

三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究

费万民^{1,2}, 吕征宇^{1,2}, 姚文熙¹

(1. 浙江大学电力电子国家专业实验室, 浙江 杭州 310027

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

RESEARCH ON SELECTED HARMONIC ELIMINATION PWM TECHNIQUE APPLICABLE TO THREE-LEVEL VOLTAGE INVERTERS

FEI Wan-min^{1,2}, LV Zheng-yu^{1,2}, YAO Wen-xi¹

(1.State Key Laboratory of Power Electronics of Zhejiang University; 2. College of Electrical Engineering of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: SHEPWM, a method to eliminate the selected low order harmonics by optimizing switching time sequence, has been concerned greatly because of its advantages such as high waveform quality, high efficiency, full utilization of DC side voltage and small size of DC side filter. In this paper, Selected Harmonic Elimination Pulse Width Modulation techniques applicable to three-level voltage inverters are studied in detail. In order to get a high convergence speed of the nonlinear equations, an effective method for producing initial values of the nonlinear equations is proposed. The SHEPWM switching time sequence obtained by solving the nonlinear equations numerically is simulated with POWERSIM 4.0, and experimentally verified through a diode-clamped three-level voltage type inverter composed of MOSFET controlled by a two-DSP (TMS320LF2407A) control flat-form. Simulation and experiment results proved the advantages of SHEPWM Technique.

KEY WORDS: Three-level inverter; Selected harmonic elimination; PWM; Power electronics

摘要: 特定谐波消除 SHEPWM, 通过开关时刻的优化选择, 消除选定的低频次谐波, 具有波形质量高、效率高、直流电压利用率高、直流侧滤波器尺寸小等一系列显著优点, 所以受到人们的普遍关注。该文首先针对 1/4 周期对称的脉宽调制波形, 研究了三电平 SHEPWM 非线性方程组的求法, 提出了以三角载波法生成非线性方程组初值的方法, 使得求解非线性方程组的速度明显加快; 根据非线性方程组的数值解, 用 POWERSIM 电力电子专用仿真软件对三电平 SHEPWM 进行了仿真研究; 用小功率 MOSFET 管构成二极管箝位三电平逆变器实验电路模型, 以双 DSP 中压变频控制平台为控

制器, 对三电平 SHEPWM 方法进行实验研究。仿真和实验结果证实了 SHEPWM 的谐波消除效果和 SHEPWM 方法所具有的一系列显著优点。

关键词: 三电平逆变器; 特定谐波消除; 脉冲宽度调制; 电力电子

1 引言

新型多电平变换器解决了在中高压场合功率元件耐压低的问题, 降低了开关过程中的 dv/dt , 改善了变换器的输出波形, 因而在中高压变频调速、交流柔性供电系统 FACTS 等方面成为首选方案。多电平变换器的 PWM 控制方法, 是多电平变换器研究中相当关键的技术, 它和多电平变换器的拓扑结构密切相关, 不仅决定功率变换目标能否实现, 而且决定了输出电压波形的质量, 对系统开关损耗的减少和系统效率的提高起着至关重要的作用。

多电平 PWM 可以分为以下几种: 阶梯波 PWM^[1,2] 用阶梯波逼近正弦波, 优点是主开关元件开关频率低, 开关损耗小, 效率高, 缺点是在电平数较低时谐波含量较高; 正弦载波调制 SPWM^[3] 对于 n 电平的变换器来说, 每相采用 $n-1$ 个具有相同频率、相同相位、相同峰-峰值并且在对应于直流母线电压的电压信号范围内连续放置的三角载波和一个正弦参考信号进行比较, 在正弦波和三角波相交的时刻产生开关管的开关信号。其优点是可以降低输出谐波含量, 易于实现, 适用于任何电平数的多电平变换器, 可以在调制比的所有变化范围内工作^[7]。缺点是开关频率高, 开关损耗大, 效率低。在参考正弦

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50237030ZD)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50237030ZD).

波中注入合适大小的三次谐波,可以提高基波输出电压的幅值;空间电压矢量PWM(SVPWM)^[4,5]是一种建立在空间电压矢量合成概念上的PWM方法,其优点是电压利用率高,易于数字实现等。对于二极管箝位多电平电路,可以利用电压矢量冗余来实现直流侧电容电压的平衡。但当电平数超过5时,算法过于复杂;特定谐波消除SHEPWM^[6]本文将研究这一方法。

特定谐波消除SHEPWM,通过开关时刻的优化选择,消除选定的低频次谐波,具有以下显著优点:

在同样的开关频率下,可以产生最优的输出电压波形,从而减小电流纹波和电动机的转矩脉动,从整体上提高控制性能;波形质量有改善,减小了直流侧电流纹波,使得直流侧滤波器的尺寸有所减小;

在同样波形质量的情况下,利用特定谐波消除法SHEPWM可以得到最低的开关频率,从而有效降低开关损耗,提高转换效率,这一点对高压大功率设备来讲有特别的重要意义;可以通过调制来得到较高的基波电压,提高直流电压的利用率等。特定谐波消除SHEPWM的困难在于必须采用牛顿迭代法求解一组非线性方程组,而且选取合适的初值是解法收敛的必要条件,这就决定了运算要花费较多的时间,不利于在线计算,因而多采用离线计算。采用查表法取得开关切换时刻,这就需要较大的数据表格。随着以DSP为代表的高速计算技术的发展和一些优化算法的出现,在线求解非线性方程组已不是难事,因而在在线SHEPWM技术以成为可能;另一方面,廉价大容量存储芯片的出现,也为用基于查表法的离线特定谐波消除法SHEPWM来实现在宽频率范围内的高性能功率处理提供了更好的基础。

功率变换器的拓扑结构不同,对应的PWM控制规律也不同,文[6]针对级联多电平电路,研究了一种专用的特定谐波消除SHEPWM方法,取得了很好的控制效果。本文以三电平逆变器为例,研究通用的多电平电压型逆变器的特定谐波消除SHEPWM方法,以自然采样三角载波SPWM法取得的开关切换角序列为初值,采用1/4周期对称脉冲波形,以消除1.5kHz以下谐波为目标。采用牛顿迭代法,求取SHEPWM开关角度,用仿真方法研究了谐波消除效果,并建立了一个三电平的实验电路模型,对SHEPWM的谐波消除效果进行了实验验证。

2 三电平 SHEPWM 非线性方程组的建立与求解

2.1 三电平 SHEPWM 非线性方程组的建立

特定谐波消除SHEPWM的思路,最早是针对传统的两电平变换器提出的^[7-9]。其思路是在预先确定的角度处实现特定开关的切换,从而产生预期的最优SPWM控制,以消除选定的低频次谐波。

图1所示为针对三电平的SHEPWM方法。其中,图1(a)为三电平载波SPWM的调制方法;图1(b)为单相三电平输出电压波形;图1(c)为三电平1/4周期内开关切换角的定义。

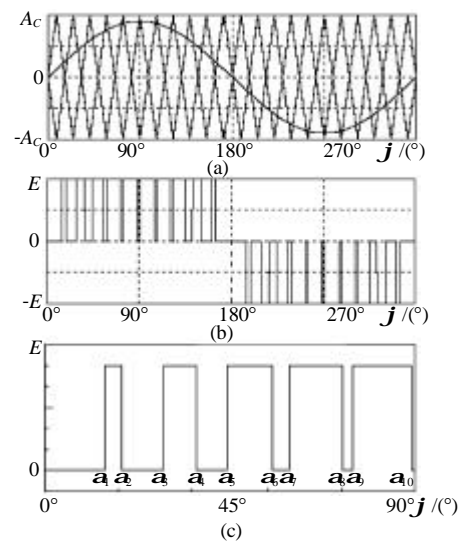


图1 多电平SHEPWM开关切换角及初值设置

Fig. 1 Switching angles and their starting values obtained using multi-carrier PWM method

由图1(b)可知,单相输出电压脉冲序列满足Dirichlet定理,因而可表示为如下傅立叶级数

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) \cos n\omega t dt \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v(t) \sin n\omega t dt \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (3)$$

根据对称关系,可以证明 \$a_n=0\$,将图1(a)所示 \$v(t)\$代入式(3)得

$$b_n = \frac{2E}{n\pi} \sum_{k=1}^N [(-1)^{k+1} \cos na_k + (-1)^k \cos(n\pi - na_k)], \quad n=1,2,3,\dots \quad (4)$$

根据 \$n\$ 的奇偶性, \$a_n\$、\$b_n\$ 可表示如下

$$\begin{cases} a_n = 0, n = 1, 2, 3, \dots \\ b_n = \begin{cases} 0, n \text{ 为偶数} \\ \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos na_k, n \text{ 为奇数} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $0^\circ \leq a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < a_5 < a_6 < a_7 < a_8 < a_9 < a_{10} \leq 90^\circ$ 。

考虑到多电平功率变换器主要用于高压电功率场合,我们只考虑三相的情况,所以,只须消除低频次非 3 倍频次谐波,所以,根据图 1(b)所示($N=10$),设相邻电压差为 E ,可得到的求取三电平 SHEPWM 开关切换角的非线性方程组为

$$\begin{cases} b_1 = ME \\ b_n = 0, n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, \dots \end{cases} \quad (6)$$

式中 b_n 如式(5)所示。

2.2 非线性方程组的求解

式(6)和式(5)所组成的 SHEPWM 方程,为由简单的三角函数构成的非线性超越方程,其偏导数易于求取,所以,多采用牛顿迭代法求解。因为非线性方程组的求解需要一组初始值,而且初始值选择的合适与否直接决定了牛顿迭代算法是否收敛,所以初始值的选取要尽可能接近方程的解。目前,初值的选取还没有系统、有效的方法,研究者普遍采用试凑的方法,效率非常低。考虑到三角载波调制 SPWM 方法也是用来消除谐波的,其开关切换角更接近于 SHEPWM 非线性方程组的解,所以采用三角载波调制 SPWM 法来选取方程组的初值。对于三

电平逆变器来说,为实现波形的 1/4 周期对称,取两载波相位互差 180° ,如图 1(a)所示。

限于篇幅,本文只列举 50Hz、40Hz 两个点的研究结果。为消除低于 1500Hz 的低频次谐波并保持 $V/F=\text{常数}$,在 50Hz、40Hz 频率下,应取的开关切换点个数 N 、调制比 M 和预期消除的低频次谐波次数如表 1 所示。

表 1 输出频率为 50、40Hz 时的调制比 M 、开关切换角个数 N 和预期消除的谐波次数列表

Tab.1 List of M , N and low order harmonics to be eliminated

频率参数	50Hz	40Hz
M	1.0	0.8
N	10	13
预期消除的谐波次数	5,7,11,13,17,19,23,25,29	5,7,11,13,17,19,23,25,29,31,35,37

当 $M=1$ 时,靠近正弦波峰值处的控制脉冲会出现合并,为得到较为合适的初值,取 $M=0.9$,载波频率 $f=1100\text{Hz}$,得到的初值如表 2 第 1 行所示。

解此非线性方程组,得到的开关切换角和各次谐波分量如表 2、表 3 所示。

当输出频率 $f=40\text{Hz}$ 、 $M=0.8$ 时,为得到 SHEPWM 非线性方程组的初值,取三角载波的频率为 1160Hz,取正弦波的幅值调制比为 0.8,得到的初值如表 4 第一行所示。解非线性方程组,得到的开关切换角和各次谐波分量如表 4、表 5 所示。

表 2 输出频率为 50Hz 时 SHEPWM 开关切换角的计算
Tab. 2 Starting angles and solutions of SHEPWM equations at 50Hz

开关点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
初始角度/($^\circ$)	14.400	18.800	29.000	37.300	44.100	55.300	59.200	72.400	74.800	89.100
迭代结果/($^\circ$)	11.777	16.118	23.157	38.074	41.412	54.007	56.514	71.541	73.642	87.471

表 3 输出频率为 50Hz 时各低次谐波分量数值 ($N=10, M=1$)
Tab. 3 Fundamental and low order harmonics content at 50Hz

谐波次数 n	基波	3	5	7	9	11	13	15
谐波含量 b_n	1.0000	0.2193	0.0000	0.0000	-0.0940	0.0000	0.0000	0.0912
谐波次数 n	17	19	21	23	25	27	29	31
谐波含量 b_n	0.0000	0.0000	-0.3258	0.0000	0.0000	0.0142	0.0000	0.1305

表 4 输出频率为 40Hz 时的 SHEPWM 开关切换角的计算
Tab. 4 Starting angles and solutions of SHEPWM equations at 40Hz

切换点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
初始角度	11.3	13.6	22.8	27.2	34.4	40.5	46.0	53.7	57.8	66.7	69.6	79.3	81.9
迭代结果	4.91	8.49	19.47	26.46	32.75	42.77	47.82	60.20	62.47	65.02	69.50	79.68	85.34

表 5 输出频率为 40Hz 时各低频次谐波含量
Tab. 5 Fundamental and low order harmonics content at 40Hz

谐波次数 n	基波	3	5	7	9	11	13	15	17	19
谐波含量 b_n	0.8000	0.1888	0.0000	0.0000	0.0329	0.0000	-0.0000	0.1136	0.0000	-0.0000
谐波次数 n	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
谐波含量 b_n	0.4322	0.0000	0.0000	0.2714	0.0000	0.0000	-0.0261	0.0000	0.0000	-0.0570

解 SHEPWM 非线性方程组的过程说明,采用三角载波法求取的开关时间序列为初值,非线性方程组易于收敛,计算速度大大加快。

3 三电平 SHEPWM 的仿真研究

为了研究实际的谐波消除效果,采用电力电子专用仿真软件 PSIM,以二极管箝位多电平变换器为模型,对三电平的 SHEPWM 控制方法进行了仿真研究。输出频率为 50Hz、40Hz 时的相电压 u_a 、线电压 u_c 仿真波形和谐波分析谐波幅度以 u_n 表示,分别如图 2 和图 3 所示。

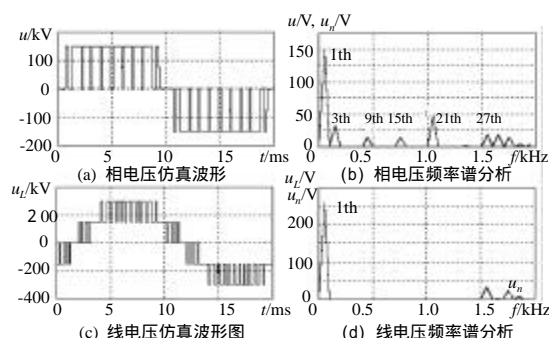


图 2 输出频率为 50Hz 时三电平逆变器的仿真波形

Fig. 2 Simulation waveforms of SHEPWM method applicable to three-level voltage inverters at 50Hz

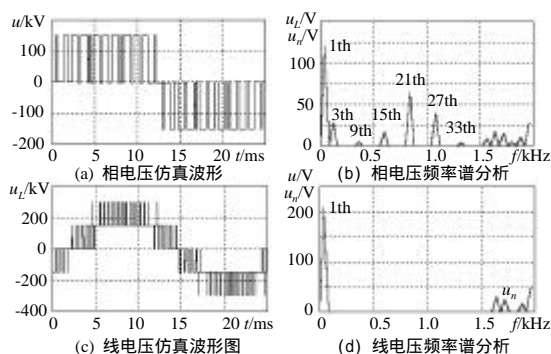


图 3 输出频率为 40Hz 时三电平逆变器的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of SHEPWM method applicable to three-level voltage inverters at 40Hz

从图 2、图 3 所示的仿真波形及频谱分析可以看出,在输出频率为 50Hz 时,相电压中的非 3 倍频的低频谐波 5、7、11、13、17、19、23、25、29 次谐波均被基本上消除,在输出频率为 40Hz 时,相电压中低于 37 次的非 3 倍频的低频谐波均被消除。在三相系统中,在输出频率为 50Hz 时,低于 30 次的低频次谐波均被消除,在输出频率为 40Hz 时,低于 40 次的低频次谐波均被消除,和预期的效果是一致的。

4 实验研究

为进一步研究三电平 SHEPWM 的实际效果,我们以 MOSFET (IRF840) 为功率开关,以本课题组研制的双 DSP (TMS320LF2407A) 功率变换器通用控制平台为控制中心,设计了一个二极管箝位三电平逆变器实验电路模型,如图 4 所示。以一小功率三相鼠笼电动机为负载,以输出频率 50Hz 为例,采用上述 SHEPWM 控制方法,进行了实验研究。实验波形如图 5 所示。

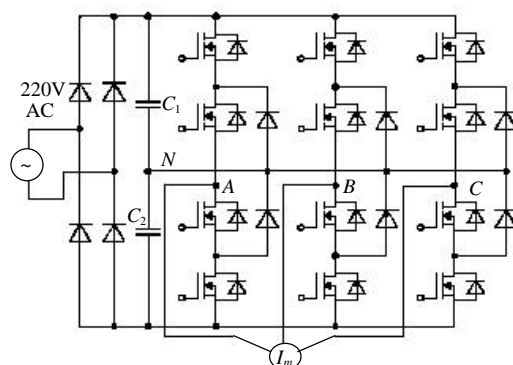


图 4 三电平 SHEPWM 实验电路模型

Fig. 4 Experiment circuit of three-level voltage inverter

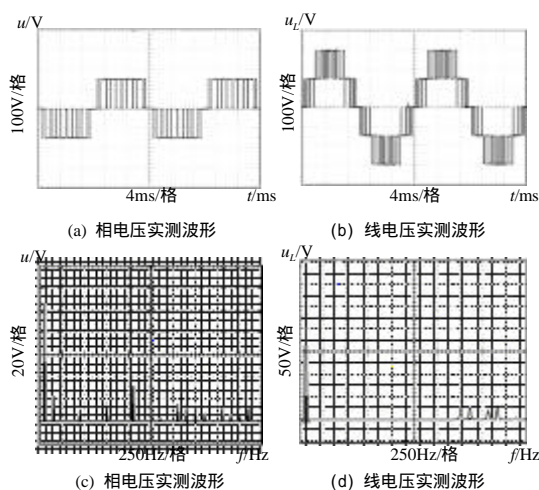


图 5 三电平变换器 SHEPWM 实验波形

Fig. 5 Experiment results of SHEPWM method in three-level voltage inverter prototype

从图 5 所示的实验波形和波形分析可以看出,实验结果和仿真分析非常一致,充分证明了三电平 SHEPWM 的谐波消除效果,在开关频率为 1100Hz 的情况下,三相功率变换器可以有效消除低于 31 次的低频次谐波,而且输出基波分量可以达到直流侧电

容电压的大小,即调制比为1,电压利用率很高。事实上,调制比可以达到1.15,进一步的实验和仿真,将另文介绍。

5 结论

本文提出了用三角载波法生成 SHEPWM 非线性方程组初始值的方法,非常有利于非线性方程组迭代过程的收敛,并加快了计算速度;以输出频率 50Hz、40Hz 为例,建立并求解了三电平电路的 SHEPWM 非线性方程组,对求得的开关角度序列进行了仿真研究,对 50Hz 输出频率还进行了实验研究。仿真和实验结果均表明,三电平特定谐波消除 SHEPWM 方法具有波形质量高,直流电压利用率高,开关频率低,开关损耗小,功率变换效率高等一系列显著优点。以 DSP 为代表的高速计算芯片和大容量存储芯片的出现和成本的不断降低,使得 SHEPWM 技术在工业上的应用成为可能。以 DSP、大容量存储芯片为控制系统硬件、以 SHEPWM 方法为控制软件的多电平功率变换器,是高电压、大功率能量变换与处理的一个卓有成效的途径。

参考文献

- [1] Leon M. Tolbert, Fang Z. Multilevel converters for large electric drives[C]. IEEE Apec'00: 530-536.
- [2] Madhav D Manjrekar, Thomas A Lipo. A hybrid multilevel inverter topology for drive applications[C]. Apec'98: 523-529.
- [3] Carrara G, Gardella S, Marchesoni M, *et al.* A new multilevel PWM method: A theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics.

1992,7: 497-505.

- [4] Suh J-H, Choi C-H, Hyun D-S. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters[R], in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1999, 515-520.
- [5] Lee Y-H, Kim R-Y, Hyun D-S. A novel SVPWM strategy considering dc-link balancing for a multi-level voltage source inverter[C], in Proc. IEEE APEC'99, 1999: 509-514.
- [6] Li Li, Dariusz Czarkowski, Yaguang Liu *et al.* Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters[J]. Transactions on Industry Applications, January/February 2000, 36(1): 160-170.
- [7] Prasad N Enjeti, Phoivos D Ziogas, James F. Lindsay. Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics: A Critical evaluation[A]. IEEE Transactions on Industry Applications[C], 1990, 26(2): 302-316.
- [8] Tan Xinyuan, Bian Jingming. An algebraic algorithm for generating optimal PWM waveforms for AC drives—Part I: selected harmonic elimination[A]. Power Electronics Specialists Conference[C], 1991. PESC '91 Record, 22nd Annual IEEE, 1991, Page(s): 402-408.
- [9] 谭新元 (Tan Xinyuan). 牵引逆变器 SHEPWM 控制技术的研究 (Advanced SHEPWM technique for AC traction drives) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21(9): 47-52.

收稿日期: 2003-03-09。

作者简介:

费万民(1965-),男,博士生,副教授,研究方向为电力电子技术及其应用;

吕征宇(1957-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术及其应用;

姚文熙(1977-),男,博士生,研究方向为电力电子技术及其应用。

(责任编辑 王彦骏)