

三电平逆变器控制方式性能比较*

李 山¹, 刘述喜¹, 王明渝², 贺晓蓉¹

(1. 重庆工学院 电子信息与自动化学院, 重庆 400050; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:介绍了二极管钳位式三电平逆变器电路拓扑及控制策略, 在 Matlab/Simulink 下进行建模与仿真, 通过比较三电平逆变器输出电压和输出电流及其谐波特性, 分析了同相层叠载波控制方式和反相层叠载波控制方式的优缺点, 为以后进一步研究打下基础.

关键词:三电平逆变器, 控制策略, 建模与仿真

中图分类号: TM343

文献标识码: A

文章编号: 1671-0924(2008)11-0115-05

Comparative Analysis of Control Methods for Three-level Inverter

LI Shan¹, LIU Shu-xi¹, WANG Ming-yu², HE Xiao-rong¹

(1. School of Electronic Information and Automation, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China;

2. The College of Electrical Engineering, University of Chongqing, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper introduces the method of modeling and simulating diode clamped three-level inverter (DCTLI) and its control strategies under the environment of MATLAB/SIMULINK. By comparing the output voltage and output current of the three-level inverter and their harmonic characteristic, a comparative analysis is performed between the advantages and disadvantages of the phase carrier disposition control method and phase opposition carrier disposition control method, which lays a foundation for further research.

Key words: three-level inverter, control strategy, modeling and simulation

近年来,多电平逆变器在中高压大容量电能变换中得到广泛应用,新型电路拓扑及其控制策略一直是人们研究的热点.相对于传统的两电平变换器,它具有很多优点:减少开关器件电压应力;在相同的开关频率下,多电平逆变器可以提高

逆变器的容量并降低高次谐波.消除同样谐波,两电平采用 PWM 控制法开关频率高、损耗大,而多电平逆变器可用较低频率进行开关动作,开关频率低、损耗小,因而效率提高^[1-2]. IGBT 等复合型开关器件的应用使得 PWM 载波频率可以提高到

* 收稿日期: 2008-09-13

基金项目: 重庆市教委科技研究项目 (KJ070619).

作者简介: 李山(1965—),男,湖南人,教授,主要从事电力电子与电机控制技术研究;王明渝(1960—),男,重庆人,博士生导师,主要从事现代电力电子技术、无速度传感器技术等研究.

15 kHz,同时,死区时间的减小也降低了逆变器输出电压的畸变,从而减小电流纹波和畸变率,有利于提高电流检测的精度^[3].在实际应用的几种多电平拓扑结构中,二极管钳位式多电平逆变器(diode clamped multi-level inverter, DCMLI)由于结构简单,无需复杂变压器而在高性能中、高压变频调速系统中有着广阔的应用前景^[4-5].

多电平脉宽调制(PWM)控制技术是多电平变换器研究的核心技术,多电平变换器的 PWM 控制方法主要有:载波 PWM 方法、空间电压矢量(SVM)法、优化 PWM 方法等.本研究以二极管钳位型三电平逆变器作为研究对象,对其载波 PWM 控制方法的同相层叠控制和反相层叠控制在 Matlab/Simulink 下进行对比仿真研究,为后续多电平逆变器的深入研究打下基础.

1 三电平逆变器拓扑

所谓多电平逆变器是指这种逆变器输出电压波形的电平等于或大于3的逆变器.由日本学者 Nabae 首次提出的带二极管钳位的三电平逆变器,又叫作中点钳位式(Neutral Point Clamped, NPC)逆变器.三电平逆变器一经出现,立即引起了广大学者和工程人员的浓厚兴趣,发展至今,形成三大主流拓扑结构:二极管钳位式多电平逆变器、飞跨电容型多电平逆变器、带独立电源的级联型多电平逆变器.而二极管钳位式多电平逆变器由于主电路结构简单,控制算法相对容易,输出无需复杂变压器,开关器件承受的电压低,功率等级的提高并不需要额外的硬件设施等优点而在中高压电机变频调速领域具有广阔的应用前景^[2].

二极管钳位三电平逆变器电路拓扑如图1所示.

从图1可以看出,该拓扑结构采用 AC-DC-AC 变频方式,直流侧串联两个大小相等的电容分压实现三个电平,每一个桥臂上有4个 IGBT 功率开关管,2个箝位二极管和4个反向恢复二极管.功率开关管串联,用两个串联的二极管和内部两个功率开关并联,二极管的中心和电容的中心连接,实现钳位.以A相为例,说明逆变器工作原理,二极管钳位式三电平逆变器开关状态与输出相电压的关系如表1所示.表中“1”代表功率器件

导通,“0”代表功率器件关断, V_{dc} 为直流侧电压.

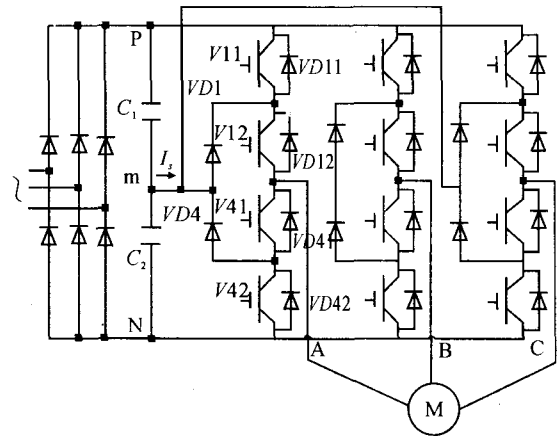


图1 二极管钳位式三电平逆变器拓扑

表1 开关状态与输出相电压的关系

V11	V12	V41	V42	相电压
1	1	0	0	V_{dc}
0	1	1	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	0

可以看出,当 V11 和 V12 或者 VD11 和 VD12 导通时,电机定子 A 相电压为 V_{dc} ;当 V41 和 V42 或者 VD41 和 VD42 导通时,定子 A 相电压为 0;当 V12 和 V41 导通时,定子 A 相电压为 $V_{dc}/2$, V12 和 V41 不可能同时导通,哪一个导通取决于 A 相负载电流的方向.因此,对于三电平逆变器来说其交流侧电压有 V_{dc} 、 $V_{dc}/2$ 、0 三种状态,三个桥臂进行组合,共有 $3^3 = 27$ 种开关状态.还可以看出, V11 和 V41 驱动信号相反, V12 和 V42 驱动信号相反,在逆变器控制时要注意到这点.

在该拓扑中,各功率开关在断开的时候承受直流侧电压的一半,因此适合于高压大功率场合,该电路可以推广到任意 N 电平.该拓扑结构不足之处在于:三电平以上拓扑需要器件数量较多,控制复杂性明显增加以及电容中点电压发生波动等.

2 控制策略对比分析

多电平逆变器 PWM(脉宽调制)控制技术一直是多电平逆变器研究的核心内容之一.多电平逆变器的 PWM 控制方法是和其拓扑结构紧密联系的,不同的拓扑具有不同的特点,具有不同的性能

要求,但归纳起来,主要有 2 个方面的控制目标:一是对输出电压的控制,即输出脉冲序列在伏秒意义上与参考电压波形等效;二是对逆变器本身运行状态的控制,包括电容电压平衡控制、输出谐波控制、开关器件功率输出平衡及损耗控制等.多电平逆变器的 PWM 控制方法主要有:载波调制法,空间电压矢量法,优化 PWM 方法等.

多电平逆变器载波调制 PWM 控制策略,是两电平载波 SPWM(正弦波脉宽调制)技术在多电平中的直接推广应用.通过载波和调制波的比较,得到开关脉宽控制信号.对于多电平载波调制 PWM 控制,若电平数为 N ,则需要载波数为 $N - 1$.由于多电平逆变器需要多个载波,因此在调制生成多电平 PWM 波时有 2 类基本方法:第 1 类称为载波层叠法(Carrier Disposition PWM),由多个幅值相同的三角载波叠加,然后与同一个调制波比较,得到多电平 PWM 波形,这类方法可直接用于二极管箝位型多电平逆变器结构的控制,对其他类型的多电平结构也可适用;第 2 类称为载波移相法(Phase Shift Carrier PWM),用多个分别移相、幅值相同的三角载波与调制波比较,生成 PWM 波分别控制各组功率单元,然后再叠加,形成多电平 PWM 波形,一般用在 H 桥级联型结构、电容箝位型结构逆变器的控制.

在载波层叠法中,根据三角载波之间相位关系的排列不同,可以有三种载波层叠 PWM 方式:① 同相层叠方式(Phase Disposition),所有载波以相同的相位上下排列叠加;② 正负反相层叠式(Phase Opposition Disposition),坐标横轴以上的载波相位和坐标横轴以下的载波相位相反;③ 交替反向层叠式(Alternative Phase Opposition Disposition),所有相邻载波的相位都相反.

对于三电平逆变器而言,由于载波数为 2,正负反相层叠式与交替反相层叠式一致,所以三电平的载波层叠法只区分为同相层叠方式和反相层叠方式 2 种.

三电平逆变器载波反相层叠 PWM 控制如图 2 所示,调制度 = 0.9.

图 2 中 C1 和 C2 为上下层的三角载波, U_{ref} 为正弦调制波(频率为 50Hz),用正弦波与三角波进

行比较,在正弦波瞬时值大于三角载波值的部分产生输出电压 PWM 脉冲列,小于部分产生输出电压的零脉冲.由于 C1 与 C2 是反相的,也就是说它们对称于坐标横轴,因此通过正弦波与三角波进行比较产生输出电压 PWM 波形是正半周与负半周相同的.因此通过比较后,产生图中的两个正负半周 SPWM 控制波,将它们分别取反后,就会产生四个 SPWM 控制波.它们分别控制一相桥臂上的四个开关管.当调制波为对称三相正弦波时,相同原理可以产生 12 路 SPWM 波.

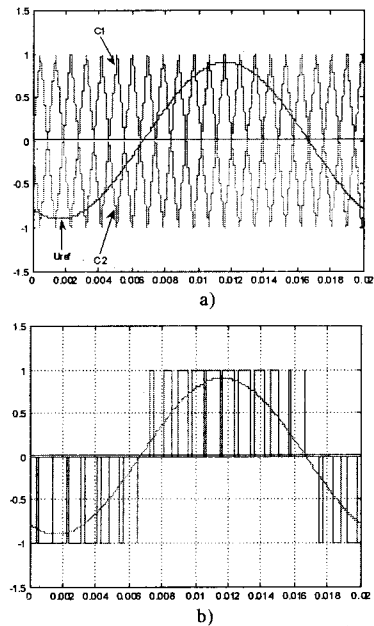


图 2 反相层叠控制方式

三电平逆变器载波同相层叠 PWM 控制如图 3 所示,调制度 = 0.9.

图 3 中,载波 C1 与 C2 是同相的,也就是说它们不对称于坐标横轴.因此通过正弦调制波与三角载波进行比较,产生的输出电压 PWM 波形正半周与负半周是不一定相同的,只有在某些条件下是相同的.其余工作原理与图 2 相同.

载波反相层叠 PWM 控制与载波同相层叠 PWM 控制的调制波采用的都是正弦波,实现简单,可直接用于二极管钳位式多电平逆变器控制,但直流电源电压的利用率较低,与调制度有关,开关频率较高,开关损耗较大.同时没有很好的考虑中点电压平衡控制问题.

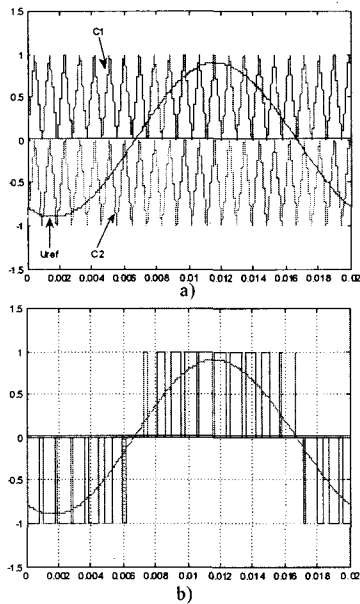


图3 同相层叠控制方式

3 仿真研究

分析了二极管钳位式三电平逆变器载波调制法两种不同的控制策略后,笔者基于 Matlab/Simulink 仿真软件^[6],对基于上述算法的三电平逆变器电机负载系统进行了对比仿真研究.所用的电机参数:额定功率 $P_N = 4 \text{ kW}$,额定电压 $U_N = 380 \text{ V}$,额定频率 $f_N = 50 \text{ Hz}$,极对数 $n_p = 3$,额定转速 $n_N = 960 \text{ r/min}$.

在 Simulink 中没有现成的三角波发生器,需要基本元素来构建.图4为载波子模块构建框图,其中图4 a)为反相层叠载波方式,图4 b)为同相层叠载波方式,需要对脉冲序列进行积分得到三角波.

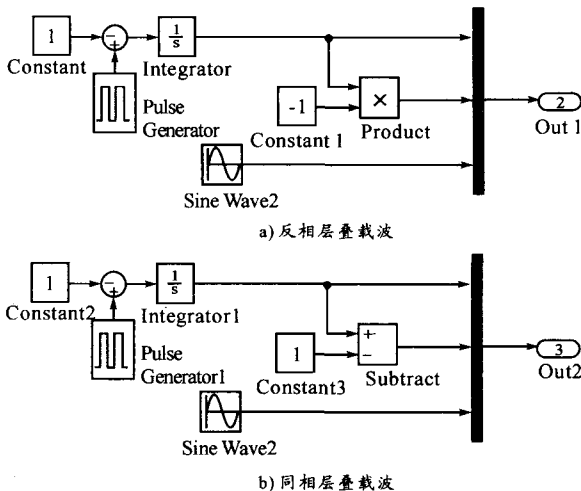


图4 载波子模块结构框图

图5为整个系统仿真模型.由电源部分、三电平逆变器、感应电机、PWM控制模块等组成.FFT分析在 POWERGUI 模块中实现.

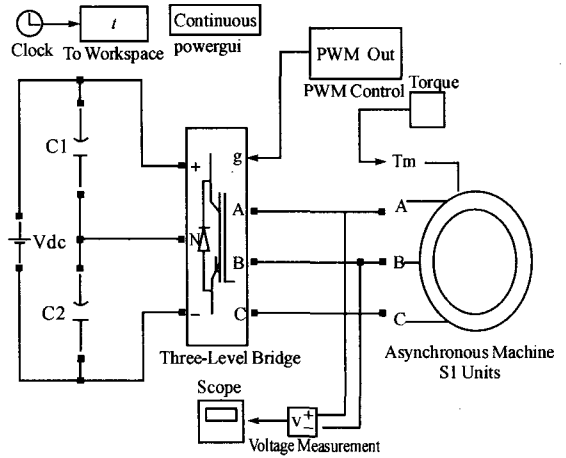
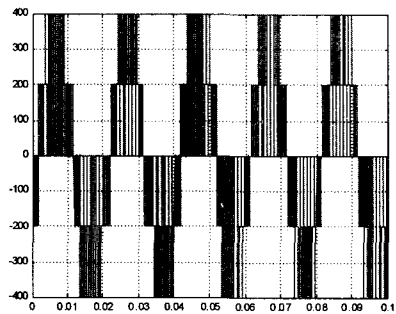
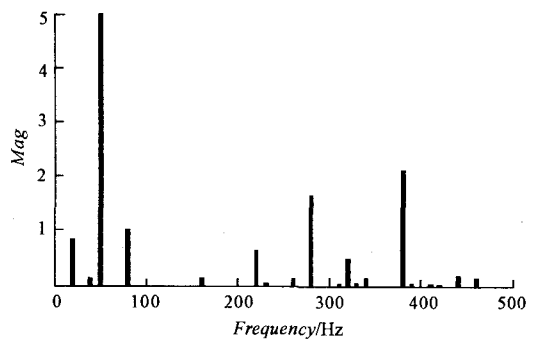


图5 系统仿真模型

图5中,采用反相载波层叠 PWM 控制时电机端线电压波形如图6 a)所示,图6 b)为输出线电压频谱分析;图7 a)为采用同相载波层叠 PWM 控制时电机端线电压波形,图7 b)为其输出线电压频谱分析.



a) 线电压波形



b) 输出电压频谱

图6 反相层叠法输出电压波形

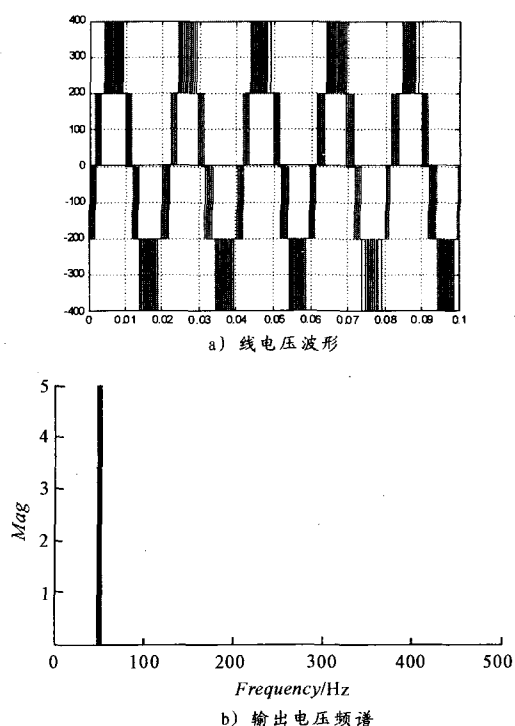


图7 同相层叠法输出电压波形

对比图6和图7可以看出,同相层叠载波控制时相比于反相层叠载波控制时输出线电压波形更接近正弦波,反相层叠控制时线电压毛刺较多,在一个基波周期内总的开关次数较多.从输出电压频谱分析这一点也可以得到验证,两种控制策略下,输出线电压谐波分量是一致的,均为311.7,但反相层叠法时,高次谐波含量明显要大于同相层叠载波控制法,同相层叠法时,输出线电压的THD(总谐波畸变率)为0.02%,反相层叠法时,输出线电压的THD为0.04%.换句话说,载波同相层叠方式(PD)的谐波性能优于反向层叠式(POD)

谐波性能.

4 结束语

仿真是科学研究的重要手段之一,在简介二极管钳位式三电平逆变器电路拓扑及其控制策略的工作原理基础上,介绍了其在Matlab/Simulink下的建模与仿真方法,通过比较三电平逆变器载波调制法输出电压和输出电流及其谐波特性,对比分析了两者控制策略的优缺点,为以后进一步深入研究多电平控制打下基础.

参考文献:

- [1] Bin Wu. High-power Converters and AC Drives[M]. IEEE Wiley Press, 2006.
- [2] 李勇东,肖曦,高跃.大容量多电平变换器 原理.控制.应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] Seung-Ho Song, Jong-Woo Choi, Seung-Ki Sul. Current Measurements in Digitally Controlled AC Drives[J]. IEEE Industry Application Magazine, 2000(3):51-62.
- [4] 张永昌,赵争鸣.基于快速空间矢量调制算法的多电平逆变器电容电压平衡问题的研究[J].中国电机工程学报,2006,26(18):71-76.
- [5] 李永东.高性能大容量交流电机调速技术的现状及展望[J].电工技术学报,2005,20(2):1-10.
- [6] 张志勇.精通MATLAB6.5版[M].北京:航空航天大学出版社,2003.

(责任编辑 陈 松)