有重大的现实意义.

2 原理介绍

单元串联多电平变频器采用若干个低压功率单元串联来实现直接高压输出. 对于额定输出电压为 6 千伏的变频器, 每相由五个额定电压为 690 伏的功率单元串联而成, 输出相电压最高可达 3 450 伏, 线电压可达 6 千伏左右. 这种采取单元串联的方式来实现高压输出, 不存在器件串联引起的均压问题^{[3][4]}. 其主电路拓扑结构如图 1 所示. 变压器具有

收稿日期: 2004-03-18

基金项目: 华东交通大学科研基金资助项目.

作者简介: 章勇高(1975-), 男, 江西临川人, 硕士, 讲师.

15个二次绕组,采用沿边三角形连接,分为5个不同的相位组.对于三相全控桥式整流电路来说,其脉波之间相差60度的电角度.每个相位组应互差12度的电角度,从而形成30脉波的二极管整流电路.第一单元超前 24° ,第二单元超前 12° ,第三单元没有相移,第四单元滞后 12° ,第五单元滞后 24° .这样的电路输入电流中仅含 $30K \pm 1$ 次谐波,所以理论上30脉波的整流电路可以将29次以下的谐波都消除,提高输入的功率因数,总的谐波电流失真可低于1%.

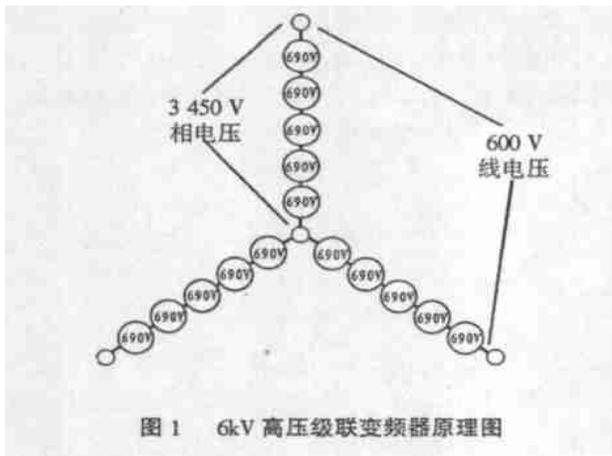


图1 6kV高压级联变频器原理图

3 仿真研究

仿真的基本思想是利用物理或数学的模型来类比模拟现实过程,以寻求过程和规律.MATLAB是Math works公司推出的当今国际上最流行的软件之一,提供了众多的工具箱,其中Simulink是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的重要工具箱,提供了丰富的模型库,更为可贵的是它的开放性,用户可以开发自己的模型,并通过封装后添加到模型库中,以后就如同使用自身提供的模型库一样直接调用即可^[5].PSB是针对电力系统和电力电子装置的专用仿真工具,可以分析研究交流电机和调速系统以及电力电子装置,能够实现高效开发系统的目的,而且可以完成实际情况难以实现的研究^{[6][7]}.本文介绍了60kV,500kW变频器的模型建立过程和相应的建模技巧,为其它新型电力电子装置的开发和研究提供参考价值,并对变频器的运行特性进行了仿真研究,说明该变频器输入功率因数高,对于高压变频器的国产化具有重大的现实意义.

3.1 脉冲模块的建立

PWM脉冲模型如图2所示,第一个比较器的两个输入端为正弦波和三角波,当正弦波的幅值大于或等于三角波的幅值时输出为1,否则为0,输出后的脉冲波形即为1号控制开关的控制脉冲pulse1.2号开关的控制脉冲与1号开关相反,将比较器输出的信号经过Boolean logic signals数据类型转换模块后转换为Boolean型,再通过逻辑操作模块Logical Operator进行取反运算,作为2号控制开关的控制脉冲pulse2.根据PWM脉冲调制的原理,3号控制开关的控制脉冲由反向的三角波与正弦波比较产生.从第二个比较器可以看到,其输入信号中的三角波经过了一1的增益模块反向,正弦波与第一个比较器为同一个信号.与第一个比较器相似,第二个比较器输出的信号为3号控制开关的控制脉冲pulse3,pulse3取反后pulse4作为4号控制开关的控制脉冲.

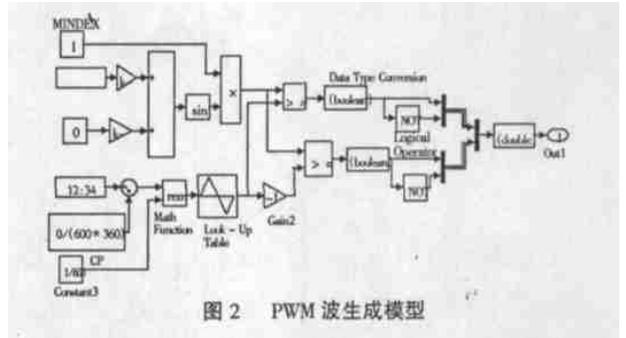


图2 PWM波生成模型

值得注意的是,控制开关的控制信号为double型,而从比较器产生的信号经过了Data Type Conversion模块后已经变为Boolean型,因此最后还需要加一个Data Type Conversion转换模块将控制脉冲最终转换为控制开关所需要的double型.在脉冲输出的过程中用到了Mux模块,其作用是将产生的4路脉冲以向量或总线的形式输出,因此6脉桥逆变模块的控制端输入为向量形式.对图所示的脉冲发生模块进行封装参数的含义如下:CF——三角载波频率;CP——三角载波相位;Phase——参考正弦波相位;Freq——参考波频率,即变频器的输出频率;MIndex——调制比,即正弦波与三角波的峰值之比.

3.2 单个功率单元的仿真

功率单元是单元串联多电平变频器的基本组成单位,本节对一个功率单元(以A相的第一位置为例)进行仿真建模,介绍对单个功率模块的封装,说明单个功率单元的组成及其输出波形.如图为单个功率单元的仿真模型,其模块组成从左到右依次为三相交流电源、变压器、三相整流桥、直流母线滤波电容和均压电阻、逆变桥、控制脉冲发生模块.其

中脉冲模块使用上节封装的 mypulse 模块,其它的采用 Simulink 模块库中的模块.

在封装功率单元前,先将三相交流电源、变压器和三相整流模块封装为整流模块(rectifier 模块),三个滤波电容和分压电阻封装为一个滤波模块(filter 模块).phi 为三相电压源 A 相的初始相位,三相电压源的内阻为 Rs、Ls,当 Rs=0,Ls=0 时为理想电压源.filter 模块是由三个串联支路构成,每个串联支路由一个电阻(R)和一个电容(C)并联而成.

封装后的模块名称为 cell,可改变载波相位和参考波相位以及调制比,分别为 cp、pha 和 modul.当构成一相电路时,改变 cp,而 pha 不变,实现触发脉冲的移位,不同相的 cell 模块 pha 的值应该错位,modul 是参考正弦波与三角载波的幅值比,即为调制比,调节变频器的输出电压幅值.

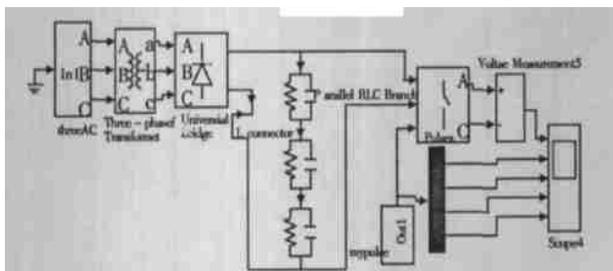


图 3 单个功率单元的仿真模型

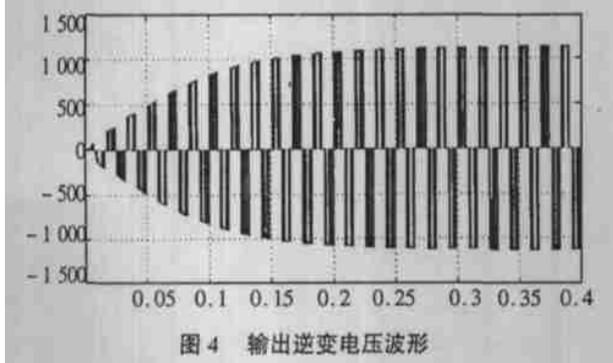


图 4 输出逆变电压波形

3.3 单相仿真

6kV 高压变频器的一相是由五个功率单元直接串联实现高压输出,同一相各串联功率单元的三角载波信号错开 72 度,参考正弦波相同,仿真模型如图 5 所示,参数如下:pha = phi = 0°, modul = 1, cell 中 cp = -72 * 0°, cell1 中 cp = -72 * 1°, cell2 中 cp = -72 * 2°, cell3 中 cp = -72 * 3°, cell4 中 cp = -72 * 4°,从而实现 72°的移相.单相输出电压具有 11 个电平,输出电压接近正弦波,减少输出谐波.

3.4 不带电动机的变频器仿真

变频器三相仿真时将 U、V、W 三相的参考波依次移相 120°后连接而成的,如图 7 所示,其中 phase、

phase1、phase2 是变频器的三相,设置参考正弦波的初始相位分别为 0°、-120°和 120°.封装仿真模型,设置三个参数电压上升时间(TON)、变频器输出频率(FREQ),直流母线电压(V)·V/F = 常数,变频器的输出频率改变时,输出电压的幅值也将相应的发生变化.

运行仿真模型,在不改变输出电压频率的情况下,即 FREQ = 60 Hz, TON = 0.02 s, V = 1 100 V 时,得其线电压波形如图 8 所示.其线电压共有 21 个阶梯,正弦度比相电压更好,谐波含量非常低.

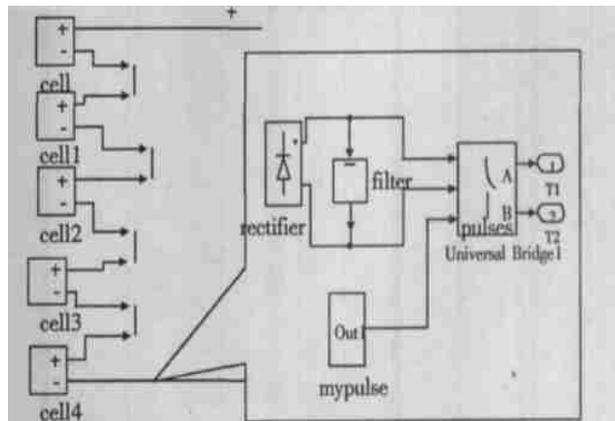


图 5 单相仿真模型

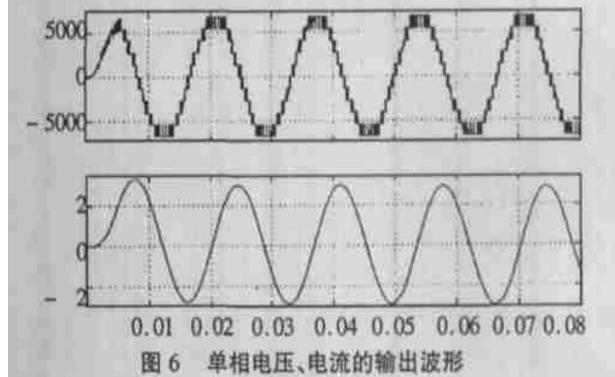


图 6 单相电压、电流的输出波形

3.5 带有电动机的变频器仿真

高压变频器采用 V/F = 常数的控制方式,需要对变频器进行调压调频仿真,设置变频器的最大输出频率,为了更好的观察变频器在不同频率下的输出情况,设置频率上升时间为 0.2 s,仿真模型如图 7 所示.

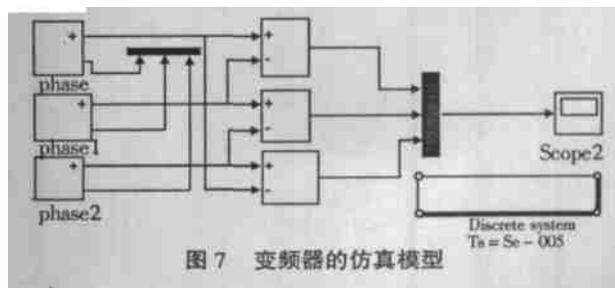


图 7 变频器的仿真模型

值得一提的是, Simulink 中异步电动机模块所接受的频率是固定的, 为了能够实现变频调速仿真, 要将电动机模型做一定的修改, 使其接受的频率是可变的. 电动机的各项参数由测量模块 (Machines Measurement Demux) 测量后输出到示波器. 本模型中还用到了一个独立的 Discrete system 模块, 它的主要作用使系统离散化, 在电力电子系统中用通常的变步长积分器计算速度非常缓慢, 加了 Discrete system 模块后, 将以 T_s 为周期对系统进行采样, 只要 T_s 的值取得比较合适, 就会在不影响系统仿真结果的前提下大大的缩短仿真时间. 在该模型中 $T_s = 5 \times 10^{-5} s$. 上述仿真模型的参数设置如下: Ramp 模块, 斜率 $Slop = 60/3$ (上升时间为 3s, 最大频率 60 Hz); Constant 模块设置电压补偿, 常数值 = 0.15 (开始电压 900 V); 异步电动机模块, 额定功率 $P_n = 500 e3 VA$, 线电压 $V_n = 6\ 000 V$, 频率 $f_n = 60 Hz$, 定子参数 $R_s = 1.95 \Omega$, $X_{Ls} = 3.15 \Omega$, 转子参数 $R_r' = 3 \Omega$, $X_{Lr}' = 6 \Omega$, 互感电感 $X_{Lm} = 288 \Omega$, 转动惯量 $J = 48.473 kg \cdot m^2$, 初始条件设置为转速为零、电流为零, 给定机械转矩 2 000 Nm.

输出电压波形如图 10 所示, 由图可以清楚地看出电平的变化过程, 但是它们的平均值还是符合直线上升规律的.

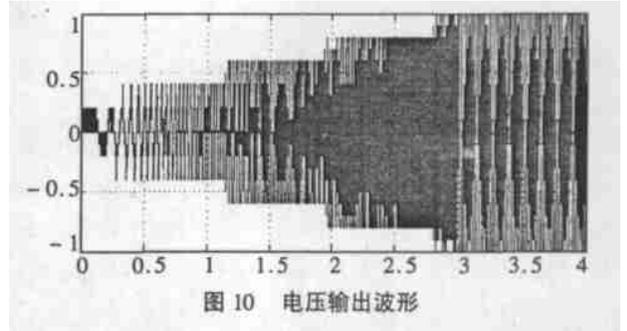


图 10 电压输出波形

本文论述了 5 000 kW 6 kV 高压变频器的仿真过程, 对一些仿真技巧作了详细的介绍. 首先论述了 PWM 脉冲的仿真过程, 通过调节脉冲模型中参考正弦波的频率和三角波正弦波的调制比来改变变频器的输出电压和频率, 接着介绍单个单元、一相和三相不带电动机的仿真模型及其仿真结果, 结果表明该变频器输出的线电压波形由 21 个电平组成, 接近正弦波, 且电压谐波次数高, 含量非常低, 很好的解决了其它类型高压变频器普遍存在的谐波问题, 简化了输出和输入滤波器的设计, 为生产实践提供有意义的指导, 对于高压变频器的国产化具有重大的现实意义. 由于篇幅有限, 本文没有对以下两个问题进行论述和仿真: 一是直流侧滤波电容的大小对于高压变频器运行的影响; 二是高压变频器拖动电动机的运行特性分析.

参考文献:

[1] 韩安荣. 通用变频器及其应用 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[2] 许明堂. 大力发展我国 HVF 高压变频器的产业化进程, 变频器世界 [J]. 2001(1): 3.

[3] Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, Multilevel Converter-A New Breed of Power Converters, IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 32 No. 3 pp 509-517, 1996.

[4] Nikolaus P. Schibli et al. A Three-Phase Multilevel Converter for High-Power Induction Motors pp 978-985 APEC '98

[5] 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.

[6] 丁刚, 韩曾晋. 基于 SIMULINK 的交流传动系统仿真 [J]. 电气传动, 2002(3): 56-59.

[7] TEQSIM International Inc. Power System Blockset User's Guide. 1998.

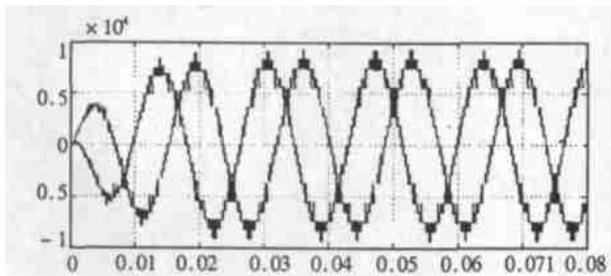


图 8 不带电动机的仿真曲线

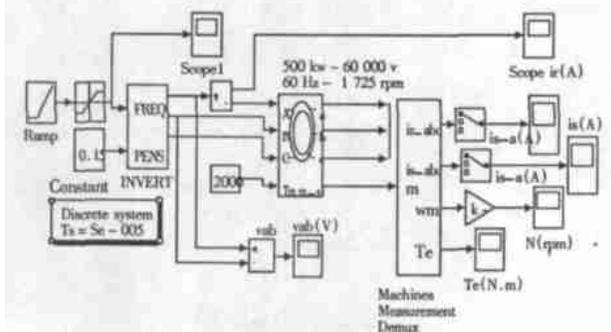


图 9 带有电动机的仿真模型

4 结果分析

Modeling and Simulation of the Cell Series Multi-level High Voltage Frequency Converter

ZHANG Yong-gao

(School of Electric and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper introduces the basic principle of cell series multi-level high voltage frequency converter, recommends the process of simulating and model constructing for multi-level converter, discusses the setting of the parameter for multi-pulse block, one-unit block, single-phase block and three-phase converter system. It has great value for the development and research of novel power electric devices. The results of simulation show that the cell series multi-level converter has great advantage on eliminating harmony. It is helpful to nationalization of high voltage converter.

Key words: cell series multi-level; high voltage frequency converter; simulation; model constructing

(上接第 62 页)

Design 8-PSK to Modulate Based on FPGA

ZHU Lu

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper introduces DDS principle and describes VHDL based on FPGA method to realize directly 8-PSK modulator; The method solves the phase fuzzy problem of 8-PSK modulation of the traditional method and improves the phase modulation precision.

Key words: DDS; MPSK; FPGA